

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALURGIA E  
DE MATERIAIS – PPGE3M

**ANDERSON DA SILVA ASSIS**

**DESENVOLVIMENTO DE NÚCLEOS PARA ROTOR E ESTATOR DE  
SERVOMOTOR DE ATÉ 400 W A PARTIR DA LIGA Fe2%P SINTERIZADA**

Porto Alegre

2022

ANDERSON DA SILVA ASSIS

**DESENVOLVIMENTO DE NÚCLEOS PARA ROTOR E ESTATOR DE  
SERVOMOTOR DE ATÉ 400 W A PARTIR DA LIGA Fe2%P SINTERIZADA**

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

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Lício Schaeffer

Porto Alegre

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitora: Patricia Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Carla Schwengber ten Caten

Vice-Diretor: Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Afonso Regulo

Vice Coordenadora: Andréa Moura Bernardes

Assis, Anderson da Silva  
DESENVOLVIMENTO DE NÚCLEOS PARA ROTOR E ESTATOR DE  
SERVOMOTOR DE ATÉ 400 W A PARTIR DA LIGA Fe<sub>2</sub>P  
SINTERIZADA / Anderson da Silva Assis. -- 2022.  
99 f.  
Orientador: Lirio Schaeffer.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Servomotor. 2. Rotor . 3. Estator. 4. Metalurgia  
do pó. 5. Liga ferro-fósforo. I. Schaeffer, Lirio,  
orient. II. Título.

**ANDERSON DA SILVA ASSIS**

**DESENVOLVIMENTO DE NÚCLEOS PARA ROTOR E ESTATOR DE  
SERVOMOTOR DE ATÉ 400 W A PARTIR DA LIGA Fe2%P SINTERIZADA**

Esta dissertação foi analisada e julgada para a obtenção adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade

---

Orientador Prof. Dr. -Ing. Lírío Schaeffer - PPGE3M / UFRGS

---

Dr. Afonso Reguly

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Eng. Jorge Luis Braz Medeiros, FURG/RS.

---

Prof. Dr. Eng. José Carlos Krause de Verney, PPGEMPS – ULBRA/RS.

---

Prof. Dr. Eng. Josimar Souza Rosa, PPG – FEEVALE/RS.

A minha querida e amada esposa  
Débora e aos meus amores da minha vida  
Sophia, Arthur, Davih e Matheus.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é apenas uma breve parcela das experiências vividas e conhecimentos adquiridos através do contato com cada pessoa que tenha cruzado meu caminho, momentânea ou continuamente, durante este período. Por cada contribuição, direta ou indireta, serei eternamente grato!

Ao professor Dr. Ing. Lírio Schaeffer, pela chance e aposta depositada em mim e pela orientação e compreensão durante todo o período da realização deste.

Ao meu professor Dr. Jorge Braz, pela oportunidade a mim confiada e pela dedicação nos ensinamentos passados.

Ao professor Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias (*in memoriam*), pela ajuda e pelas orientações durante o andamento do trabalho.

A todos os colegas do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial, aos MSc. Eng. Monir Borba, MSc Eng. Leonardo Hartmann e MSc. Jaime Back.

Ao professor Josimar Souza Rosa e à equipe da Universidade Feevale, pela cooperação e disponibilidade dos equipamentos, que me ajudaram muito nos testes e ensaios.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela sua fraterna acolhida neste período.

E finalmente, agradeço especialmente à minha esposa e companheira, Débora Assis, pela fonte de amor, paciência, carinho e os tão importantes apoios, em todos os momentos, tão importantes para recarregar as energias e enfrentar o dia a dia com alegria e por fazer desse casamento a melhor experiência da minha vida.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um servomotor síncrono, com potência de até 400 W, trifásico, de corrente alternada, de oito polos, com núcleo do rotor e estator obtidos a partir da liga Fe<sub>2</sub>P, construído por metalurgia do pó (M/P) e ímãs permanentes de Nd-Fe-B, usualmente montado a partir de chapas de aço laminadas. O servomotor foi montado em uma bancada, funcionando como gerador, acoplado a um motor elétrico, como máquina primária, acionado por um inversor trifásico, para avaliação das perdas totais no servomotor com núcleo de Fe<sub>2</sub>P. Inicialmente, foram obtidos corpos de prova para a avaliação das propriedades físicas, mecânicas, magnéticas e elétricas, e para a avaliação das perdas em ensaio de frequência da liga a ser utilizada, sendo, na sequência, o desenvolvimento do projeto do motor, a fabricação dos componentes, a sua montagem e o seu sistema de acionamento. Os resultados apresentados, a partir dos corpos de prova, referentes às propriedades físicas, indicam que se deve realizar estudos iniciais para a avaliação dos efeitos de contrações no projeto, devido ao processo de sinterização da liga estudada, na avaliação das propriedades mecânicas, de dureza e resistência mecânica superiores em relação às chapas utilizados no servomotor convencional. Ensaio das propriedades elétricas demonstraram valor de resistividade de 207  $\mu\Omega\text{m}$ , promovendo a redução das perdas por correntes induzidas e das perdas por correntes parasitas. As propriedades magnéticas encontradas de permeabilidade relativa, de 2.802,3 [-], e de indução de saturação, de 1,17 T, que, segundo a literatura, são valores maiores obtidos em relação ao aço baixo carbono, coercitividade de 306,71 A/m e o magnetismo remanente de 0,84 T e perdas por histerese encontradas, são divergentes com os descritos na literatura sobre material sinterizado com a mesma liga, sendo que o ensaio de perdas magnéticas no material sinterizado apresentou valores equivalentes aos das chapas laminadas em frequências elevadas. O ensaio do servomotor na banca, como gerador, apresentou eficiência inferior em relação ao servomotor de chapas, efeito detectável pela presença de perdas por correntes parasitas. Sendo assim, os resultados demonstram que a liga estudada não apresenta uma melhor seleção de material apropriado para substituição das tradicionais construções em chapas de motores elétricos que operam em baixa frequência.

**Palavras-chave:** Servomotor. Metalurgia do pó. Liga ferro-fósforo. Materiais magnéticos macios. Rotor. Estator. Propriedades mecânicas. Propriedades magnéticas. Resistividade elétrica.

## ABSTRACT

This work aims to develop a synchronous servomotor, with a power of up to 400 W, three-phase, eight-pole, alternating current, with rotor and stator core obtained from Fe<sub>2</sub>P alloy, built by powder metallurgy (M/P) and Nd-Fe-B permanent magnets, usually assembled from laminated steel sheets. The servomotor was mounted on a bench, functioning as a generator, from another motor as a primary machine, driven by a three-phase inverter to evaluate the total losses in the servomotor with Fe<sub>2</sub>P core. Initially, specimens were obtained to evaluate the physical, mechanical, magnetic, electrical properties and evaluation of losses in the frequency test of the alloy to be used, followed by the development of the motor design, manufacture of the components their, assembly, and your drive system. The results presented from the specimens, of the physical properties, indicate that initial studies should be carried out to evaluate the effects of contractions in the project due to the sintering process of the studied alloy, in the evaluation of mechanical properties, hardness and mechanical strength, superior in relation to the plates used in the conventional servomotor. Tests of the electrical properties showed a resistivity value of 207 μΩm, promoting the reduction of induced current losses and eddy current losses. The magnetic properties found of relative permeability, of 2,802.3 [-] and saturation induction, of 1.17 T, which, according to the literature, are higher values obtained in relation to low carbon steel, coercivity of 306.71 A/m and the remanent magnetism of 0.84 T and hysteresis losses found, are different from those described in the literature on sintered material with the same alloy, and the test of magnetic loss in the sintered material showed values equivalent to those of laminated steel sheets at high frequencies. The servomotor test on the bench, as a generator showed lower efficiency compared to the plate servomotor, an effect detectable by the presence of eddy current losses. Thus, the results demonstrate that the alloy studied does not present a better selection of appropriate material to replace the traditional sheet metal constructions of electric motors that operate at low frequency.

**Keywords:** Servomotor. Powder metallurgy. Iron-phosphorus alloy. Soft magnetic materials. Rotor. Stator. Mechanical properties. Magnetic properties. Electrical resistivity.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Componentes principais de um servomotor.....	22
Figura 2 - Ilustração de um servomotor em corte.....	24
Figura 3 - Vista de três tipos de servomotores com ímã permanente montado no rotor. ....	24
Figura 4 - Regra da mão direita para o campo magnético, a partir de corrente elétrica.....	26
Figura 5 - Linhas de fluxo magnético através da área A. ....	28
Figura 6 - Curva de histerese $B \times H$ para materiais magnéticos.....	30
Figura 7 - Exemplos de curvas de histerese em materiais magnéticos moles (A) e magnéticos duros (B). ....	31
Figura 8 - (A) Curva de magnetização típica - (B) Relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado.....	32
Figura 9 - Regiões de magnetização fácil e difícil da curva de magnetização inicial. ....	33
Figura 10 - Estágios sucessivos de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo. ....	33
Figura 11 - Perdas de correntes em um núcleo de um motor. ....	39
Figura 12 - Comparação, em 60 Hz, da perda em núcleos de materiais sinterizados e de chapas laminadas de aço com fósforo, orientadas, de 0,64 mm e o aço M-19 de 0,61 mm.....	44
Figura 13 - Perda total nos núcleos, em 60 Hz, de material sinterizado, separada em perdas por histerese e corrente induzidas. ....	45
Figura 14 - Comparação das perdas totais do material sinterizado, medidas com uma indução de 1,5 T, com chapas de aço laminadas com fósforo, orientadas, de 0,63 mm e o aço silício m-19 de 0,61 mm. ....	45
Figura 15 - Percentual das perdas, por correntes induzidas da perda total em núcleos de material sinterizados, de chapas de aço laminadas com fósforo, orientadas, de 0,63 mm e do aço silício M-19 de 0,61 mm - (a) 60 Hz - (b) 400 Hz. ....	46
Figura 16 - Diagrama de fase do Fe-P.....	48
Figura 17 - Exemplos de análises metalográficas com a adição da liga Fe2%P, A) Fe-puro, B) Fe-1%P, C) Fe2%P, Fe-3%P.....	49
Figura 18 - Desenhos das peças que compõem a matriz para compactação do corpo de prova na forma de cilindro, A - Matriz, B - Punção superior, C - Punção inferior, D - Montagem da matriz (dimensões em mm). ....	52

Figura 19 - Matriz para fabricação dos corpos de prova na forma de cilindro, A - Matriz, B - Punção superior, C - Punção inferior. ....	52
Figura 20 - Desenhos das peças que compõem a matriz para compactação do corpo de prova na forma de anel, A - Matriz, B - Punção inferior, C - Punção superior, D - Macho, E - Montagem da matriz (dimensões em mm). ....	53
Figura 21 - Matriz para fabricação dos corpos de prova na forma de anel, A - Punção superior, B - Macho, C - Matriz, D - Punção inferior. ....	53
Figura 22 - Desenhos das peças que formam a matriz do núcleo "T", A - Matriz, B - Punção inferior, C - Punção superior (dimensões em mm).....	54
Figura 23 - Desenhos das peças que forma a matriz do núcleo "E", A - Matriz, B - Punção inferior, C - Punção superior (dimensões em mm).....	55
Figura 24 - Matrizes utilizadas para compactação - (A) Núcleo "E" - (B) Núcleo "T".....	55
Figura 25 - Curva de patamares de sinterização da liga Fe2%P. ....	57
Figura 26 - Cilindro (A), Anel (B), Núcleos "T" e "E" (C) .....	57
Figura 27 - Amostras dos corpos de provas na forma de cilindros na forma de sinterizados. .	57
Figura 28 - Geometria do cilindro. ....	58
Figura 29 - Anel de Rowland. ....	59
Figura 30 - (A) Traçador de curvas magnéticas, modelo TLMP-TCH-14, (B) conectado ao anel bobinado. ....	60
Figura 31 - Determinação da resistividade: (A) Anel cortado com os fios soldados, (B) Conectados a fonte elétrica e medição. ....	61
Figura 32 - Núcleo obtido por M/P (A) e núcleo obtido por chapas laminadas (B). ....	62
Figura 33 - Núcleo em chapas laminadas (A) e núcleo em M/P (B).....	62
Figura 34 - Circuitos equivalentes do transformador - (A) Primário - (B) Impedância equivalente.....	63
Figura 35 - Circuito RL: (A) Diagrama esquemático, (B) Formas de onda de tensão e corrente. ....	63
Figura 36 - Esquema elétrico montado para observações das perdas em frequência.....	63
Figura 37 - Servomotor SWA da WEG motores - (a) Vista em corte do motor síncrono com ímã permanente - (b) Vista em perspectiva. ....	66
Figura 38 - Dimensional extraído do rotor (A) e estator (B) (medidas em milímetros).....	68
Figura 39 - Desenhos das matrizes do rotor (medidas em milímetros). ....	69
Figura 40 - Desenhos das matrizes do estator (medidas em milímetros). ....	69

Figura 41 - Matriz do estator (esquerda) e do rotor (direita).....	70
Figura 42 - Rotor (A) e estator (B) prontos. ....	71
Figura 43 - Dimensões do ímã utilizado (medidas em milímetros). ....	71
Figura 44 - Geometria do eixo (medidas em milímetros). ....	71
Figura 45 - Geometria das tampas da carcaça. ....	72
Figura 46 - Esquema do bobinamento do servomotor.....	72
Figura 47 - Fotografias dos núcleos montados do - (A) Estator - (B) Rotor.....	73
Figura 48 - Desenho esquemático da bancada para os testes dos servomotores funcionando como motor e gerador.....	74
Figura 49 - Bancada para ensaios dos servomotores - (A) Desenho dimensional - (B) Bancada pronta.....	75
Figura 50 - Servomotor montado na banca de testes.....	75
Figura 51 - Resultados de medidas de alturas encontradas entre peça verde e sinterizada. ....	78
Figura 52 - Resultados de medidas de diâmetros encontradas entre peça verde e sinterizada. ....	78
Figura 53 - Resultados de medidas de volume encontradas entre peça verde e sinterizada.....	78
Figura 54 - Resultados de medidas de massa encontradas entre peça verde e sinterizada.....	78
Figura 55 - Resultados de medidas de densidades encontradas entre peça verde e sinterizada. ....	79
Figura 56 - Relação de variação em percentual encontradas entre peça verde e sinterizada. ..	79
Figura 57 - Imagens obtidas por metalografia para o material Fe2%P, (A) sem ataque, escala 400X, (B) ataque de nítal, escala 400X. ....	81
Figura 58 - Micrografias obtidas do pó metálico da mistura por MEV, (A) escala 50X, (B) escala 100X, (C) escala 300X, (D) escala 1000X, potência de 10kV. ....	82
Figura 59 - Micrografias obtidas do material sinterizado por MEV, (A) escala 50X, (B) escala 100X, (C) escala 300X, (D) escala 1000X, potência de 10kV.....	83
Figura 60 - Curva de magnetização da liga Fe2%P.....	83
Figura 61 - Curva de histerese obtido.....	84
Figura 62 - Perdas com variação da frequência.....	86
Figura 63 - Comparação entre potência elétrica em relação à frequência dos geradores.....	88
Figura 64 - Dados de frequência e eficiência entre servomotor de Fe2%P e Chapas. ....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Permeabilidade magnética relativa de alguns materiais.....	29
Tabela 2 - Força aplicada em cada corpo de prova. ....	56
Tabela 3 - Dados de placa do servomotor 08732. ....	67
Tabela 4 - Dados coletados do servomotor. ....	67
Tabela 5 - Força aplicada em cada componente.....	70
Tabela 6 - Corpos de prova.....	80
Tabela 7 - Tensão de escoamento obtido nas amostras. ....	80
Tabela 8 - Propriedades elétricas e magnéticas da liga Fe2%P.....	84
Tabela 9 - Dados extraídos do ensaio do gerador com rotor e estator de Fe2%P. ....	87
Tabela 10 - Dados extraídos do ensaio do gerador com rotor e estator de chapas.....	87
Tabela 11 - Ensaio de perdas - Chapas.....	99
Tabela 12 - Perdas em frequência - Chapas .....	99
Tabela 13 - Ensaio de perdas - Fe2%P .....	100
Tabela 14 - Perdas em frequência - Fe2%P.....	100

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DRX	Difração de Raios-X
EDX	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X ( <i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> )
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro
Fe <sub>3</sub> P	Fosfeto de Ferro
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MGOe	Mega-Gauss Oersteds
MO	Microscopia Óptica
SMC	Compósito Magnético Mole ( <i>Soft Magnetic Composite</i> )
TGA	Termogravimetria
ZrO <sub>2</sub>	Óxido de Zircônia
RPM	Rotação por minuto
PWM	Pulsor com Modulação ( <i>Pulse width modulation</i> )
M/P	Metalurgia do pó
MRV	Máquina de relutância variável
LdTM	Laboratório de transformação mecânica
LMPMM	Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais ( <i>American Society for Testing and Materials</i> )
RMS	Quadrado Médio da Raiz ( <i>Root mean square</i> )
AWG	Calibre de Fio Americano ( <i>American wire gauge</i> )
CAD	Projeto Assistido por Computador ( <i>Computer aided design</i> )
CI	Circuito integrado
AWG23	Espessura do fio de cobre
AWG27	Espessura do fio de cobre
HRB	Dureza Rockwell escala B
MKS	Metro-kilograma-Segundo
CGS	Centímetro-Grama-Segundo
RL	Circuito

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área da seção transversal	[m <sup>2</sup> ]
$A_{st}$	Área da seção transversal	[mm <sup>2</sup> ]
$B$	Densidade de fluxo (ou indução de saturação) magnético	[T]
$BH_{max}$	Produto energético	[J/m <sup>3</sup> ]
$B_r$	Magnetismo remanente ou retentividade magnética	[T]
$C$	Constante de proporcionalidade	[-]
$d$	Espessura do material	[mm]
$E_{gerador}$	Eficiência do gerador	[%]
$f$	Frequência	[Hz]
$F$	Força	[N]
$f_{gerador}$	Frequência do gerador	[Hz]
$H$	Campo magnético	[A/m]
$H_c$	Coercitividade magnética ou força coercitiva	[A/m]
$I$	Corrente elétrica	[A]
$IL$	Corrente	[A]
$J$	Densidade de corrente	[A/m <sup>2</sup> ]
$L_{inf}$	Comprimento infinitesimal	[m]
$l$	Comprimento	[mm]
$m$	Massa	[g]
$N$	Velocidade angular	[rpm]
$P$	Potência	[W]
$P_{apa}$	Potência aparente	[VA]
$P_{at}$	Potência ativa	[W]
$Pd/Vol$	Perdas por volume	[W/m <sup>3</sup> ]
$P_e$	Perdas por correntes de Foucault	[W/m <sup>3</sup> ]
$P_h$	Perdas por Histerese	[W/kg]
$Pot_{eixo}$	Potência no eixo	[W]
$Pot_{elét}$	Potência elétrica	[W]
$P_{reat}$	Potência reativa	[VAR]
$PR_n$	Perdas no núcleo	[W]
$R$	Resistência elétrica	[Ω]
$R_t$	Resistência equivalente total	[Ω]
$S$	Elemento infinitesimal de superfície	[m <sup>2</sup> ]
$UL$	Tensão	[V]
$V_{el}$	Tensão elétrica	[V]
$V$	Volume	[mm <sup>3</sup> ]
$X$	Reatância	[Ω]
$X_t$	Reatância equivalente total	[Ω]
$Z$	Impedância	[Ω]
$Z_t$	Impedância equivalente total	[Ω]

## SÍMBOLOS GREGOS

$\varphi$	Fluxo magnético total	[Wb]
$\mu$	Permeabilidade magnética do meio	[H/m]
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vácuo	[H/m]
$\mu_{\max}$	Permeabilidade relativa máxima	[H/m]
$\mu_r$	Permeabilidade magnética relativa	[-]
$\alpha$	Ângulo entre a perpendicular à área e a direção.	[°]
$\rho$	Densidade	[g/mm <sup>3</sup> ]
$\rho_e$	Resistividade elétrica	[ $\mu\Omega$ .m]
$\sigma_e$	Tensão de escoamento	[MPa]
$\tau$	Torque	[N.m]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	20
1.2	OBJETIVO GERAL .....	20
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	21
2.2	SERVOMOTORES .....	21
2.3	SERVOMOTORES SÍNCRONOS COM ÍMÃS PERMANENTES .....	23
2.4	PROPRIEDADES MAGNÉTICAS .....	25
<b>2.4.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Fundamentos do magnetismo .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Campo magnético [<math>H</math>].....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Densidade de fluxo (ou indução) magnética [<math>B</math>].....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.5</b>	<b>Fluxo magnético total [<math>\phi</math>] .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.6</b>	<b>Permeabilidade magnética relativa [<math>\mu_r</math>].....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.7</b>	<b>Coercitividade [<math>H_c</math>] .....</b>	<b>29</b>
2.5	CURVA DE HISTERESE .....	30
2.6	MAGNETIZAÇÃO .....	32
2.7	MATERIAIS MAGNÉTICOS .....	34
<b>2.7.1</b>	<b>Materiais magnéticos duros (ímãs permanentes) .....</b>	<b>34</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Materiais magnéticos macios (não permanentes) .....</b>	<b>35</b>
2.8	PERDAS EM MATERIAIS MAGNÉTICOS NÃO PERMANENTES .....	37
<b>2.8.1</b>	<b>Perdas residuais .....</b>	<b>37</b>
<b>2.8.2</b>	<b>Perdas por histerese.....</b>	<b>37</b>
<b>2.8.3</b>	<b>Perdas por correntes de Foucault (ou correntes parasitas) .....</b>	<b>38</b>
2.9	METALURGIA DO PÓ .....	40
<b>2.9.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>40</b>
<b>2.9.2</b>	<b>Características.....</b>	<b>41</b>
<b>2.9.3</b>	<b>Formas de obtenção dos materiais magnéticos macios por metalurgia do pó .....</b>	<b>41</b>
2.10	MÁQUINAS ELÉTRICAS COM NÚCLEOS DO ESTATOR E ROTOR OBTIDOS POR M/P.....	43
2.11	LIGA FERRO FÓSFORO .....	47
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>51</b>
3.1	MATÉRIA-PRIMA .....	51



3.2	FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	51
3.2.1	<b>Ferramentas utilizadas .....</b>	<b>52</b>
3.2.2	<b>Compactação dos corpos de prova .....</b>	<b>55</b>
3.2.3	<b>Sinterização dos corpos de prova .....</b>	<b>56</b>
4	<b>ANÁLISE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>58</b>
4.1	PROPRIEDADES FÍSICAS .....	58
4.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	58
4.3	PROPRIEDADES MAGNÉTICAS .....	59
4.4	PROPRIEDADES ELÉTRICAS .....	60
4.5	ENSAIO DE PERDAS MAGNÉTICAS COM VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA ....	61
4.6	DESENVOLVIMENTO DO SERVOMOTOR .....	66
4.6.1	<b>Introdução .....</b>	<b>66</b>
4.6.2	<b>Projeto do servomotor .....</b>	<b>68</b>
4.6.3	<b>Aquisição e usinagem das outras peças .....</b>	<b>71</b>
4.7	MONTAGEM DO SERVOMOTOR .....	72
4.8	MONTAGEM DA BANCADA DE TESTES .....	73
4.8.1	<b>Introdução .....</b>	<b>73</b>
4.8.2	<b>Projeto da bancada de testes.....</b>	<b>73</b>
4.8.3	<b>Montagem da bancada de testes .....</b>	<b>75</b>
4.9	ENSAIOS DO SERVOMOTOR .....	75
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>78</b>
5.1	PROPRIEDADES FÍSICAS DAS AMOSTRAS .....	78
5.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	80
5.3	PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS .....	83
5.4	ENSAIO DE PERDAS MAGNÉTICAS COM A VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA.	85
5.5	ENSAIOS DO SERVOMOTOR .....	87
6	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>90</b>
7	<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....</b>	<b>92</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE A – TABELA DE ENSAIO DE PERDAS EM FREQUÊNCIA – CHAPAS</b> <b>.....</b>	<b>99</b>
	<b>APÊNDICE B – TABELA DE ENSAIO DE PERDAS EM FREQUÊNCIA – FE2%P 100</b>	
	<b>ANEXO A – FICHA TÉCNICA DO PÓ DE FERRO .....</b>	<b>101</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os materiais magnéticos macios, obtidos por metalurgia do pó (M/P), estão sendo amplamente estudados, devido às vantagens que oferecem sobre as chapas de aço eletromagnéticas, em relação às suas propriedades magnéticas isotrópicas, alta resistividade elétrica, *design* flexível, potencial para redução de tamanho e alta flexibilidade de projeto [1]. Neste contexto, os motores elétricos vêm sendo estudados nos últimos seis anos, visando o melhor aproveitamento da energia, independente do seu tamanho.

Um fato que impulsionou esses estudos foi o surgimento dos veículos híbridos e os 100% elétricos, puxando a independência dos combustíveis fósseis, visando a diminuição da poluição e alavancando a corrida por materiais e processos alternativos. Os principais componentes que constituem a maioria dos motores elétricos são os núcleos, construídos com materiais magnéticos macios, chamados de rotor e estator [2].

Materiais magnéticos macios são ligas constituídas por ferro como material base e um material dielétrico, sendo o ferro-silício e o ferro-níquel os mais amplamente utilizados na área da elétrica. Comumente, é aplicado em dispositivos que operam com corrente alternada, incluindo motores elétricos, transformadores e geradores, devido às suas características magnéticas de alta densidade de fluxo magnético, baixa perda de núcleo e elevada permeabilidade [3,4,5].

O rotor e o estator são circundados por enrolamentos acionados por corrente elétrica, estando sujeitos à ação de correntes induzidas, conhecidas como corrente de Foucault, que é responsável pela perda significativa da potência do motor. De forma clássica, o núcleo é formado por chapas laminadas e estampadas, que passam pelo processo de recozimento, para redução das tensões internas que reduzem parcialmente as perdas por correntes parasitas. Essas perdas influenciam diretamente a curva de histerese e aumento de grão também [1,6].

Esforços em desenvolvimento de alternativas em investigação de construção desses núcleos em blocos sólidos únicos estão sendo realizados em ritmo acelerado, utilizando métodos pela metalurgia do pó (M/P) estimulados pelos avanços tecnológicos, tendo como características principais desejáveis para tais materiais, baixas perdas por histerese e alta resistividade elétrica. Além disso, esses motores também devem exibir alta indução de saturação e permeabilidade magnética, bem como, ductilidade suficiente para suportar esforços mecânicos e a vibração de núcleos de máquinas elétricas [6].

Utilizando a metalurgia do pó (M/P), que une as técnicas e a caracterização de materiais que têm sido realizadas em pesquisas no desenvolvimento, utilizando materiais magnéticos macios em forma de pós metálicos, visando a substituir as tradicionais chapas laminadas por núcleo sólido, sendo que utilizando a M/P obtêm-se diversas vantagens em propriedades físicas, como isotropia magnética e térmica, baixas perdas de correntes parasitas, quando alimentadas por corrente elétrica de alta frequência, perdas de histerese relativamente, baixas quando alimentadas por corrente elétrica de baixa frequência, alta resistividade elétrica, baixa coercitividade e redução do tamanho do rotor das máquinas e *design*, de acordo com os requisitos do projeto da máquina [5,6].

O desafio de construir um núcleo sólido está em isolar ou revestir as partículas de ferro, evitando as perdas por correntes parasitas e por magnetização do núcleo, quando aplicado em altas frequências [7]. Diversos materiais, de origem orgânica e inorgânica, estão sendo estudados para o revestimento das partículas de ferro, visando a diminuição destas perdas de núcleo, tais como, resinas fenólicas, que são tipicamente termoendurecíveis, e microencapsulados, que consiste em revestimento das partículas por algum material isolante elétrico, como polímero ou óxido [6,7]. Há exemplos de materiais magnéticos macios em forma de compósito magnético macio (SMC) que estão comercialmente disponíveis, como o Somaloy, da empresa Hogan [8].

O objetivo deste trabalho é desenvolver (projeto, construção e testes) de um servomotor síncrono de oito polos, com potência de até 400 W, trifásico, de corrente alternada, com núcleo do rotor e estator obtidos a partir da liga Fe2%P sinterizada e ímãs permanentes de Nd-Fe-B, a ser utilizada, sendo a máquina a ser desenvolvida constituída de chapas laminadas de aço baixo carbono.

Pesquisas realizadas anteriormente, pelo Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e pelo Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos da Oficina Tecnológica da Universidade Feevale (LMPMM/Feevale), demonstram que a utilização do Fe2%P têm apresentado resultados satisfatórios, como resistência elétrica e estabilidade térmica [9,10].

O servomotor a ser projetado foi montado e testado em bancada, como gerador, a partir de outro motor como máquina primária, acionado por um inversor trifásico, para avaliação das perdas totais no servomotor. A monitoração de velocidade e posição angular foi realizada a partir de um encoder óptico.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A motivação desta pesquisa se dá pelo fato de os motores elétricos serem constituídos de seu núcleo de rotor e estator de pacotes de chapas de aço de baixo carbono, que passam por etapas de processos de fabricação visando a diminuição das perdas por correntes induzidas e efeitos de histerese no núcleo, sendo que a área de motores elétricos está em constante crescimento, fortemente embalado pelo surgimento e pelo avanço de energias alternativas.

Visando a redução de custos e atender às inovações de um mercado cada vez mais competitivo, demanda o desenvolvimento de novos empregos de meios de fabricação, que visem o baixo custo de produção e de insumos e que atendam ou melhorem os requisitos do projeto da máquina.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de núcleos para rotor e estator de um servomotor síncrono de potência de até 400 W, trifásico, de corrente alternada, com núcleo do rotor e estator constituído de bloco maciço, a partir da liga sinterizada Fe<sub>2</sub>P, obtida via fabricação por M/P, e com ímãs permanentes de Nd-Fe-B.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- estudar as propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas da liga Fe<sub>2</sub>P;
- construir um gerador funcional com núcleos de Fe<sub>2</sub>P e testar seu funcionamento;
- construir uma bancada para testes de motores e geradores até 400 W;
- analisar os resultados do teste do servomotor.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, demonstram-se os tópicos de cada tema importante deste trabalho na literatura, visando o entendimento e a compreensão que se busca neste trabalho. Os assuntos demonstrados aqui abrangem a área de materiais magnéticos, destacando suas propriedades magnéticas e mecânicas, seu emprego na área elétrica e sua obtenção através do processo de metalurgia do pó convencional, visando à utilização em núcleo de servomotores.

### 2.2 SERVOMOTORES

Servomotores, ou máquinas síncronas, nada mais são que um motor elétrico cuja diferença se dá por apresentar controle de rotação suave e uniforme em todas as velocidades, com ampla faixa de rotação, com torque constante e precisão de posicionamento, que torna vantagem referente a outros motores elétricos e, por estes motivos, vêm sendo muito utilizado em controle de projetos de automação industrial [11,12,13].

O dispositivo de controle, chamado encoder, é o responsável por converter movimentos angulares ou lineares em informações que possam ser entendidas, como velocidade, posição e distâncias, entre outras, e um controlador que alimenta as informações ao motor, sendo este dispositivo que difere dos motores convencionais [11,12,13].

Este tipo de motor, no passado, era utilizado em projetos especiais, devido ao seu custo, que era considerado alto na época. No entanto, atualmente, seu custo vem reduzindo, tornando uma excelente opção para a substituição dos acionamentos com motores convencionais, atuadores hidráulicos, pneumáticos, robótica, máquinas, ferramentas, etc. [11,12].

Sua característica construtiva é composta por uma parte fixa (o estator) e outra móvel (rotor). O estator é bobinado como no motor elétrico convencional, porém, apesar de utilizar alimentação trifásica, não pode ser ligado diretamente à rede, pois utiliza uma bobinagem especialmente confeccionada para proporcionar alta dinâmica ao sistema. O rotor é composto por ímãs permanentes, dispostos linearmente sobre o mesmo, e com um gerador de sinais, chamado resolver, instalado, para fornecer sinais de velocidade e posição. [12,13,14,15].

A aplicação do servomotor depende de cada situação de trabalho, como dinâmica, torque aplicado, capacidade de carga, velocidade, manutenção, ciclos de trabalhos, entre outros. [12,13,14,15].

Na Figura 1, é demonstrado um servomotor, apresentando seus principais componentes.

Figura 1 - Componentes principais de um servomotor.



Fonte: Retirado de <https://www.citisystems.com.br/servo-motor/> [16].

Atualmente, os servomotores podem ser divididos em duas categorias: os que operam em condição de corrente contínua (CC) e os de corrente alternada (CA), sendo os de corrente alternada, os motores síncronos, os de indução e de motor de passo, sendo este último mais empregado em aplicações menores, podendo os servomotores se apresentar com escovas ou sem escovas (este último chamado de *brushless*) [12,13,14,15].

Os servomotores de CC, sendo os pioneiros dos servomotores, antes do desenvolvimento da eletrônica de potência e dos ímãs permanentes, possuíam um conjunto de coletor e escovas, tendo um controle simples, apresentavam boa precisão para a época. Com a evolução da eletrônica de potência e dos ímãs permanentes, surgiram os servomotores síncronos de corrente alternada, com ímãs permanentes em seu rotor, vindo a substituir os de corrente contínua da época, pois apresentavam um menor volume, com uma mesma potência, custo baixo de manutenção e maior precisão [12,13].

Os servomotores de corrente contínua sem escovas (*brushless*), que surgiram junto com os servomotores de ímãs permanentes, não apresentam o conjunto coletor de escovas, tendo custo baixo e baixa precisão em relação aos de corrente alternada com ímãs permanentes, sendo aplicados para alguns tipos de trabalhos que não requerem grandes precisões [11,12].

Os servomotores de passo são utilizados em aplicações que requerem movimentos intermitentes e incrementais, onde o movimento do motor é caracterizado por passos discretos [11,12].

Atualmente, os servomotores de ímãs permanentes ganham cada vez mais espaço no mercado, uma vez que apresentam vantagens em relação aos servomotores de indução, tais como:

- baixa inércia, devido a não apresentar rotor em gaiola, o que possibilita uma resposta mais rápida para um dado de entrada;
- maior eficiência, devido à ausência de perda de joule no rotor;
- os motores de ímãs permanentes não possuem correntes de magnetização, o que, por sua vez, faz com que estes necessitem de inversores de potência de menor tamanho e peso [11,12,13].

Conforme mencionado anteriormente, uma das características do servomotor é desempenhar a função de precisão, comportando, em seu sistema, um mecanismo eletrônico que permita a detecção da posição do seu rotor. Assim, os dados relativos à posição do rotor são enviados para um sistema de controle, que saberá qual decisão tomar, isto é, injetar mais corrente, diminuir a corrente, entre outras ações de controle, de modo a garantir um torque constante para uma ampla gama de velocidades. Salienta-se que o mercado para motores com ímãs permanentes, com velocidades variáveis, está aumentando. Em geral, o núcleo do rotor deste tipo de motor é construído com chapas de aço laminadas e os ímãs são fixados neste núcleo [12,13,14,15].

### 2.3 SERVOMOTORES SÍNCRONOS COM ÍMÃS PERMANENTES

Os servomotores síncronos com ímãs permanentes são constituídos por um pacote de chapas magnéticas isoladas entre si, possuindo ranhuras que alojam os enrolamentos trifásicos (normalmente de cobre, podendo também ser de alumínio) [12,13,14,15].

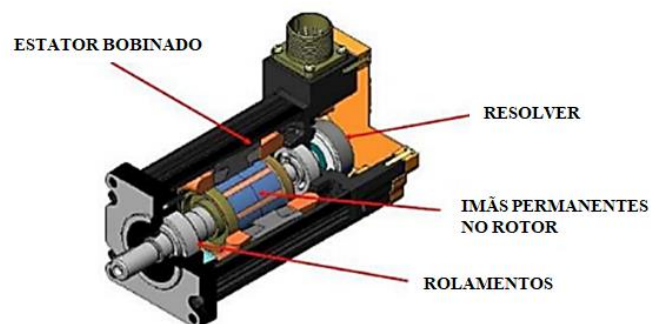
O seu rotor é constituído por um pacote de chapas magnéticas e, na sua superfície, são alojados os ímãs permanentes de alto produto energético, que substituem o enrolamento de campo, não possuindo escovas ou fonte de tensão, resultando em uma construção mais simples, aumentando o rendimento e com melhor relação torque/volume. Os ímãs são construídos normalmente de neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B) e, geralmente, são montados tangencialmente na superfície dos polos do rotor [12,13,14,15].

Os servomotores com ímãs permanentes podem dispor de duas configurações de montagem dos ímãs no rotor. O primeiro com o ímã posicionado na superfície, sendo esta configuração inadequada para operação onde se exige elevadas velocidades, pois existe a

possibilidade de os ímãs se soltarem. Apesar desse fato, ainda é a configuração mais utilizada, pois apresenta o alinhamento do ímã com o dente do estator, resultando em baixo momento de inércia e relutância magnética muito baixa. A segunda configuração, com os ímãs montados no interior do rotor, é muito utilizada em operações onde se exigem elevadas velocidades, tendo como característica a diferença elevada de relutância que apresenta, pois o fluxo magnético criado pelos ímãs tem que atravessar uma grande quantidade de chapas [12,13,14,15].

A Figura 2 mostra um servomotor em corte, apresentando os componentes básicos e, principalmente, demonstrando a disposição dos ímãs permanentes; já a Figura 3, apresenta um grupo de servomotores *brushless*, onde demonstra o rotor com enrolamento de campo e o rotor com ímãs permanentes montados. Esta configuração de motor possui um sensor de velocidade e de posição montado no eixo do rotor. Diversas técnicas de configuração podem ser usadas para sensoriar a posição do eixo, incluindo dispositivos de efeito *hall*, *leds*, fototransistores (encoder óptico) e sensores indutivos [12,13].

Figura 2 - Ilustração de um servomotor em corte.



Fonte: Retirado de Servoacionamentos, WEG [11].

Figura 3 - Vista de três tipos de servomotores com ímã permanente montado no rotor.



Fonte: Retirado de <https://www.citisystems.com.br/servo-motor/> [16].



## 2.4 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

### 2.4.1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo o estudo apropriado das máquinas elétricas, iniciando pela compreensão das principais grandezas físicas relacionadas com o eletromagnetismo, bem como, um estudo dos fundamentos do magnetismo, das propriedades magnéticas e das principais unidades de medidas do magnetismo, de interesse para a caracterização de materiais magnéticos. Realizando a relação das propriedades magnéticas e a curva de histerese, como a retentividade, a coercitividade, a permeabilidade magnética relativa e a indução de saturação, sendo necessárias para esclarecer, por exemplo, as diferenças entre as unidades de campo magnético, indução magnética e fluxo magnético [17].

Portanto, a seguir, é apresentada uma breve revisão sobre as grandezas eletromagnéticas mais importantes.

### 2.4.2 Fundamentos do magnetismo

O magnetismo é o fenômeno associado às forças produzidas entre circuitos em que há uma corrente elétrica [18]. Um exemplo clássico que se conhece sobre magnetismo são os ímãs, onde sempre se sente as suas forças de atração e repulsão entre eles. Estas forças são fenômenos que acontecem devido às cargas elétricas que estão em movimento e localizam-se em regiões nas extremidades, chamados polos. Os polos sempre ocorrem em pares em corpos magnetizados, sendo impossível separá-los. Se um ímã é cortado ao meio transversalmente, novos polos aparecem na superfície que foi cortada. [18].

Analisando uma porção microscópica de material magnético, se encontraria pequenas correntes, elétrons, orbitando em volta dos núcleos e elétrons, cada um girando pelo seu próprio eixo. Alguns dos elétrons giram em direção positiva e outros em posição negativa. Em virtude do pequeno tamanho dessas espirais de corrente elétrica, trata-se elas como dipolos magnéticos [18,19].

### 2.4.3 Campo magnético [ $H$ ]

Uma carga elétrica estática produz um campo elétrico, que, de acordo com a lei de Ampère, uma carga elétrica em movimento ou corrente elétrica produz, além deste campo elétrico, um campo magnético ( $H$ ) [17].

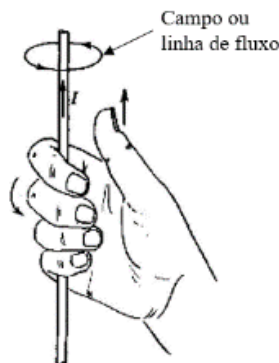
$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \int_s J ds = I \quad (1)$$

Onde:

- $H$  = campo magnético [A/m];
- $L_{inf}$  = comprimento infinitesimal [m];
- $J$  = densidade de corrente [A/m<sup>2</sup>];
- $S$  = elemento infinitesimal de superfície [m<sup>2</sup>];
- $I$  = corrente elétrica [A].

A integral de linha do campo magnético ( $H$ ) ao longo do caminho fechado é igual à corrente no fio, quando os caminhos envolvem o fio, conforme demonstrado na Figura 4. O sentido do campo magnético também pode ser dado pela regra do saca-rolha (mão direita), onde o polegar aponta na direção da corrente e os outros dedos na direção do campo magnético [17].

Figura 4 - Regra da mão direita para o campo magnético, a partir de corrente elétrica.



Fonte: Retirado de KRAUS, J.D.; CARVER, K.R. 1973, 343 p. [17].

No sistema internacional de unidades MKS (metro-kilograma-segundo), o campo magnético é expresso em ampère/metro [A/m]; já no sistema CGS (centímetro-grama-segundo), o campo magnético é expresso em Oersted [Oe] tal que [18]:

$$0,01256 \text{ Oe} = 1 \text{ A/m} \quad (2)$$

#### 2.4.4 Densidade de fluxo (ou indução) magnética [ $B$ ]

Densidade de fluxo (ou indução) magnética é a quantidade máxima de linhas de força (provenientes do campo magnético) que atravessam a superfície de um material. No caso de um ímã, a densidade máxima será junto aos polos, diminuindo ao se afastar destes [19,20].

Um campo magnético ( $H$ ) induz linhas de fluxo magnético ou indução magnética ( $B$ ), que se relacionam através da permeabilidade magnética do meio ( $\mu$ ) tal que [19,20]:

$$B = \mu \cdot H \quad (3)$$

Onde:

- $B$  = indução magnética [T] ou [Wb/m<sup>2</sup>];
- $\mu$  = permeabilidade magnética do meio [H/m];
- $H$  = campo magnético [A/m].

No sistema CGS  $B$ , é expresso por Gauss [G] tal que:

$$1 T = 10^4 G \quad (4)$$

Para a maioria dos materiais, indução magnética ( $B$ ) e campo magnético ( $H$ ) têm a mesma direção e sentido (meios isotrópicos), e a permeabilidade magnética do meio ( $\mu$ ) é um escalar (número real). Em alguns cristais, a indução magnética ( $B$ ) pode não ter a mesma direção do campo magnético ( $H$ ) (meios anisotrópicos) e a permeabilidade magnética do meio ( $\mu$ ) é um tensor (matriz) [20].

#### 2.4.5 Fluxo magnético total [ $\varphi$ ]

Para uma indução magnética ( $B$ ) uniforme e uma superfície plana, o fluxo magnético total ( $\varphi$ ) é perpendicular à superfície e pode ser escrito conforme a Equação 5 [20]:

$$\varphi = B \times A \quad (5)$$

Onde:

- $\varphi$  = fluxo magnético total [Wb];
- $A$  = área da seção transversal [m<sup>2</sup>];
- $B$  = indução magnética [T].

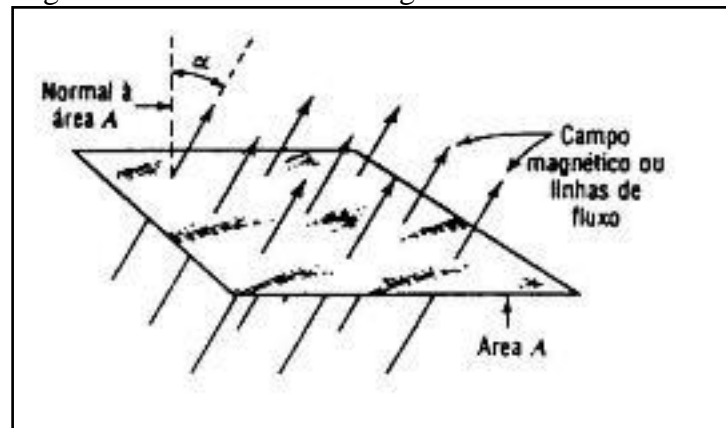
Quando as linhas de indução magnética não são perpendiculares à área  $A$  (Figura 5), a Equação 6 torna-se [17]:

$$\varphi = BA \cdot \cos\alpha \quad (6)$$

Onde:

- $\alpha$  = o ângulo entre a perpendicular a área  $A$  e a direção da indução magnética ( $B$ ).

Figura 5 - Linhas de fluxo magnético através da área A.



Fonte: Retirado de KRAUS, J.D.; CARVER, K.R. 1973, 343 p. [17].

Se B não for uniforme sobre uma área, a Equação 6 se generaliza de tal forma que [17]:

$$\varphi = \iint B \cdot \cos\alpha \cdot ds \quad (7)$$

#### 2.4.6 Permeabilidade magnética relativa [ $\mu_r$ ]

A permeabilidade magnética relativa é uma grandeza magnética, que representa (quantifica) o valor de fluxo magnético no interior do material, ou seja, a capacidade de magnetização dos materiais, sendo a permeabilidade representada pela letra  $\mu$ . Cada tipo de material tem um valor característico, sendo dada intensidade de corrente, é produzido de duas mil a seis mil vezes mais fluxo em um pedaço de aço do que no respectivo volume de ar, sendo o ar bem baixo, cerca de 0,00, onde a permeabilidade do ar é essencialmente a mesma permeabilidade do vácuo. Obviamente, os metais de um núcleo de um motor desempenham um papel extremamente importante no incremento e na concentração do fluxo magnético no dispositivo [18].

A permeabilidade magnética do meio é representada pela Equação 8 [20]:

$$\mu = \mu_r \times \mu_o \quad (8)$$

Onde:

- $\mu$  = permeabilidade magnética do meio [H/m];
- $\mu_r$  = permeabilidade magnética relativa [adimensional];
- $\mu_o$  = permeabilidade magnética do vácuo [ $4\pi \times 10^{-7}$  H/m].

A Tabela 1 relaciona alguns materiais com suas respectivas permeabilidades relativas. Deve-se salientar que a permeabilidade magnética relativa não é constante para alguns materiais, principalmente os ferromagnéticos e, neste caso, a tabela apresenta os valores máximos [17,20].

Tabela 1 - Permeabilidade magnética relativa de alguns materiais.

Material	Grupo	Permeabilidade relativa ( $\mu_r$ )
Bismuto	Diamagnético	0,99983
Prata	Diamagnético	0,99998
Cobre	Diamagnético	0,999991
Água	Diamagnético	0,999991
Vácuo	Não-magnético	1
Ar	Paramagnético	1,0000004
Alumínio	Paramagnético	1,00002
Paládio	Paramagnético	1,0008
Pó de Permalloy 2-81	Ferromagnético	$1,3 \times 10^2$
Cobalto	Ferromagnético	$2,5 \times 10^2$
Níquel	Ferromagnético	$6,0 \times 10^2$
Ferroxcube 3	Ferromagnético	$1,5 \times 10^3$
Aço baixo carbono	Ferromagnético	$2,0 \times 10^3$
Ferro (0,2% de impurezas)	Ferromagnético	$5,0 \times 10^3$
Permalloy 78	Ferromagnético	$1,0 \times 10^5$
Supermalloy	Ferromagnético	$1,0 \times 10^6$

Fonte: Kraus et tal [17].

A partir da Tabela 1, é possível concluir: [17,20]:

- permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) para materiais diamagnéticos  $\Rightarrow$  ligeiramente menor que 1;
- permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) para materiais paramagnéticos  $\Rightarrow$  ligeiramente maior que 1;
- permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) para materiais ferromagnéticos  $\Rightarrow$  muito maior que 1.

Outros tipos de materiais são classificados como “antiferromagnético”, “ferrimagnético” e “superparamagnético”. Um exemplo de material antiferromagnético é o óxido de ferro. A ferrita macia é um material ferrimagnético, enquanto a fita magnética é um material superparamagnético [17].

#### 2.4.7 Coercitividade [ $H_c$ ]

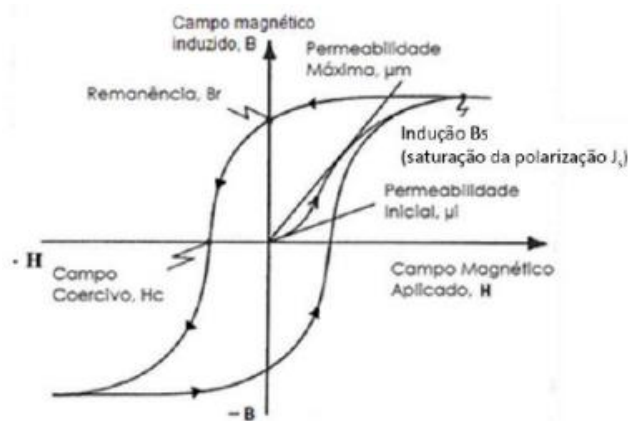
A coercitividade de um campo magnético é a intensidade, ou a energia, necessária para reduzir (do ponto de saturação) a magnetização de um objeto para zero. Essencialmente, ele mede a resistência de um material magnético à desmagnetização. A coercitividade do material magnético é medida em ampere/metro [A/m], onde, quanto maior o número, maior é a resistência do ímã para a desmagnetização [19,21].

Materiais magnéticos duros têm alta coercitividade, ou seja, mesmo aumentando o campo magnético contrário, as linhas de domínio (*spins*) continuam na posição original. Já os materiais magnéticos macios, têm valor coercitivo mais baixo e, por isso, podem ser usados em aplicações de tensão alternada, como motores, mas ainda tem certo valor magnético remanescente. A força coercitiva pode vir como qualidade do material, em que verifica se o material tem maior ou menor coercitividade [18].

## 2.5 CURVA DE HISTERESE

A curva de histerese, como pode ser visto na Figura 6, é o resultado do comportamento da magnetização quando um material (por exemplo, cilíndrico) for circundado por uma bobina (fio enrolado com várias voltas). Ao circular por esta bobina uma corrente elétrica ( $I$ ), um campo magnético ( $H$ ) será gerado no interior desta bobina e a peça irá sofrer uma indução magnética ( $B$ ). O material magnetizado aumenta até a sua saturação e, em seguida, é reduzido, a densidade magnética ( $B$ ) não acompanha a redução do fluxo de magnetização ( $H$ ). Sendo assim, quando o campo magnético ( $H$ ) chegar a zero, ainda existirá uma densidade magnética remanescente no material ( $B_r$ ) (remanescência ou remanência) [21].

Figura 6 - Curva de histerese  $B \times H$  para materiais magnéticos.



Fonte: Retirado de SKARRIE, H. 2001. 161 p. [21].

Os domínios permanecem nas direções perto do campo aplicado  $B_r$ . Para anular, é necessário aplicar, no material, um campo magnético de polaridade oposta ao causador da remanescência inicial (força coercitiva). Aumentando o campo  $-H$  contrário, a remanescência positiva,  $B_{r+}$  vai até zero, mas o material se magnetiza com polaridade oposta se continua a aumentar  $H$ , com densidade  $-B$ . Se atingida a saturação, há uma remanescência negativa. Se houver remanescência negativa, para eliminá-la, o processo é o mesmo, sendo preciso aplicar um campo magnético  $H$  positivo até zerá-la [19,20,21].

O fato importante em que, enquanto aplica o campo para anular a remanescência, a densidade correspondente a esse fluxo ainda não existe, porque a remanescência provoca um atraso na densidade magnética. A este atraso entre  $H$  e  $B$  é designando de histerese magnética [19,20].

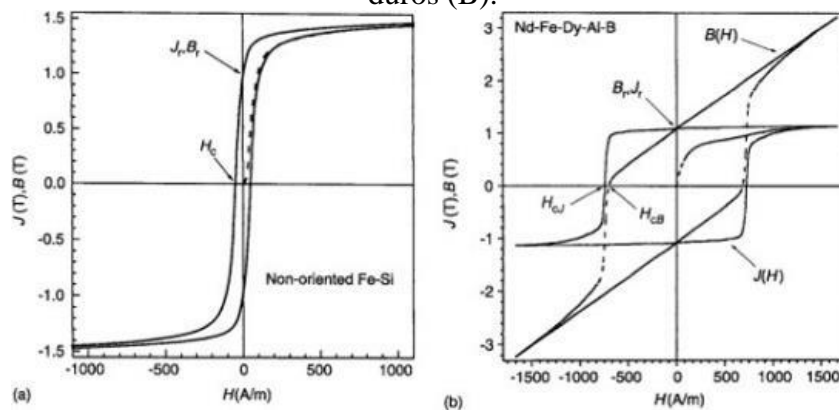
O ponto em que a curva corta o eixo de  $B$  no quadrante superior esquerdo é denominado de magnetismo remanente ou retentividade ( $B_r$ ) (quando o material foi saturado) e representa a indução magnética residual que permanece no espécime, mesmo após a sua retirada de dentro da bobina, ou seja, sem campo magnético aplicado ( $H = 0$ ) [21].

O ponto em que a curva corta o eixo de  $H$  no mesmo quadrante é denominado de força coercitiva ou coercitividade ( $H_c$ ) (quando o material foi saturado) e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime ( $B = 0$ ). Outro fator importante, na identificação dos materiais magnéticos, é o produto energético ( $BH_{\max}$ ), que está associado com a densidade de energia armazenada no material [21].

Se o material do qual foi obtida a peça for diamagnética ou paramagnética, pouca linha de fluxo magnética será induzida e a relação  $B \times H$  será mais ou menos linear. Se o material for ferromagnético, muitas linhas de fluxo serão induzidas (fenômeno de magnetização) e a relação  $B \times H$  será uma curva, Figura 6, que esta apresenta uma histerese sendo, portanto, denominada de curva de histerese ou ciclo de histerese. Estes materiais também são conhecidos como materiais magnéticos [21].

A Figura 7 demonstra duas curvas de histerese, um com curva estreita para materiais magnéticos moles (A) (geralmente para materiais ferromagnéticos), que pode ser de Fe-Si, e outra com curva larga para material magnético duro (B) (geralmente para materiais ferrimagnéticos), que pode ser representado como ímã permanente [22].

Figura 7 - Exemplos de curvas de histerese em materiais magnéticos moles (A) e magnéticos duros (B).

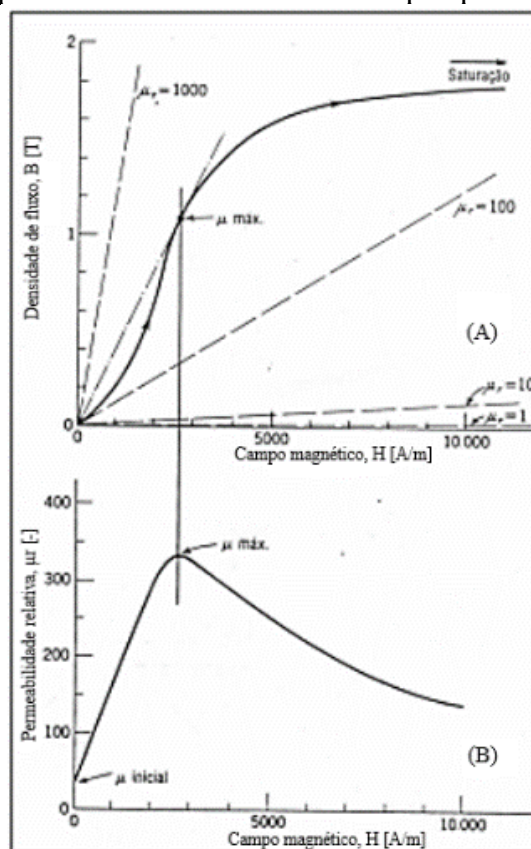


Fonte: Retirado de FIORILLO, F. 2004. 666 p. [22].

## 2.6 MAGNETIZAÇÃO

A Figura 8-(A) mostra uma curva típica de um material magnético, para fins de comparação, com quatro linhas tracejadas, correspondendo às permeabilidades relativas constantes ( $\mu_r$ ) de 1, 10, 100 e 1000. A Figura 8-(B) demonstra um gráfico de permeabilidade relativa como função do campo magnético  $H$  aplicado. A permeabilidade relativa máxima está no ponto da curva de magnetização, onde a relação  $B$  e  $H$  é máxima, sendo designada por  $\mu_{\max}$  [17].

Figura 8 - (A) Curva de magnetização típica - (B) Relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado.

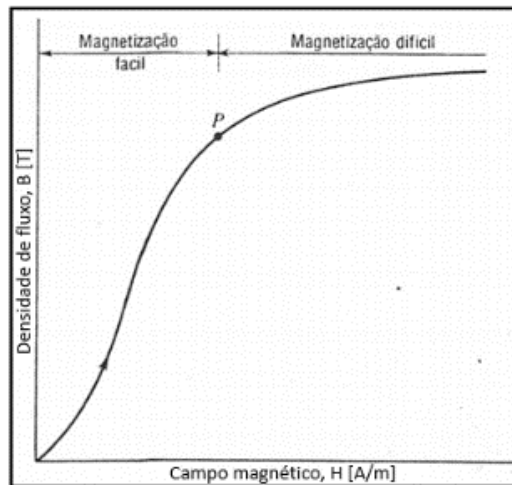


Fonte: Retirado de KRAUS, J.D.; CARVER, K.R. 1973, 343 p. [17].

Quando  $H$  é aumentado, o valor de  $B$  aumenta rapidamente a princípio e, depois, mais lentamente. Nos valores suficientes altos de  $H$ , a curva tende a ficar assintótica. Esta condição é chamada de *saturação magnética*. Assim, a curva de magnetização inicial pode ser dividida em duas seções: a seção íngreme e a seção plana, estando o ponto P no lugar superior da parte íngreme, conforme mostra a Figura 9. A seção íngreme corresponde à condição de *magnetização fácil*, enquanto a seção plana corresponde à condição de *magnetização difícil* [19,21,22].



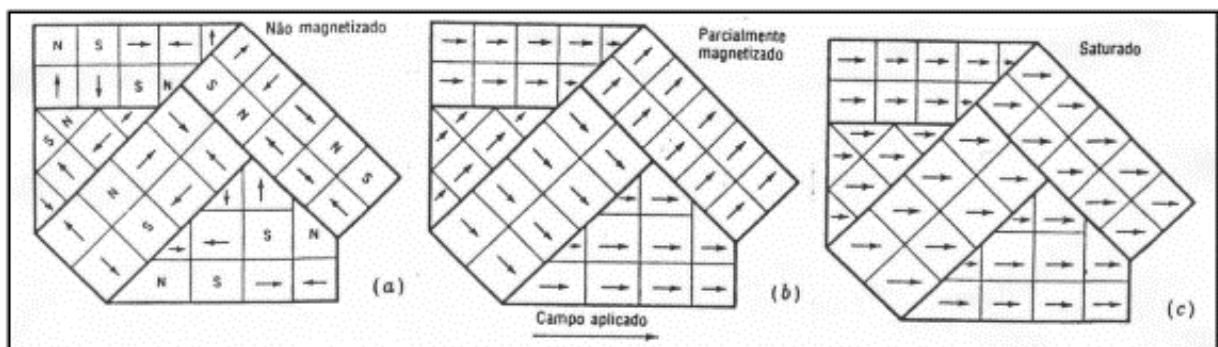
Figura 9 - Regiões de magnetização fácil e difícil da curva de magnetização inicial.



Fonte: Retirado de KRAUS, J.D.; CARVER, K.R. 1973, 343 p. [17]

Para entender o fenômeno da magnetização, é possível considerar um fragmento de um material magnético. Este fragmento, geralmente, não consiste em um único cristal ou grão, mas de agregados de grãos, que, por sua vez, se dividem nos domínios magnéticos, de acordo com a Figura 10-(A). Os domínios se orientam de tal forma que a energia seja mínima, ou seja, os domínios adjacentes estão com polaridade contrária, diminuindo a energia no campo magnético, e a magnetização total é nula. Com a aplicação de um campo magnético  $H$ , Figura 10-(B), alguns domínios, com polaridades opostas ou perpendiculares ao campo aplicado, tornam-se instáveis e giram rapidamente para outro sentido de fácil magnetização, na mesma direção do campo ou bem próximo a este. Aumentando-se mais o campo aplicado, Figura 10-(C), todos os domínios alinham-se na direção do campo. Entretanto, este aumento de magnetização é mais difícil e podem ser necessários campos muito fortes para a saturação [17,19,21,22].

Figura 10 - Estágios sucessivos de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo.



Fonte: Retirado de KRAUS, J.D.; CARVER, K.R. 1973, 343 p. [17]

## 2.7 MATERIAIS MAGNÉTICOS

Os ímãs são separados como isotrópicos e anisotrópicos, o que diferem se diz à direção de magnetização preferente de um determinado ímã, sendo que os ímãs anisotrópicos apresentam comportamento de magnetização em apenas um sentido predeterminado para magnetização. Alguns exemplos de ímãs anisotrópicos são os de ferritas (cerâmicos), os de alumínio-níquel-cobalto (AlNiCo) e os de neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B) [18].

Os ímãs isotrópicos possuem propriedades iguais em todas as direções, isto é, não possuem um padrão de direção magnética preferente. Neste tipo de ímã, as propriedades não estão dependentes da sua orientação e as partículas não se encontram causalmente ordenadas. Alguns exemplos de ímãs isotrópicos são os polímeros, materiais cerâmicos, metais (na maioria), líquidos, etc. [24,30].

Os materiais magnéticos são classificados em dois grupos, sendo materiais duros e moles. De maneira resumida, os materiais magnéticos duros são caracterizados pela retenção de uma grande quantidade de magnetismo residual após a exposição a um forte campo. Estes materiais tipicamente têm força de coercitividade,  $H_c$ , valores de várias centenas a vários milhares de Oersteds ( $O_e$ ) e são considerados ímãs permanentes. Já os materiais magnéticos moles, tornam-se magnetizados por campos magnéticos de baixa resistência e, quando o campo aplicado é removido, a desmagnetização retorna a um estado de magnetismo relativamente baixo [23].

### 2.7.1 Materiais magnéticos duros (ímãs permanentes)

Ímãs permanentes são classificados como materiais magnéticos duros, que contêm diversas qualidades, como força do campo magnético ou remanência, que podem manter as suas propriedades magnéticas por muito tempo. No entanto, para perder a sua carga, necessitam de uma descarga elétrica forte, um impacto de grande magnitude ou a aplicação de elevada temperatura. Neste último caso, seu magnetismo é cessado temporariamente, sendo necessária a aplicação de resfriamento para readquirir suas propriedades magnéticas [18,19].

O produto energético máximo de um ímã é medido em “Mega-Gauss Oersteds” ( $MGO_e$ ), sendo este o principal indicador de força de um ímã. Em geral, quanto maior o valor máximo de energia do produto, maior é o campo magnético que o ímã vai gerar para uma determinada aplicação. Na classificação de neodímio, os dois números de uma grade (por exemplo, N42) representam o produto energético máximo para essa categoria. Quanto maior

for o valor, maior é a força do campo magnético do ímã e menor será o volume necessário de ímã. [19,20].

Os principais ímãs comercializados, atualmente, são os de ferritas (cerâmicos), os de alumínio-níquel-cobalto (AlNiCo), e os mais recentes são os de terras raras, como o samário-cobalto (Sm-Co) e o neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B), sendo estes os mais poderosos ímãs produzidos atualmente [18,22,24].

Os ímãs são obtidos, na sua grande maioria, por M/P, com exceção do AlNiCo, que se obtém tanto por processo de fundição, ou M/P, que, além de oferecer as vantagens típicas associadas a este processo, permite obter características únicas de desempenho, como, por exemplo, a orientação magnética, muito utilizada nos ímãs. [18,25]. No entanto, para as fabricações de ímãs do tipo terras raras, é empregada a tecnologia "*Mechanical Alloying*", na qual se utilizam moinhos de alta energia para a fabricação de ligas de pós, que são consolidadas através dos processos convencionais da M/P, ou seja, compactação e sinterização [18,24].

Os ímãs obtidos por M/P, além de passarem pelas etapas convencionais, acrescenta-se o processo de magnetização, onde as peças a serem magnetizadas são colocadas em circuitos magnéticos, compostos por bobinas, nas quais circulam correntes elevadas, podendo atingir até milhares de amperes. Tais correntes são fornecidas por fontes de tensão contínua, sendo a mais conhecida, a descarga capacitiva [18,24].

Os ímãs são empregados na construção de dispositivos ou equipamentos onde é necessário um fluxo magnético constante e contínuo, do qual se originam forças de atração/repulsão ou torque, como microfones, alto falantes, motores elétricos, equipamentos de medição, entre outros. Para os motores elétricos, os principais ímãs utilizados são as ferritas e o neodímio-ferro-boro [18].

### **2.7.2 Materiais magnéticos macios (não permanentes)**

Os materiais magnéticos macios possuem dois ou mais elementos em sua composição, sendo o ferro como material base, além de um material dielétrico [5].

As ligas de aço para máquinas elétricas são um dos materiais magnéticos macios mais utilizados em geral, com exceção de algumas ligas de aço inox, que são paramagnéticos e apresentam a mesma permeabilidade magnética relativa do vácuo. Em geral, estes aços são utilizados na construção de motores, geradores e transformadores, como núcleo de bobinas alimentadas com corrente alternada, o que induz correntes parasitas, causando apreciável perda.

Por este motivo, rotores e estatores de motores, bem como núcleos de transformadores, são construídos com chapas de aço ferromagnético laminadas, justapostas e isoladas, para restringir o fluxo de correntes parasitas e reduzir as perdas, aumentando a resistividade [1,5,22]. Os materiais mais utilizados para núcleos de máquinas elétricas são o aço baixo carbono, o aço-silício não orientado e o aço-silício orientado [3,4,21].

**Aço baixo carbono:** este tipo de aço, com aproximadamente 0,05% de carbono, foi originalmente utilizado como material para a construção de núcleos para transformadores, motores e geradores, mas é limitado, hoje, principalmente para núcleos de pequenos motores. O aço baixo carbono laminado tem uma permeabilidade magnética relativa máxima de 5.000 a 10.000 e pode ser considerado como ferro com impurezas. Tratamentos para purificação podem levar a uma melhora na permeabilidade. A purificação do ferro é realizada por fusão a vácuo e recozimento em atmosfera de hidrogênio próximo de 1.300 °C, para remover o carbono, o nitrogênio e o oxigênio. Apesar da alta permeabilidade magnética, o ferro “puro” não é utilizado comercialmente, em função do alto custo e da baixa resistividade, o que induz correntes parasitas, aumentando as perdas [18,26].

**Aço-silício com grãos não orientados:** material preferido utilizado para construção de núcleo de transformadores, motores e geradores. A adição de silício ao ferro modifica profundamente as mudanças de fase, uma vez que o conteúdo de carbono é muito pequeno, atualmente estas ligas são conhecidas como ferro-silício. Conforme for a adição de silício ao ferro, resulta no aumento da resistividade elétrica, causando uma redução nas correntes parasitas, a anisotropia cristalina diminui, causando um aumento na permeabilidade e diminuição da indução de saturação [18,26].

**Aço-silício com grãos orientados:** material que é obtido por laminação a frio, com um recozimento intermediário, acrescido de um recozimento final a alta temperatura, produzindo, dessa forma, chapas com melhores propriedades magnéticas, na direção de laminação, que as chapas com laminação a quente. Esta melhora é devido a uma textura magneticamente favorável, produzida por uma recristalização secundária, durante o recozimento a alta temperatura [18,22,26].

**Ligas especiais:** são ligas constituídas principalmente de ferro-níquel, contendo de 50% a 80% de níquel, que formam uma grande diversidade de séries, usualmente denominadas de Permalloys, e são caracterizados principalmente por uma elevada permeabilidade a baixos campos magnéticos, sendo aplicados principalmente em equipamentos de comunicação, como rádios, telefones e televisões. A liga 78 Permalloy possui 78% de Ni e 22% de ferro [5,26].

**Ferritas macias:** são materiais magnéticos que possuem composição  $MO.Fe_2O_3$  onde M é um metal (cátion) divalente, que pode ser Mn, Mg, Zn, Fe, Co ou Ni. São materiais obtidos pelos processos da metalurgia do pó. Alguns aditivos como Ca, Si, Co, Ti, Sn e Li melhoram o desempenho das características magnéticas. As ferritas macias são utilizadas principalmente em núcleos de indutores, os quais são componentes básicos na construção de circuitos de seleção de frequência em equipamentos eletrônicos transmissores e receptores [5,18,22].

## 2.8 PERDAS EM MATERIAIS MAGNÉTICOS NÃO PERMANENTES

Os materiais ferromagnéticos, quando sujeitos a uma magnetização alternada, resultam em perda de energia, que se transforma em calor e que é classificado por unidade de volume. Estas perdas que contribuem para a dissipação do magnetismo no material são classificadas em [5]:

- perdas por histerese;
- perdas por correntes Foucault (também conhecidas por perdas por correntes de parasitas);
- perdas residuais.

A perda total do núcleo de um dispositivo magnético é a soma das perdas por correntes de Foucault e perdas por histerese [5].

### 2.8.1 Perdas residuais

As perdas residuais são aquelas que não são muito compreendidas, sendo uma combinação de relaxamento e ressonantes. Estas perdas são importantes apenas para sistemas em níveis de muito baixa indução e frequências muitas altas e podem ser ignoradas em aplicação de energia [5].

### 2.8.2 Perdas por histerese

As perdas por histerese ocorrem principalmente em materiais magnéticos em forma de núcleo à baixa frequência, sendo que a potência perdida será proporcional à frequência da corrente magnetizante. Por outro lado, a área do ciclo é aproximadamente proporcional ao valor máximo do campo magnético atingido ( $B_m$ ) elevado a uma potência que depende do tipo de material magnético [5].

A perda por histerese para os materiais magnéticos é dada pela Equação 9 [5]:

$$P_h = f \oint H dB \quad (9)$$

Onde:

- $P_h$  = perda por histerese [ $\text{W}/\text{m}^3$ ];
- $f$  = frequência [Hz];
- $H$  = campo magnético [ $\text{A}/\text{m}$ ];
- $B$  = indução magnética [T].

As causas que influenciam a ocorrência de perdas por histerese são devido a impurezas nas partículas de ferro, ocorrência de tensões do processo de fabricação e limites de grãos dentro das partículas, causas essas que originam locais que impedem o movimento da parede do domínio, assim resultando em alta força coercitiva [5].

Dessa forma, para se reduzir a força coercitiva gerada por essas causas, utiliza-se ferro de alta pureza para as partículas e fornece-se um procedimento de tratamento térmico, após a compactação, para alívio de tensões e aumento dos grãos. O procedimento de tratamento térmico após a compactação é o principal passo a ser seguido para reduzir a perda de histerese [5].

### 2.8.3 Perdas por correntes de Foucault (ou correntes parasitas)

As perdas de correntes de Foucault ocorrem devido à baixa resistividade do material (ou relutância no caso dos motores), onde a influência nas perdas no motor e no seu aquecimento (até mesmo operando sem carga) é causada pelo campo alternado, sendo dois efeitos principais, a magnetização incompleta do material (efeito *spins*) e o aumento das perdas no núcleo [5,18,19,21].

Uma baixa resistência possibilita um aumento das correntes parasitas criadas pelo fluxo magnético interno. O aumento dessa resistência é inversamente proporcional às correntes parasitas, que tendem a diminuir, logo o rendimento do motor aumentará. Portanto, quanto maior a resistividade do material, menores serão as correntes induzidas e as perdas por correntes parasitas. É importante ressaltar que materiais ferromagnéticos possuem alta permeabilidade, o que resulta em baixa resistividade magnética [18,19,21].

A perda de corrente de Foucault pode ser expressa pela Equação 10 [5]:

$$P_e = \frac{C B^2 f^2 d^2}{\rho} \quad (10)$$

Onde:

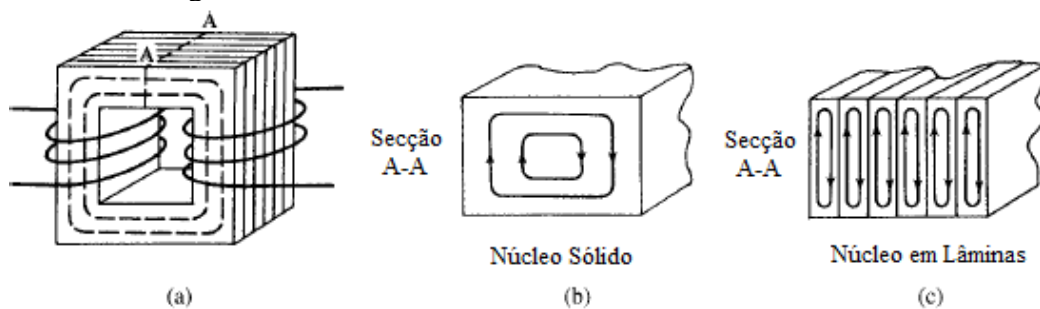
- $P_e$  = perdas por correntes parasitas [ $\text{W}/\text{m}^3$ ];
- $C$  = constante de proporcionalidade [ - ];
- $B$  = indução magnética [T];
- $f$  = frequência [Hz];
- $\rho_e$  = resistividade [ $\Omega \cdot \text{m}$ ];
- $d$  = espessura do material [mm].

De acordo com a lei de indução de Faraday-Lenz, a variação do fluxo magnético, através de um solenoide com  $N$  espirais, induz uma força eletromotriz. Se esta força eletromotriz é induzida em um condutor com resistividade diferente de zero, as correntes elétricas geradas no interior do material dissiparão energia por efeito Joule. Este efeito de perda eletromagnética reduz a eficiência de dispositivos que funcionam em campos magnéticos alternados, como, por exemplo, transformadores e motores elétricos [5,21].

Um fluxo variável no tempo induz uma tensão no interior do núcleo ferromagnético, exatamente do mesmo modo que uma tensão é induzida em um fio que está enrolado em torno desse núcleo, gerando tensões dentro do núcleo, formando correntes circulando, chamadas de correntes de Foucault [18,19].

Para se entender as perdas por correntes de Foucault, é preciso entender a Figura 11-(A), que consiste na ilustração de um transformador, formado de um núcleo retangular de material magnético, com um enrolamento primário em um lado e o outro lado com um enrolamento secundário, aplicando uma corrente no enrolamento primário, dessa forma, magnetizando o núcleo ao longo da linha tracejada. A proporção da tensão de saída para a entrada depende da proporção do número de voltas na bobina secundária para a primária [21].

Figura 11 - Perdas de correntes em um núcleo de um motor.



Fonte: Retirado de CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. 2009. 550 p. [18].

O fluxo induz um campo magnético não só na bobina, mas também, no núcleo do transformador, e se o núcleo está sendo um condutor, então está ocorrendo a perda de corrente por Foucault. Como o fluxo está sendo alimentado na bobina primária, as correntes de Foucault irão circular conforme a Figura 11-(B), secção AA, ou seja, irão circular da direita para a esquerda [18].

Opondo-se ao campo principal, as correntes de Foucault são censuráveis, não só porque diminuem o fluxo, mas também, porque produzem calor, uma perda de energia direta, proporcional a  $I^2R$ , onde  $I$  é a corrente de Foucault e  $R$  a resistência do seu caminho. A principal maneira de diminuir essa perda é fazer o núcleo em chapas laminadas, como na Figura 11-(C), em vez de uma peça sólida. Se estas chapas laminadas são isoladas eletricamente uma da outra, as correntes de Foucault são forçadas a circular dentro de cada chapa. O comprimento do caminho em cada chapa é agora mais curto, diminuindo assim  $R$ , mas a área de seção transversal. Este formato em chapas laminadas é padrão para a construção de núcleos de transformadores, motores e geradores [18].

Além de utilizar chapas laminadas mais finas, outras técnicas podem ser utilizadas para minimizar as perdas por Foucault, como a adição de silício ao ferro ou, a técnica mais recente, que é o isolamento do pó de ferro com outros tipos de materiais, que podem ser inorgânicos ou orgânicos, consistindo em formar uma menor camada. O revestimento isolante de cada partícula fornece caminhos muito pequenos de corrente parasita dentro de uma partícula e uma resistividade relativamente alta do material [5].

## 2.9 METALURGIA DO PÓ

### 2.9.1 Introdução

A metalurgia do pó (M/P) consiste em um conjunto de técnicas e processos para produção de pós dos materiais metálicos e da sua transformação em produtos metalúrgicos consolidados numa massa de pós coerente (metálicos e não metálicos), através da compactação a elevadas pressões, seguida por aquecimento com atmosfera controlada, chamada de sinterização, que, em geral, se dá abaixo do ponto de fusão dos materiais metálicos de base, principais constituintes dos pós, resultando em um produto final com precisão e propriedades desejadas [27,28].



### 2.9.2 Características

A metalurgia do pó se distingue dos demais processos metalúrgicos convencionais pelas seguintes características:

- utilização de pós metálicos e não metálicos;
- ausência de fase líquida ou presença apenas parcial da fase líquida durante o processo de sinterização;
- produção de peças com formas definidas, ou praticamente definitivas, dentro de tolerâncias muito estreitas, geralmente sem necessidade de operação de usinagens posteriores ou de qualquer outro tipo de acabamento;
- produção de componentes com características estruturais e físicas impossíveis de se obter por qualquer outro processo metalúrgico;
- obtenção de peças em grandes séries de produção, tornando o processo altamente competitivo em relação a outros processos de fabricação [27,28,29].

A limitação é a quantidade de peças a serem produzidas; para que o processo seja competitivo com outros processos metalúrgicos, é necessária a fabricação seriada de peças. Outra limitação está relacionada com as dimensões das peças a serem produzidas. Essa limitação está sendo superada pela aplicação de técnicas de compactação isostática, compactação a quente, entre outras. De qualquer forma, à medida que as dimensões das peças aumentam, torna-se necessário o emprego de prensas de compactação de capacidade cada vez maior, resultando em equipamentos que oferecem dificuldades técnicas muito grandes e custo elevado, podendo tornar o processo antieconômico [28,29]. Contudo, já tem sido possível fabricar peças com peso superior a cinco quilogramas, o que demonstra que até mesmo a dificuldade dimensional está sendo ultrapassada [28,29].

### 2.9.3 Formas de obtenção dos materiais magnéticos macios por metalurgia do pó

As propriedades físicas, como, por exemplo, as magnéticas e elétricas dos materiais magnéticos macios obtidos por M/P, são influenciadas por vários fatores, sendo que aqueles considerados de maior importância são comentados a seguir.

A resistividade de um elemento metálico, na maioria dos casos, aumenta quando são adicionadas impurezas, uma vez que estas impurezas provocam distorções no reticulado cristalino. Quanto maiores as imperfeições da rede cristalina, maior a resistividade. Por esta razão, as maiores resistividades em metais são obtidas em ligas compostas de dois ou mais

metais, nas mesmas proporções ou em proporções próximas. Nestas condições, há uma interpenetração das redes cristalina dos metais presentes na liga [30]. Por este motivo, ocorre um aumento da resistividade do ferro sinterizado, quando outros elementos, como o Si, P ou Ni são adicionados [31]. A adição de silício ao ferro, além de aumentar a resistividade elétrica, aumenta também a permeabilidade magnética relativa máxima, diminuindo a coercitividade. Contudo, diminui também a indução de saturação [32].

A maioria dos materiais metálicos ferrosos sinterizados possui resistividade elétrica maior do que os materiais maciços de mesma composição química, devido principalmente à porosidade e à oxidação superficial das partículas. Portanto, é possível aumentar ainda mais a resistência elétrica total de peças metálicas sinterizadas, compactando com pressão menor, o que aumenta a porosidade do material, diminuindo, dessa forma, a densidade. A resistividade das ligas metálicas diminui com o aumento da densidade, independentemente do tipo de metal [20,33]. Com o aumento da porosidade, há uma diminuição da permeabilidade magnética, uma diminuição da indução de saturação e um aumento da coercitividade [20,34,35].

A resistividade elétrica, para a maioria das ligas metálicas, também varia em função do tamanho de grão. Quanto menor o tamanho de grão, maior a quantidade de contornos de grãos, que também provocam distúrbios à rede cristalina, aumentando a resistividade. Entretanto, a diminuição do tamanho de grão causa um decréscimo da permeabilidade magnética e um aumento da coercitividade [36,37].

As impurezas, como carbono, nitrogênio e oxigênio, também afetam as propriedades magnéticas das ligas de ferro sinterizados. Quando o objetivo é a obtenção de materiais magnéticos de boas propriedades, é conveniente que os percentuais destas impurezas sejam mantidos nos níveis máximos de 0,01% de carbono, 0,02% de oxigênio e 0,01% de nitrogênio [32].

O tamanho de partícula de pó é outro fator que afeta as propriedades magnéticas dos materiais ferrosos [34]. Quanto maior é a granulometria das partículas de pó, resulta no aumento da permeabilidade magnética e, também, na coercitividade. Além disso, fatores como tempo, temperatura e aumento da atmosfera de sinterização, também alteram algumas propriedades físicas [38].

Os materiais magnéticos macios obtidos por M/P mais utilizados são as ligas de ferro puro, ferro-fósforo, ferro-silício, ferro-fósforo-silício, ferro-níquel, ferro-cobalto e aços inoxidáveis ferríticos [20, 39, 40].

## 2.10 MÁQUINAS ELÉTRICAS COM NÚCLEOS DO ESTATOR E ROTOR OBTIDOS POR M/P

Materiais magnéticos macios obtidos por M/P composto de ferro e outros elementos, como, por exemplo, níquel, silício, fósforo e cobalto, podem ser utilizados na construção de núcleos magnéticos de dispositivos eletromagnéticos alimentados por corrente alternada. Desta forma, núcleos de estatores e rotores de motores elétricos podem ser construídos em blocos únicos, devendo conferir, aos mesmos, melhores características de desempenho [41 - 48].

Devido à natureza isotrópica dos núcleos magnéticos obtidos a partir da M/P, fatores no projeto, como empacotamento ou empilhamento de chapas laminadas, não são apropriados para a redução das perdas totais. O sucesso da aplicação depende da forma, das peças e das propriedades dos materiais empregados. A produção de núcleos com ligas ferro-silício e ferro-níquel por M/P, na atualidade, é um processo industrial, no qual as propriedades magnéticas são ajustadas por parâmetros do processo bem definidos, como a pressão de compactação, tempo e temperatura de sinterização [50].

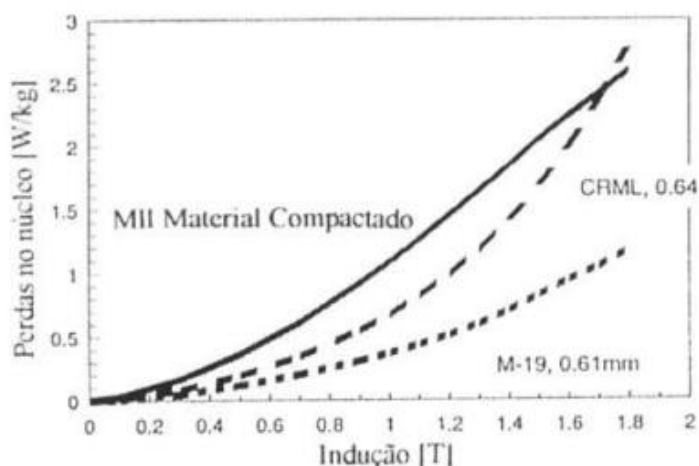
Os processos da M/P permitem o uso de elementos, ligas e sistemas além da esfera dos tradicionais materiais magnéticos macios. Um exemplo é a liga ferro-fósforo, onde, com a adição de 0,8% de fósforo, resulta em peças isotrópicas as quais, independente do ajuste da forma e tamanho, são equivalentes ao pacote de chapas laminadas de 0,65 mm. A adição de fósforo melhora não somente as propriedades magnéticas macias do ferro, mas também, àquelas das ligas ferro-silício. A extensão da faixa de materiais disponíveis por M/P inclui, também, ferro-silício-fósforo e ferro-fósforo-estanho, aumentando a flexibilidade de escolha das combinações das propriedades magnéticas e elétricas e dos custos de produção [50].

Os núcleos magnéticos de motores construídos a partir do processo de M/P, em contraste ao método tradicional do empacotamento de chapas laminadas, oferecem vantagens de menor custo de manufatura, uma vez que os núcleos podem ser construídos a partir de blocos maciços. O processo tradicional de fabricação dos núcleos gera custos elevados, além de uma quantidade excessiva de sobras na estampagem, em torno de 40% [41].

Outra vantagem de um núcleo sinterizado é que este não tem as mesmas restrições no projeto, como o pacote de lâminas. A sobra, praticamente zero, e o aumento dos graus de liberdade do projeto, possibilitam uma redução nos gastos com energia na produção do material usado no dispositivo, permitindo, também, a otimização do circuito magnético relacionado a uma melhora na performance do dispositivo [41].

Devido às suas baixas perdas por correntes parasitas, o núcleo sinterizado possui boas propriedades magnéticas para operações em altas frequências e tem demonstrado desempenho comparável, quanto alimentado com corrente elétrica de 60 Hz, e superior, para correntes com frequências maiores que 60 Hz, quando comparados com pacotes de chapas de aço laminados a frio (CRML) dos motores, conforme demonstrado na Figura 12 [41,45,46].

Figura 12 - Comparação, em 60 Hz, da perda em núcleos de materiais sinterizados e de chapas laminadas de aço com fósforo, orientadas, de 0,64 mm e o aço M-19 de 0,61 mm.



Fonte: Retirado de KRAUSE, R. F.; BULARZIK, J. H.; KOKAL, H. R. 1997, 710-712p. [41].

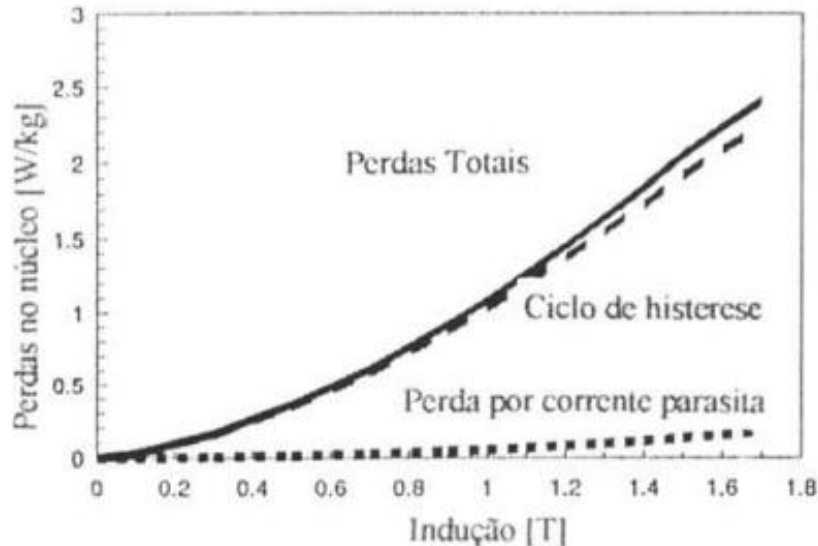
É possível construir um núcleo magnético maciço sinterizado que apresente uma dependência quase linear de perda no núcleo com frequência de magnetização, comparando com a dependência quase quadrada de perda do núcleo com a frequência típica nos núcleos de aços laminados. Uma vez que motores com ímãs permanentes, de velocidade variável, operam à frequência de até 800 Hz, é possível obter-se uma melhor eficiência nestes dispositivos [41].

Salienta-se que, com o aumento da frequência das correntes de alimentação, as perdas nos núcleos de aço aumentam dramaticamente. Estas perdas elevadas nos núcleos não somente reduzem a eficiência dos motores, como também, limitam a sua faixa de operação [41].

Em 1,5 T (15 kG) e níveis de indução mais baixos, a perda no núcleo do material sinterizado é ligeiramente mais elevada que a perda no núcleo de aço de CRML. Considerando níveis de indução mais altos, maior que 1,6 T, onde muitos motores operam, as perdas do núcleo são comparáveis. Em níveis de indução maior do que 1,8 T, onde alguns também operam, o material sinterizado apresenta as perdas no núcleo menor. A Figura 13 mostra a perda total no núcleo do material sinterizado a 60 Hz, separada em perdas por histerese e correntes parasitas (a perda está composta de todas as perdas: a perda clássica, por corrente induzida, a perda

anômala, sendo excluída a perda por histerese). As perdas por corrente parasita são uma parte muito pequena das perdas totais, menos que 10% até 1,8 T [41].

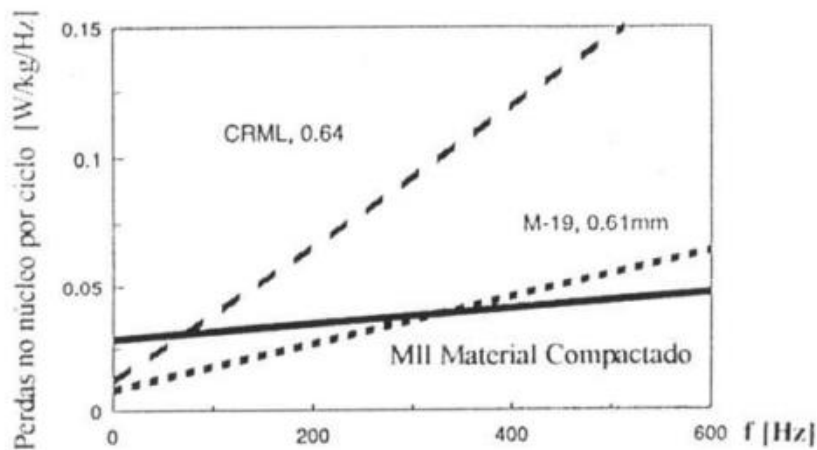
Figura 13 - Perda total nos núcleos, em 60 Hz, de material sinterizado, separada em perdas por histerese e corrente induzidas.



Fonte: Retirado de KRAUSE, R. F.; BULARZIK, J. H.; KOKAL, H. R. 1997, 710-712p. [41].

As perdas relativamente pequenas por corrente induzidas mantêm as perdas totais baixas para frequências mais altas. A Figura 14 mostra uma comparação das perdas totais do núcleo, medidas a 1,5 T do material sinterizado para um CRML aço-fósforo orientado e um aço-silício M-19 não orientado. Em ambas as comparações, a perda por histerese do material sinterizado é maior, mas as perdas por correntes parasitas são menores.

Figura 14 - Comparação das perdas totais do material sinterizado, medidas com uma indução de 1,5 T, com chapas de aço laminadas com fósforo, orientadas, de 0,63 mm e o aço silício m-19 de 0,61 mm.

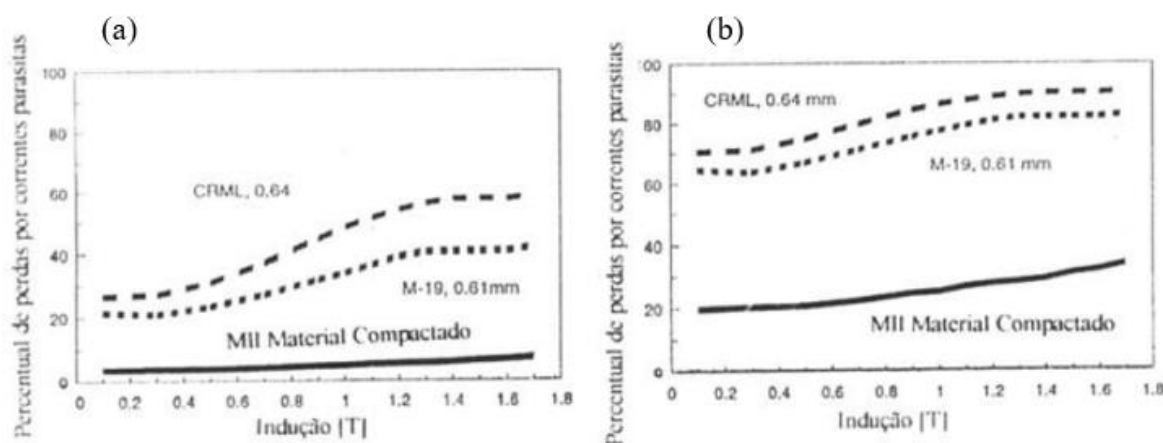


Fonte: Retirado de KRAUSE, R. F.; BULARZIK, J. H.; KOKAL, H. R. 1997, 710-712p. [41].

Em baixa frequência, o material sinterizado tem as perdas do núcleo mais altas. Em aproximadamente 60 Hz, as perdas do material sinterizado são comparáveis ao ferro-fósforo orientado CRML, sendo muito menores em frequências mais altas. O aço M-19 tem as perdas mais baixas do núcleo em frequências menores. Ainda, ao redor dos 400 Hz, a perda no núcleo para o material sinterizado é comparável àquela do aço M-19. O material sinterizado possui as mais baixas perdas a frequências maiores que 400 Hz [41].

A perda total mais baixa do núcleo com material sinterizado é devido às correntes induzidas mais baixas. As Figuras 15 (a-b) mostram o percentual de perdas de correntes induzidas para cada um dos materiais a 60 Hz e 400 Hz, respectivamente. Em ambas as frequências, o percentual de perdas totais do núcleo, devido a perdas por correntes induzidas, é menor para o material sinterizado. As baixas perdas por correntes induzidas para este novo material magnético resultaram em um bom material para motores elétricos. Na maioria das aplicações, o nível de indução é maior que 1,5 T e a forma da onda de tensão elétrica não é senoidal, tendo um conteúdo harmônico elevado. As harmônicas mais altas resultam em perdas por corrente induzidas maiores [41].

Figura 15 - Percentual das perdas, por correntes induzidas da perda total em núcleos de material sinterizados, de chapas de aço laminadas com fósforo, orientadas, de 0,63 mm e do aço silício M-19 de 0,61 mm - (a) 60 Hz - (b) 400 Hz.



Fonte: Retirado de KRAUSE, R. F.; BULARZIK, J. H.; KOKAL, H. R. 1997, 710-712p. [41]

De acordo com dados bibliográficos [41], existe construção de estatores sinterizados de um motor sem escovas de quatro polos, onde, durante os testes, o torque foi mantido constante, resultando em um desempenho melhor do núcleo sinterizado em relação ao núcleo convencional, apresentando um consumo menor de corrente, uma velocidade maior e um aumento menor de temperatura. Basicamente, a eficiência do núcleo sinterizado foi 10% maior.

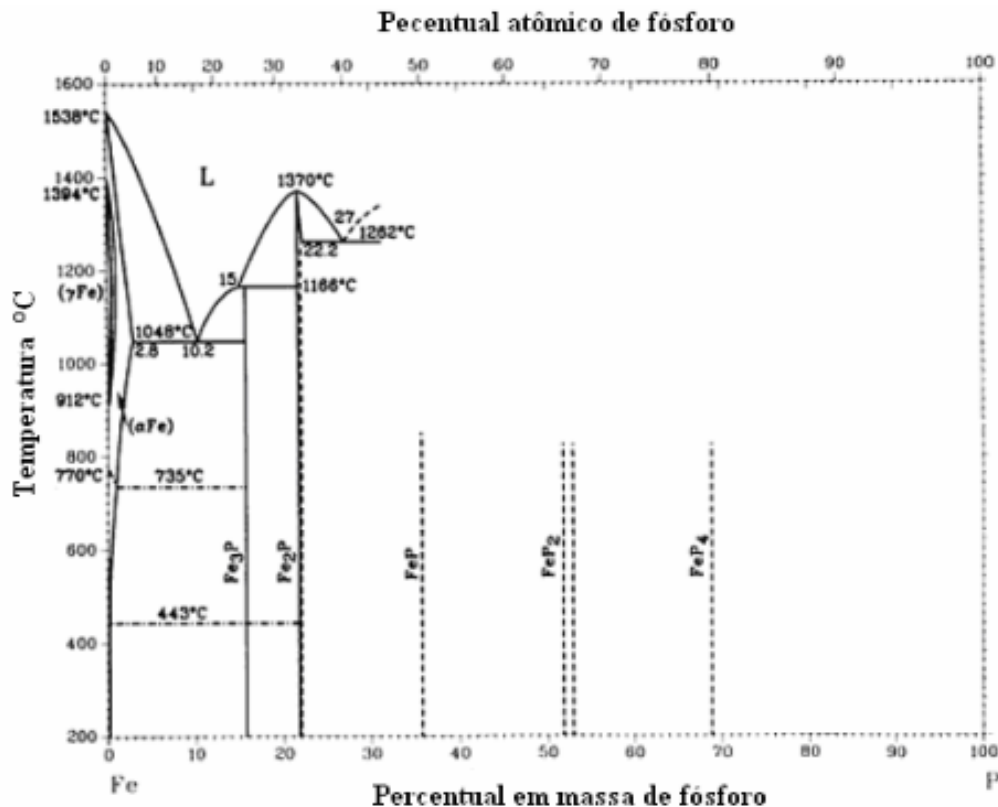
O material sinterizado utilizado nestes núcleos de motores não foi divulgado. O autor cita que um posterior desenvolvimento do material resultou em mais de 10% de diminuição em sua perda no núcleo. A partir destes ensaios, são esperados resultados até melhores com novos materiais. Foram produzidos motores universais com o material sinterizado, que apresentaram desempenho semelhante e ligeiramente melhor que os núcleos de aço CRML convencionais.

Os núcleos magnéticos também podem ser construídos a partir de compósitos baseados em pó de ferro aglomerado com uma matriz orgânica. Usualmente, sua composição química varia dentro de uma faixa de 97% a 99,5% de pó de ferro e os restantes são aglomerantes orgânicos, tipo termofixos ou termoplásticos. São obtidos pelos processos da M/P e são utilizados como substitutos dos núcleos magnéticos clássicos de chapas de aço laminadas ou pó de ferro sinterizado, como ferro-silício e ferro-níquel. O uso dos compósitos de pó de ferro-aglomerados em núcleos de rotores e estatores de máquinas elétricas de corrente contínua e corrente alternada e núcleos de transformadores oferece certas vantagens, como formas variadas, dimensões precisas, perdas reduzidas, alta produtividade e custo vantajoso. Os valores mínimos das principais características obtidas por estes materiais são densidade de  $6,0 \text{ g/cm}^3$ , indução de saturação de 0,6 T, retentividade de 0,10 T, força coercitiva de 3 A/cm e permeabilidade magnética de 100 [47].

## 2.11 LIGA FERRO FÓSFORO

O fósforo tem sido amplamente utilizado para promover a sinterização em ligas ferrosas, sendo seu ponto de fusão abaixo do ferro, servindo então como promovedor de diversas fases líquidas no decorrer do processo de sinterização, conforme apresenta o diagrama de equilíbrio binário de fases Fe-P (Figura 16), sendo as fases que se formam com o percentual de fósforo adicionado ao ferro [51,53], podendo baixar da temperatura de sinterização, acelerar os ciclos de sinterização e sendo um endurecedor de solução potente de sólidos. O fósforo pode ser adicionado ao ferro na forma de fósforo ligado (ferro-liga), como  $\text{Fe}_3\text{P}$ . O fósforo aumenta a difusividade auto-ferro na ferrita e forma uma fase líquida a  $980 \text{ }^\circ\text{C}$ , que promove a rápida sinterização, resultando na densificação do material em temperaturas abaixo de  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ , para a maioria dos aços rápidos. Geralmente, a ductilidade tende a diminuir quando o nível de fósforo é superior a 0,6%, enquanto a força tende a aumentar até um nível com adição de 1,2% de fósforo [51,53].

Figura 16 - Diagrama de fase do Fe-P.



Fonte: Retirado de ASM Metals Handbook. Alloy Phase Diagrams. v. 3, 1992. 2-48 p. [51].

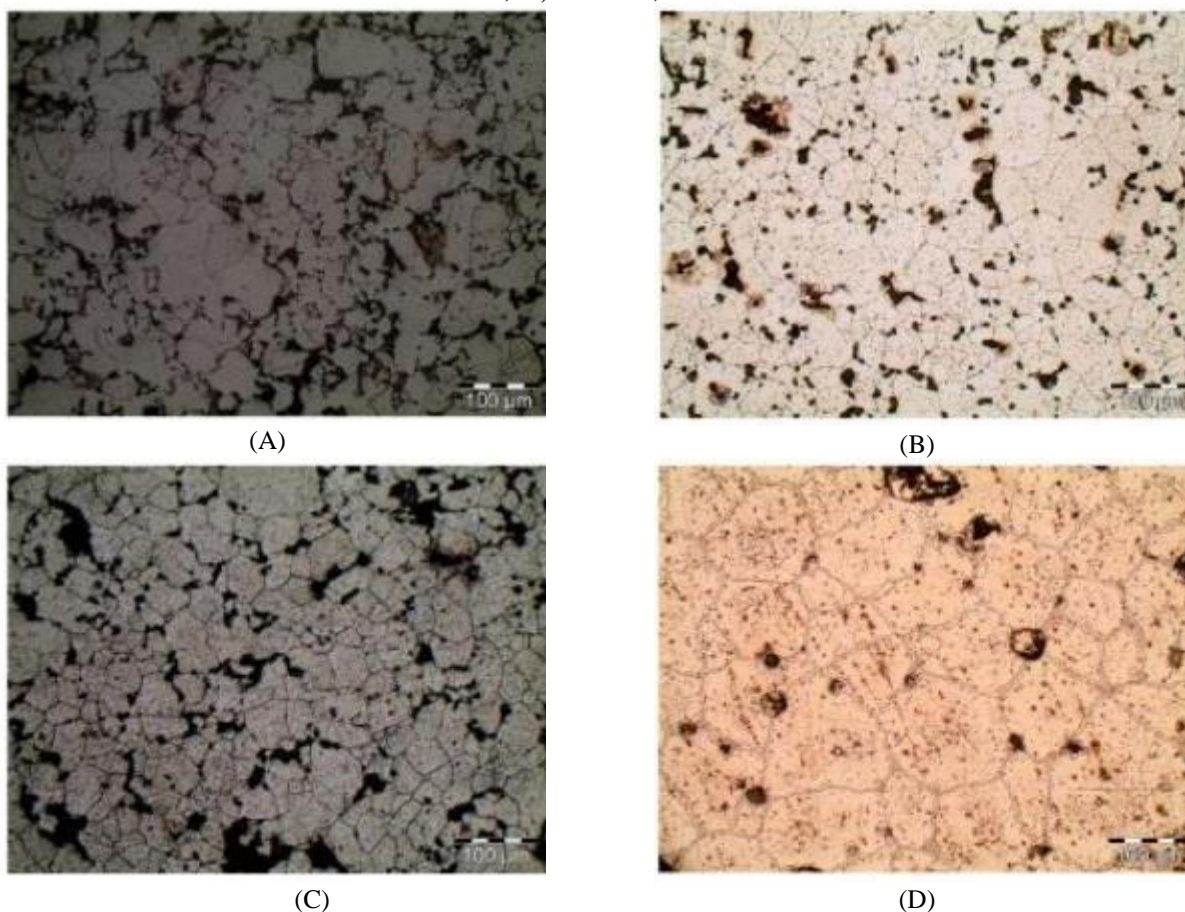
O fósforo é conhecido como um aditivo de sinterização, quando a sinterização de ferro e aço em pó. A fase líquida inicia pela formação no ponto eutético de fusão superior a 1051 °C do ferro com o  $\text{Fe}_3\text{P}$ , aumentando assim a atividade de sinterização. Na produção convencional de aços e ligas ferrosas, o fósforo é um elemento indesejável, uma vez que este segrega no contorno do grão, fragilizando o material [52,53].

O fósforo inicia uma reação transitória de sinterização em fase líquida, sendo chamado de fase líquida transiente, e depois parcialmente solubilizado no ferro-alfa, sendo que parte do fósforo permanece visível como uma segunda fase da ferrita. A fase líquida está presente apenas no início da sinterização e desaparece, enquanto o fósforo torna-se distribuído de forma homogênea, resultando em um material com propriedades ferromagnéticas superiores e o arredondamento dos poros, em virtude da fase líquida transitória, que confere sua tenacidade às ligas. O fósforo também estabiliza a fase ferrita, aumentando assim a atividade de sinterização, devido à difusão mais rápida na fase de ferrita, em comparação com a fase austenita [51,53].



A Figura 17 demonstra exemplos de análises metalográficas, com a adição de fósforos nas proporções de 1%, 2% e 3%, comparando com uma microestrutura de ferro puro. Percebe-se que o aumento da adição modifica a morfologia da microestrutura e, com esse aumento de adição, ocorre a esferoidização dos poros e a diminuição de sua quantidade, acontecendo o mesmo fenômeno de esferoidização sucedido nos grãos de ferritas presentes [54], com a formação da fase líquida transiente, resultando em grãos mais homogêneos e uniformes. A partir de 1% de fósforo, é possível observar a uniformidade dos contornos de grão, com contornos de grãos finos para a liga com até 2% de fósforo e contornos grosseiros para a concentração de 3% de fósforo [54].

Figura 17 - Exemplos de análises metalográficas com a adição da liga Fe2%P, A) Fe-puro, B) Fe-1%P, C) Fe2%P, Fe-3%P.



Fonte: Retirado de BITTENCOURT, S. D.; ITO, D. K.; MATTOS, M. D.; AQUIM, P. M.; MARTINS, R. M.; SCHAEFFER, L. 2016. 91 p. [54].

A adição de fósforo ao ferro resulta em excelentes propriedades magnéticas e mecânicas, sendo necessário um baixo teor de carbono e livre de formação de perlita para atender a essas propriedades com teor de fósforo na faixa de 0,3% e até um 1% de carbono. O

tamanho do grão produz efeito significativo nas perdas magnéticas, sendo que entre 100 e 150  $\mu\text{m}$  ocorre a redução de perdas por histerese [52].

Na comparação com o ferro puro, as ligas de Fe-P apresentam maiores resistividade elétrica, permeabilidade e indução magnética [51]. Em equipamentos como, por exemplo, sensores de velocidade e solenoides magnéticos, a elevada permeabilidade da liga Fe-P melhora o tempo de resposta e permite uma melhor eficiência de operação. Em outras operações, a fase líquida aumenta a densidade e, assim, fornece um nível de indução mais eficiente [55].

As melhores propriedades magnéticas obtidas para as ligas Fe-P estão entre 0,4% até 0,8% de fósforo [55,56]. Teores de até 1,2% de fósforo apresentam boas propriedades magnéticas, sendo que o aumento da adição de fósforo em peças sinterizadas pode melhorar a uniformidade da distribuição de fósforo na microestrutura [56,57]. Consequentemente, o fósforo acima de 0,6% em peso não é normalmente recomendado no processo convencional de metalurgia do pó, embora seja relatado que fósforo maior, até 2%, continua a melhorar as propriedades magnéticas dessas ligas. No entanto, há desvantagens, devido à ocorrência da fase líquida, o controle dimensional é mais difícil, ocorrendo a retração da geometria e, consequentemente, ocasionando distorções da peça [54,57,58].

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, inicialmente, estão demonstrados os experimentos para análise das propriedades físicas, mecânicas, elétricas e magnéticas da liga estudada, que foram realizados para prever e entender como é seu comportamento nas condições em que foi submetida. Após, é demonstrada a fabricação do rotor e estator, com a liga Fe2%P, dimensional e aquisição dos ímãs de Nd-Fe-B, e a fabricação dos demais componentes, como eixo e tampas da carcaça e, por final, a montagem da banca de teste, onde foram realizados os experimentos de funcionamento do motor.

A fabricação dos corpos de provas, núcleo e rotor do motor e demais componentes, bem como a montagem e os ensaios descritos a seguir, foram realizados no Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos da Oficina Tecnológica da Universidade Feevale (LMPMM/Feevale).

#### 3.1 MATÉRIA-PRIMA

Os pós metálicos utilizados como matéria-prima, neste trabalho, foram adquiridos da empresa Höganäs Brasil S/A. O pó de ferro utilizado foi o ASC100.29, cujas folhas de dados são apresentadas no Anexo A deste trabalho, com 99,4% da granulometria, entre 45  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ , e o pó de Fe<sub>3</sub>P constituído de 84% de Fe e 16% de P, que apresenta 90% de sua dimensão abaixo de 14,58  $\mu\text{m}$ , dados coletados conforme certificados do fabricante [8,9,10].

O pó de Fe<sub>3</sub>P foi diluído no pó de Fe até chegar na concentração de 2% em peso de fósforo, juntamente com estearato de zinco, que tem a função de lubrificante, na proporção de 1% em peso, sendo os teores de adição de fósforo no ferro baseados na literatura, na sequência, ocorrendo a mistura num misturador duplo cone, com rotação de 60 rpm, durante 30 minutos.

#### 3.2 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Foram confeccionados três tipos de corpos de provas, cada um com geometrias diferentes, com o objetivo de obtenção de dados de massa específica, dureza, tensão de escoamento, metalografia, micrografia, resistividade elétrica, curva de histerese, curva de magnetização e perdas magnéticas com a variação da frequência.

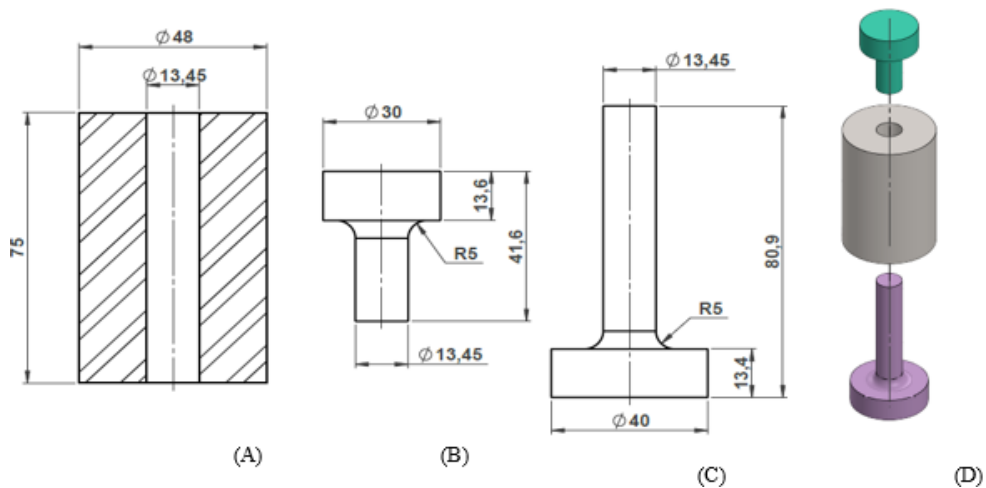
### 3.2.1 Ferramentas utilizadas

A seguir, apresenta-se a descrição das ferramentas utilizadas para fabricação de cada corpo de prova, bem como as suas geometrias.

#### a) Matriz de obtenção dos corpos de prova na forma de cilindros

Os corpos de prova na forma de cilindro têm como objetivo extrair informações de análise da dureza, densidade, tensão de escoamento, metalografia e micrografia da liga. A Figura 18 mostra o desenho em milímetros e a Figura 19 a matriz física para fabricação do corpo de prova, na forma de cilindro, via compactação.

Figura 18 - Desenhos das peças que compõem a matriz para compactação do corpo de prova na forma de cilindro, A - Matriz, B - Punção superior, C - Punção inferior, D - Montagem da matriz (dimensões em mm).



Fonte: De autoria própria.

Figura 19 - Matriz para fabricação dos corpos de prova na forma de cilindro, A - Matriz, B - Punção superior, C - Punção inferior.

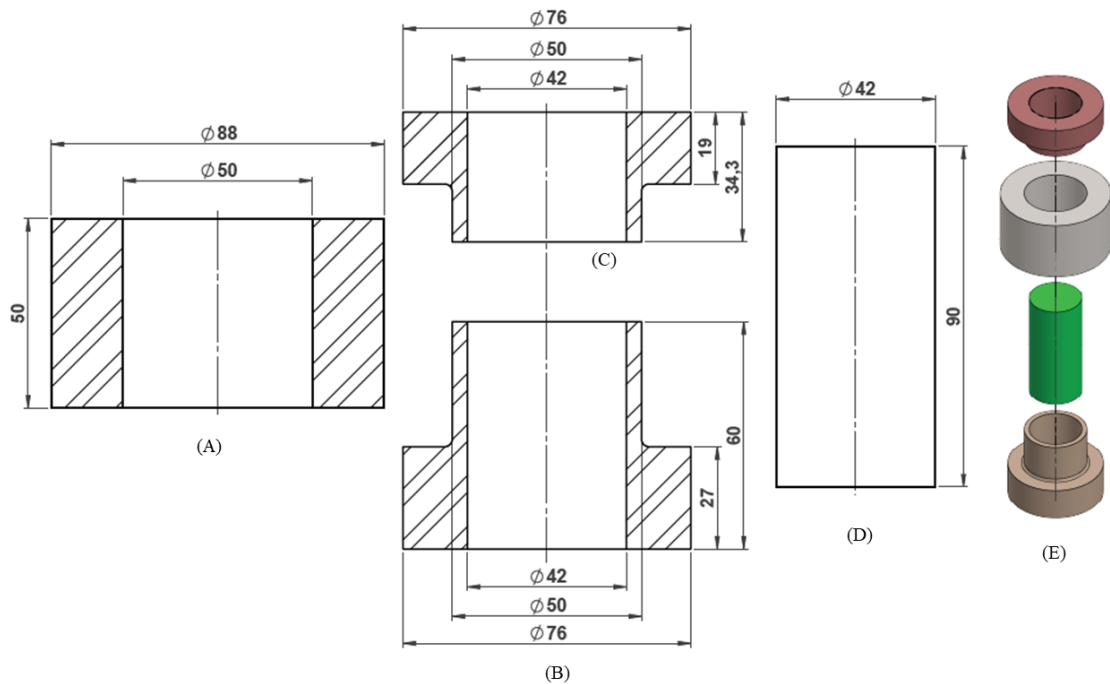


Fonte: Retirado de BITTENCOURT, S. D. 2012. 90 p. [10].

b) *Matriz de obtenção dos corpos de prova na forma de anéis*

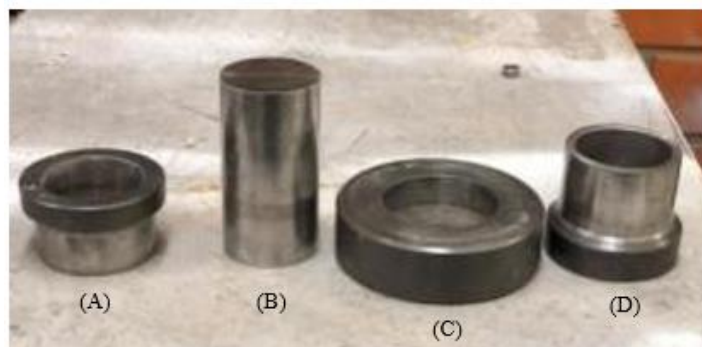
Os corpos de prova na forma de anel têm como objetivo extrair informações de análise de curva de histerese, curva de magnetização e resistividade elétrica da liga. A Figura 20 mostra o desenho de cada componente que forma a matriz e uma vista explodida, enquanto a Figura 21 demonstra a matriz física para fabricação do corpo de prova, na forma de anel, via compactação.

Figura 20 - Desenhos das peças que compõem a matriz para compactação do corpo de prova na forma de anel, A - Matriz, B - Punção inferior, C - Punção superior, D - Macho, E - Montagem da matriz (dimensões em mm).



Fonte: De autoria própria.

Figura 21 - Matriz para fabricação dos corpos de prova na forma de anel, A - Punção superior, B - Macho, C - Matriz, D - Punção inferior.



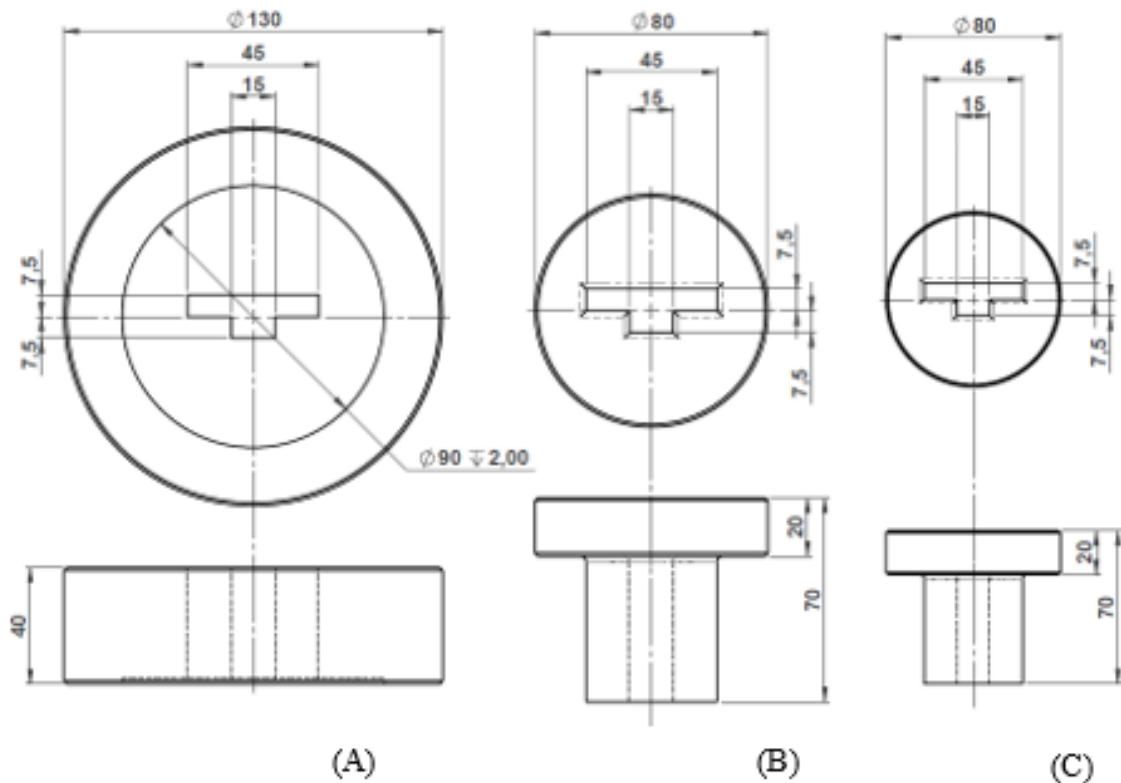
Fonte: Retirado de BITTENCOURT, S. D. 2012. 90 p. [10].

c) *Matriz de obtenção dos corpos de prova nas formas de “T” e “E”*

Estas matrizes têm como função a fabricação de corpos de prova na forma geométrica de “T” e “E”, que têm como função de fabricação do núcleo de um transformador, que visa a estudar as perdas magnéticas em função da frequência da liga Fe2%P, sendo chamado de “T” e “E”, devido à forma geométrica.

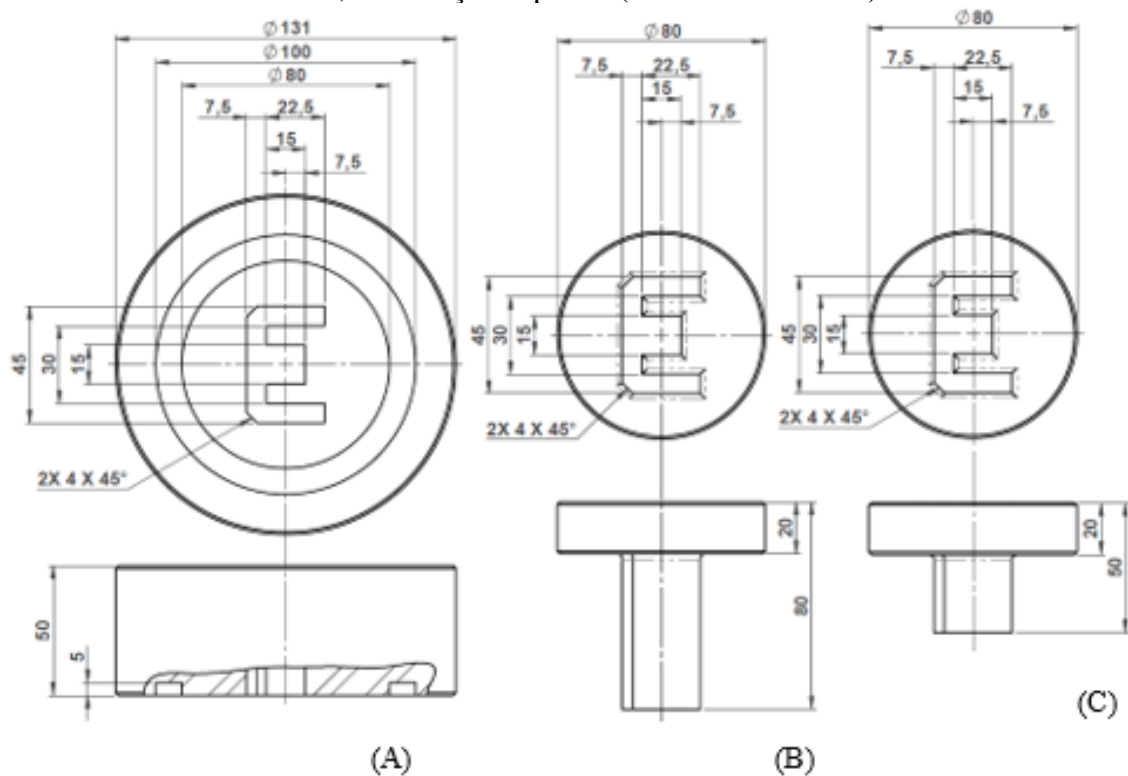
As Figuras 22 e 23 apresentam os desenhos dimensionais das matrizes dos núcleos do transformador e a Figura 24, A e B, a matriz física.

Figura 22 - Desenhos das peças que formam a matriz do núcleo “T”, A - Matriz, B - Punção inferior, C - Punção superior (dimensões em mm).



Fonte: De autoria própria.

Figura 23 - Desenhos das peças que forma a matriz do núcleo “E”, A - Matriz, B - Punção inferior, C - Punção superior (dimensões em mm).



Fonte: De autoria própria.

Figura 24 - Matrizes utilizadas para compactação - (A) Núcleo “E” - (B) Núcleo “T”.



Fonte: Retirado de BITTENCOURT, S. D. 2012. 90 p. [10].

### 3.2.2 Compactação dos corpos de prova

Para a compactação, foi utilizada uma pressão de 600 Mpa, seguindo orientações de dados da literatura, com a utilização de técnica de duplo efeito [28,29,58]. O cálculo da força foi definido a partir da área da cavidade da matriz, conforme desenhos das matrizes [10].

As forças aplicadas em cada corpo de prova estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Força aplicada em cada corpo de prova.

Corpo de prova	Área [mm <sup>2</sup> ]	Força [N]
Cilindro	142,08	85248
Anel	581,35	348810
Transformador “T”	450,00	270000
Transformador “E”	884,00	530400

Para a compactação dos cilindros, foi utilizada uma prensa hidráulica manual de 40 toneladas, marca Bovenau. Para os demais corpos de prova, foi utilizada a prensa manual, modelo PH-200 t, marca Mawil, com capacidade máxima de 200 toneladas e acionamento hidráulico por funcionamento manual.

Na compactação de todos os corpos de provas, a altura do pó na cavidade sofre redução de 50% e 51%.

### 3.2.3 Sinterização dos corpos de prova

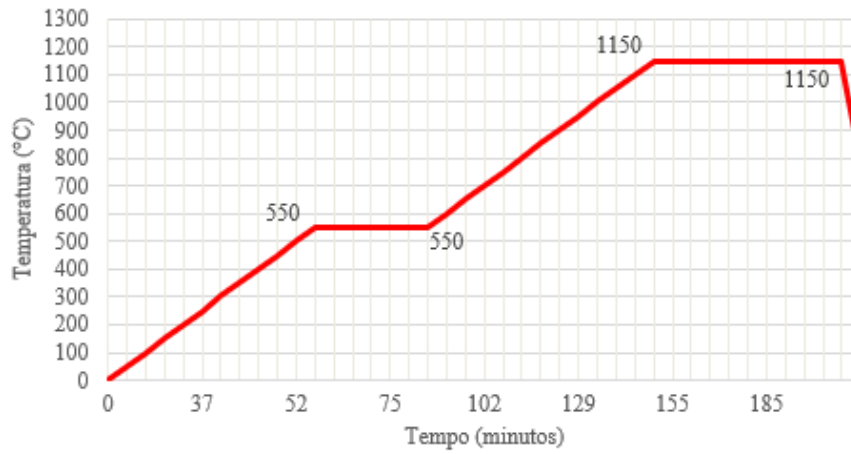
O tratamento térmico dos corpos de prova foi realizado em forno tubular, tipo mufla, marca Sanchis, temperatura máxima de 1.250 °C, com sensor termopar tipo K e resistências de Kanthal A-1. Para a liga Fe2%P, o tratamento térmico consistiu em uma sinterização com atmosfera controlada de gás verde (95% de nitrogênio e 5% de hidrogênio), com a finalidade de eliminar impurezas indesejadas e evitar, principalmente, que ocorra a oxidação e favorecer a ligação química entre o fósforo e o ferro [28].

Para a sinterização, utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10 °C por minuto, até a temperatura de 500 °C, permanecendo as peças nesta temperatura durante 30 minutos, para a retirada do lubrificante sólido (estearato de zinco). A seguir, a temperatura foi elevada para 1.150 °C, ocorrendo a sinterização, com um novo patamar isotérmico nesta temperatura, por 60 minutos (patamares segundo dados bibliográficos [6,10,28]). Após, as peças permaneceram no forno, para resfriamento lento até a temperatura ambiente. A Figura 25 mostra o gráfico com os patamares de sinterização.

A Figura 26 mostra os corpos de prova obtidos, anel (A) e os núcleos dos transformadores (B). Já a Figura 27, apresenta as amostras do corpo de prova, na forma de cilindro, com classificação em números romanos, para identificação durante a realização dos ensaios.



Figura 25 - Curva de patamares de sinterização da liga Fe2%P.  
Curva de Sinterização



Fonte: Adaptado de BITTENCOURT, S. D. 2012. 90 p. [10].

Figura 26 - Cilindro (A), Anel (B), Núcleos “T” e “E” (C)



(A)



(B)

Fonte: De autoria própria.

Figura 27 - Amostras dos corpos de provas na forma de cilindros na forma de sinterizados.



I

II

III

IV

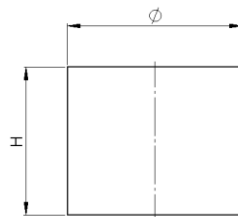
Fonte: De autoria própria.

## 4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

### 4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas (altura, diâmetro, volume, massa e densidade) das amostras cilíndricas foram recolhidas com o auxílio de paquímetro e balança de precisão, com as peças na forma de peça verde e sinterizada, logo para efeito de comparação de redução. Na Figura 28, apresenta-se um croqui do cilindro, demonstrando o diâmetro ( $\phi$ ) e a altura (H) coletados dos corpos de prova.

Figura 28 - Geometria do cilindro.



Fonte: De autoria própria.

### 4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para determinação da liga a ser utilizada no desenvolvimento do servomotor, foram analisadas as propriedades de compressão, dureza, metalografia e morfologia, a partir das amostras cilíndricas obtidas.

#### a) Ensaio de dureza e ensaio de compressão

Para os ensaios de dureza e compressão, foram utilizados três corpos de prova cilíndrico (amostras I, II e III), sendo que os ensaios de dureza foram medidas com o equipamento durômetro da marca Pantek, modelo RASN / N° 496-00, utilizando o padrão Rockwell B, empregado em ligas de cobre, níquel, alumínio e aços não temperados, com penetrador de esfera 1/16" e carga de 100kgf (980,7N), segundo a norma ASTM E18 [59].

Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina de ensaios universal Emic DL20000, com célula de carga até 200kN, utilizando-se velocidades de 2,0 mm/min, de acordo com a norma ASTM E9, sendo utilizada a Equação 10 para a obtenção da tensão de escoamento [60]:

$$\sigma_e = \frac{F}{A_{st}} \quad (10)$$

Onde:

- $\sigma_e$  = tensão de escoamento [MPa];

- $F$  = força [N];
- $A_{st}$  = área da seção transversal [mm<sup>2</sup>].

*b) Ensaio de análise da metalografia*

A análise da metalografia foi realizada a partir da amostra cilíndrica IV. A amostra foi lixada e polida com pasta de alumina de 1 $\mu$ m e, depois, submetida à ataque químico de nítal 2%. Foi utilizado o equipamento para a metodologia dos testes, sendo o microscópio da marca Pantec, da fabricante Panambra, modelo NMM 800 TRF. Já o software utilizado para a captura das imagens, foi o TCCapture.

*c) Análise da morfologia*

Foram analisados o pó misturado e o material sinterizado, sendo que a amostra do material sinterizado foi obtida através da amostra cilíndrica IV. O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo JSM-6510LV.

### 4.3 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

Para obtenção da curva de histerese e magnetização, seguindo a norma ASTM A773/A 773M-14 [61], foi confeccionado o anel de Rowland, Figura 29, a partir do corpo de prova na forma de anel obtido.

Figura 29 - Anel de Rowland.



Fonte: De autoria própria.

Da curva de histerese, é obtida a retentividade (magnetismo remanente) e a coercitividade (campo desmagnetizante). Através da análise da curva de magnetização, foi observada a permeabilidade magnética e a indução de saturação ou indução máxima (que também pode ser visualizada a partir do laço de histerese) [17].

O anel foi isolado com fita isolante e, em seguida, bobinado com fio de cobre esmaltado 23AWG, onde se obteve o número de espirais da bobinagem secundária. Após, foi isolado novamente com fita isolante e bobinado com fio de cobre esmaltado 27AWG, onde se obteve o número de espirais da bobinagem do primário.

O anel de Rowland foi, então, conectado ao equipamento, como mostra a Figura 30 (A), sendo o equipamento utilizado para a aquisição dos dados, um traçador de curvas de histerese, Global Mag, modelo TLMP-TCH-14. A Figura 30 (B) mostra o anel bobinado conectado ao traçador. Os dados utilizados, durante o ensaio, foram corrente de 5 A e frequência de 0,05 Hz. Os dados de entrada para obtenção da curva de histerese foram densidade de espirais do primário (números de voltas/m), número de espirais do secundário, resistência do fio de cobre (padrão de  $0,2 \Omega$ ), área da seção transversal ( $\text{mm}^2$ ) e massa específica do material ( $\text{kg}/\text{mm}^3$ ).

Figura 30 - (A) Traçador de curvas magnéticas, modelo TLMP-TCH-14, (B) conectado ao anel bobinado.



(A)



(B)

Fonte: De autoria própria.

#### 4.4 PROPRIEDADES ELÉTRICAS

A resistividade do material (corpos de prova) das ligas foi determinada a partir do cálculo da resistência elétrica [62]. Para medição desta, utiliza-se um dispositivo denominado de multímetro ou multiteste, que mede diretamente a resistência elétrica do corpo. Entretanto, para medição de resistência elétrica muito baixa (segue a norma ASTM A712-14), aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. Portanto, o corpo de prova para determinação da resistividade deve ter a forma de uma barra fina e comprida [63]. Um artifício é a utilização de um anel, cortando-se um segmento do mesmo, fazendo com que este tenha a forma de uma barra curvada, ou seja, de grande comprimento e pequena área de seção transversal [62]. A Figura 31 (A) mostra o anel com os fios soldados, enquanto a Figura 31 (B) mostra o anel conectado a uma fonte de tensão contínua, com medição de corrente e tensão.

Figura 31 - Determinação da resistividade: (A) Anel cortado com os fios soldados, (B) Conectados a fonte elétrica e medição.



Fonte: De autoria própria.

A corrente de valor constante foi fornecida por uma fonte de tensão contínua ajustável Instrutherm, modelo FA 1030, com tensão e corrente máximas de 18,3V e 10,5<sup>a</sup>; a medição da tensão sobre o anel foi realizada com o auxílio de voltímetro de precisão Fluke, modelo 179 True-RMS-Multimeter. A resistividade elétrica foi calculada com a Equação 11, a partir da resistência elétrica dos corpos de prova em forma de anel [62,64].

$$R = \rho \frac{l}{A_{st}} \Rightarrow R = \frac{V_{el}}{I} \Rightarrow \rho = \frac{V_{el} \cdot A_{st}}{I \cdot l} \quad (11)$$

Onde:

- $\rho$  = resistividade elétrica [ $\Omega \cdot m$ ];
- $R$  = resistência elétrica [ $\Omega$ ];
- $l$  = comprimento do anel [mm];
- $A_{st}$  = área da seção transversal [ $mm^2$ ];
- $V_{el}$  = tensão elétrica [ V ];
- $I$  = corrente elétrica aplicada [A].

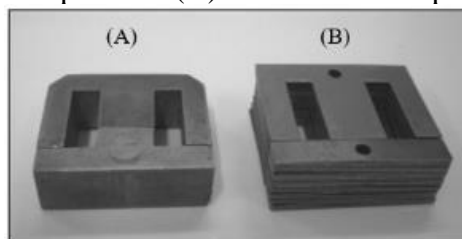
#### 4.5 ENSAIO DE PERDAS MAGNÉTICAS COM VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA

As perdas de potência, em função do aumento da frequência, foram determinadas a partir de núcleos na forma de um transformador, ou seja, núcleos “E” e “T”, sendo que, para este ensaio, foi utilizado, como referência, um transformador comercial de 12 V/500 mA [62, 64]. Assim, é possível fazer uma comparação de perdas em núcleos de chapas e por M/P, uma vez que é possível utilizar, além das mesmas dimensões (no caso das matrizes), a mesma bobina. Cita-se que, como as perdas são em função do volume, ou seja, adimensionais, é possível fazer também uma comparação com qualquer geometria, como os núcleos toroidais,

típicos das ferritas macias, materiais comuns em indutores, desde que seja possível colocar enrolamentos primário e secundário [65,66].

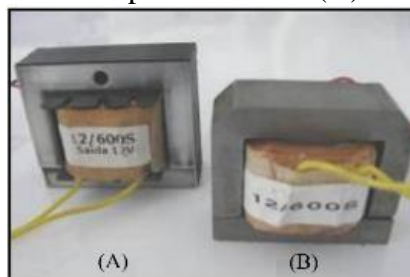
Os núcleos “E” e “T” possuíam as mesmas dimensões possíveis dos núcleos em chapas laminadas, para um estudo comparativo, Figura 32, e encaixados de maneira a formar o núcleo final. Assim, os enrolamentos utilizados nos transformadores desenvolvidos foram os mesmos enrolamentos do transformador convencional, Figura 33, tendo sido este desmontado e retirado o carretel onde se encontravam as bobinas. Este procedimento foi utilizado para que fosse possível uma análise comparativa do transformador convencional e do desenvolvido.

Figura 32 - Núcleo obtido por M/P (A) e núcleo obtido por chapas laminadas (B).



Fonte: Retirado de BITTENCOURT, S. D. 2012. 90 p. [10]

Figura 33 - Núcleo em chapas laminadas (A) e núcleo em M/P (B).



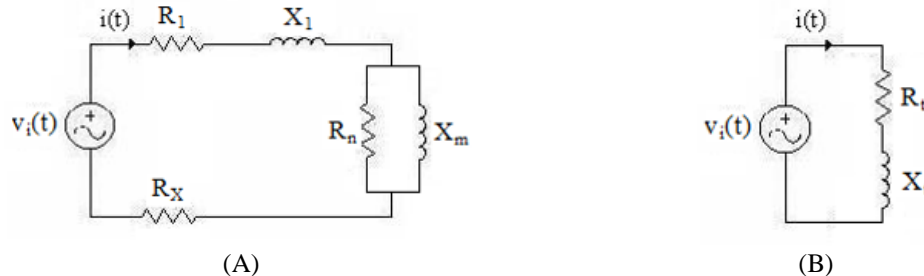
Fonte: Retirado de BITTENCOURT, S. D. 2012. 90 p. [10].

A Figura 34-(A) mostra o circuito equivalente de um transformador, somente com o lado primário, para o ensaio a vazio (como a saída fica aberta, não é necessário representar o secundário), acrescido de  $R_x$  uma resistência de  $1 \Omega$ , onde é observada a corrente  $i(t)$  no canal B do osciloscópio; já a tensão  $v_i(t)$ , é observada no canal A do osciloscópio. Assim, é possível observar, também, a defasagem entre a tensão e a corrente, ou seja, o ângulo  $\varphi$ , sendo possível então determinar todas as potências envolvidas. A Figura 34-(B) mostra o circuito equivalente das impedâncias do transformador, sendo que as grandezas estão relacionadas a seguir [13,67]:

- $R_1$  = resistência dos enrolamentos do primário (medido =  $1 \Omega$ );
- $X_1$  = reatância dos enrolamentos do primário;
- $R_n$  = resistência que considera as perdas magnéticas no núcleo por correntes parasitas e ciclo de histerese (na verdade, é esta perda que precisa ser observada);

- $X_m$  = reatância de magnetização do núcleo;
- $Z_t = R_t + jX_t$  (impedância equivalente total do circuito).

Figura 34 - Circuitos equivalentes do transformador - (A) Primário - (B) Impedância equivalente.



Fonte: Retirado de FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY Jr, C.; UMAS, S.D. 2006. 657 p. [13].

A Figura 35-(A) mostra um circuito RL típico, já a Figura 35-(B) mostra como se comporta a tensão  $v_i(t)$  (em vermelho) e a corrente  $i(t)$  (em preto). Assim, é possível observar a defasagem entre a tensão e a corrente também [62].

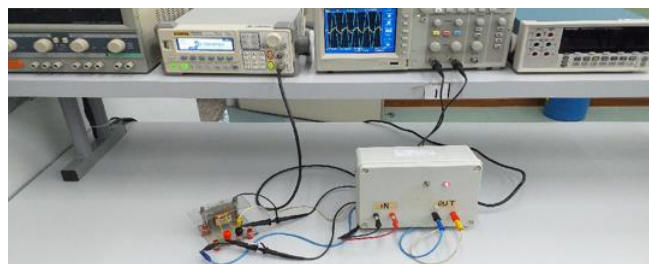
Figura 35 - Circuito RL: (A) Diagrama esquemático, (B) Formas de onda de tensão e corrente.



Fonte: Retirado de BOYLESTAD, R.L.; NASHELSKY, L. 2009. 894 p. [62].

Os Apêndices A e B deste trabalho demonstram, em formato de tabelas, os ensaios dos transformadores em chapas e liga Fe2%P, onde as tensões senoidais foram geradas a partir de um gerador de sinais (50 a 1kHz), amplificadas e, a partir de um osciloscópio, foram observadas as tensões, correntes e a defasagem (ângulo em graus) [65,66]. A Figura 36 mostra o esquema montado para os ensaios dos transformadores.

Figura 36 - Esquema elétrico montado para observações das perdas em frequência.



Fonte: De autoria própria.

Assim, foi calculada a Papa (potência aparente) [65,66]:

$$P_{apa} = V \cdot I \quad (12)$$

Onde:

- $P_{apa}$  = potência aparente [VA];
- $V_{el}$  = tensão elétrica [V];
- $I$  = corrente elétrica [A].

A Pat (potência ativa) [65,66]:

$$P_{at} = P_{apa} \cdot \cos(\phi) \quad (13)$$

A Preat (potência reativa) [65,66]:

$$P_{reat} = P_{apa} \cdot \sin(\phi) \quad (14)$$

Onde:

- $P_{reat}$  = potência reativa [VAR];
- $P_{apa}$  = potência aparente [VA].

A Rt (resistência equivalente total) [65,66]:

$$R_t = \frac{P_{at}}{I^2} \quad (15)$$

Onde:

- $R_t$  = resistência equivalente total [ $\Omega$ ];
- $P_{reat}$  = potência reativa [VAR];
- $I$  = corrente elétrica [A].

A Xt (reatância equivalente total) [65,66]:

$$X_t = \frac{P_{reat}}{I^2} \quad (16)$$

Onde:

- $X_t$  = reatância equivalente total [ $\Omega$ ];
- $P_{reat}$  = potência reativa [VAR];
- $I$  = corrente elétrica [A].



Assim, foi possível calcular  $Z_t = R_t + jX_t$  (impedância equivalente total do circuito). Para normalizar as tensões, e de posse dos circuitos equivalentes, arbitra-se uma tensão de 6 V (exatamente metade da tensão nominal do lado tomado como primário do transformador que é de 6 V) [65,66].

A nova corrente  $I$  foi calculada [17,70]:

$$I = \frac{V}{\sqrt{R_t^2 + X_t^2}} = \frac{6}{\sqrt{R_t^2 + X_t^2}} \quad (17)$$

Onde:

- $I$  = corrente elétrica [A];
- $V_{el}$  = tensão elétrica [V];
- $R_t$  = resistência equivalente total [ $\Omega$ ];
- $X_t$  = reatância equivalente total [ $\Omega$ ].

O novo ângulo foi mantido (não muda, mesmo com a mudança da tensão). Assim, a partir da nova corrente e tensões, foram novamente calculadas as  $P_{ax}$ ,  $P_{at}$  e  $P_{eat}$ .

$R_x + R_1 = 2 \Omega$  ( $R_x$  foi de  $1\Omega$ , mas, embora  $R_1$  tenha sido arbitrado em  $1\Omega$ , este deve ser confirmado, ou seja, novamente medido).

As perdas ou potência dissipada em  $P(R_x + R_1)$  foram calculadas como [65,66]:

$$P(R_x + R_1) = I^2 \cdot (R_x + R_1) \quad (18)$$

Onde:

- $P$  = potência [W];
- $R_x$  = resistência observada [ $\Omega$ ];
- $R_1$  = resistência dos enrolamentos do primário [ $\Omega$ ];
- $I$  = corrente elétrica [A].

As perdas no núcleo  $PR_n$  foram calculadas como [65,66]:

$$PR_n = P_{at} - P(R_x + R_1) \quad (19)$$

Onde:

- $PR_n$  = perdas no núcleo [W];
- $P_{at}$  = potência ativa [W];
- $P$  = potência [W];
- $R_x$  = resistência observada [ $\Omega$ ];

- $R_l$  = resistência dos enrolamentos do primário [ $\Omega$ ].

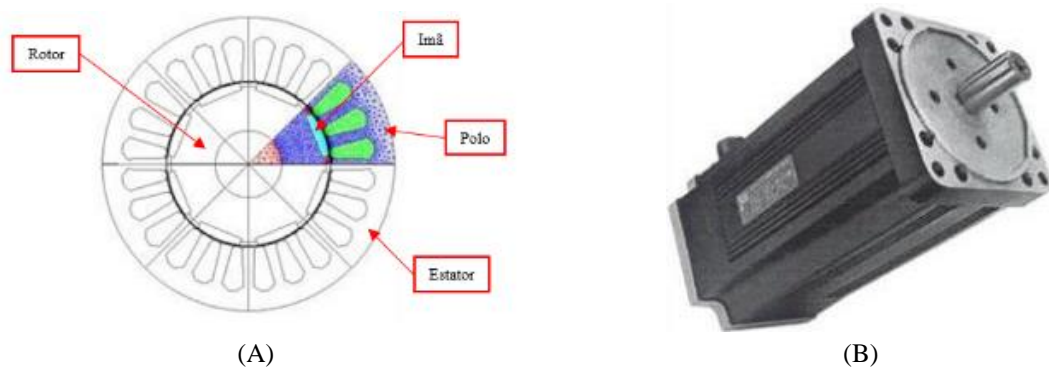
Para normalizar as perdas nos núcleos, e para comparação, foram calculadas as perdas por volume dos núcleos dos transformadores ( $P_d/Vol$ ) em [ $W/cm^3$ ]. Os núcleos, na forma de transformadores, foram colocados em copo de Becker, com água, e foram medidos os deslocamentos da água em mililitros [ml], segundo o princípio de Arquimedes para medição de volumes de geometria completa, resultando, para todos os núcleos, o valor aproximado de  $22\text{ cm}^3$ , sendo este o volume considerado [65,66].

## 4.6 DESENVOLVIMENTO DO SERVOMOTOR

### 4.6.1 Introdução

A máquina tomada como base foi o servomotor síncrono com ímãs permanentes SWA 08732, Brushless AC, da WEG Motores. A Figura 37-(A) mostra a vista em corte dos núcleos do estator e rotor, na qual se pode observar o número de polos e a forma na qual os ímãs são dispostos na superfície do rotor. A Figura 37-(B) mostra a vista em perspectiva deste servomotor. A Tabela 3 mostra os dados de placa, enquanto a Tabela 4 mostra os dados coletados do servomotor que foi utilizado.

Figura 37 - Servomotor SWA da WEG motores - (a) Vista em corte do motor síncrono com ímã permanente - (b) Vista em perspectiva.



Fonte: De autoria própria.

Tabela 3 - Dados de placa do servomotor 08732.

Rotação nominal	3000 RPM
Torque Mo	1,6 N.m
Polos	8
Potência	400 W
Tensão	230 V
Classe de isolamento	F
Carcaça	SWA40
Io	2 A
I	1,8 A
Imax	7,2 A
$\Delta T$	100 K

Tabela 4 - Dados coletados do servomotor.

Sensor de alimentação	Resolver 7 V/ 10 kHz
Cabos de ligação	1,31mm <sup>2</sup>
Fio	1 x 0,45 mm
Espiras	42
Camada	dupla
Grupos por fase	8
Ligação	série
Bobinas por grupo	1
Pacote (comprimento do estator ou rotor)	40 mm
Entreferro	0,4 mm
Chapa	4.33 W/kg em 1.5T / 60Hz espessura 0.5mm
Inclinação da ranhura do estator	9.5 +/- 0.2 mm
Quantidade de ímãs = 16	Nd-Fe-B IMA 20 x 11.5 x 2.25 25UH

As características técnicas deste servomotor são:

- força contra-eletromotriz senoidal;
- rotação suave e uniforme em todas as velocidades;
- baixo nível de ruído e vibração;
- ampla faixa de rotação com torque constante;
- baixa manutenção (servomotores sem escovas);
- elevada capacidade de sobrecarga;
- baixa inércia;
- resposta dinâmica rápida.

As especificações técnicas são:

- grau de proteção IP 55;
- isolamento classe F;
- realimentação por resolver;

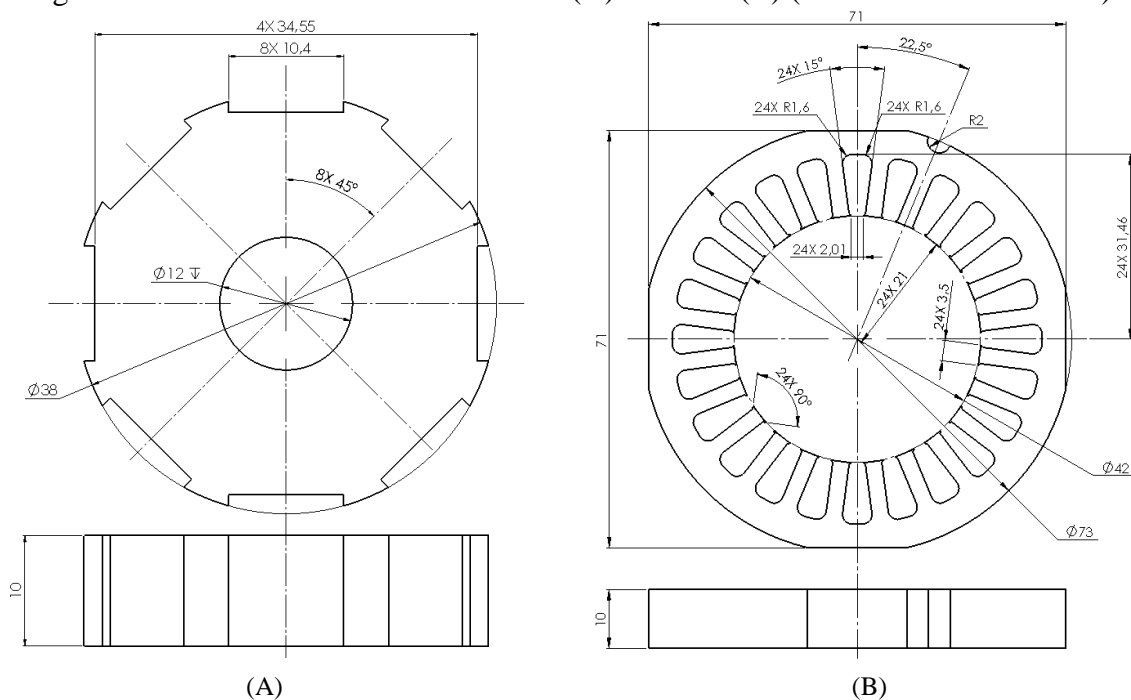
- formas construtivas B5 (sem pés, fixado pela flange), V1 (sem pés, fixado pela flange para baixo) e V3 (sem pés, fixado pela flange para cima);
- protetor térmico (PTC);
- ponta de eixo com chaveta NBR 6375;
- ímãs terras raras NdFeB;
- rolamento com lubrificação permanente;
- retentor para velocidade do eixo;
- temperatura máxima de operação em regime permanente:  $\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 4.6.2 Projeto do servomotor

##### a) Dimensional do rotor e estator

A partir do dimensional extraído do rotor e do estator do motor tomado como base do projeto, foram desenhados os componentes, conforme demonstrado na Figura 38.

Figura 38 - Dimensional extraído do rotor (A) e estator (B) (medidas em milímetros).



Fonte: De autoria própria.

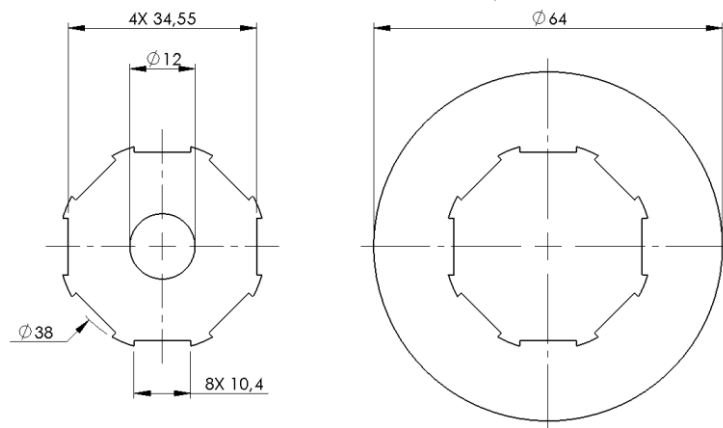
##### b) Matrizes do rotor e estator

As matrizes foram construídas em aço ferramenta, possuindo geometria idêntica à máscara dos detalhes do projeto citado na Figura 38. Foram projetadas e construídas duas

matrizes, uma para obtenção do núcleo do estator e outra para obtenção do núcleo do rotor, conforme desenho de projeto demonstrado nas Figuras 39 e 40. Salienta-se que mesmo a possível contração que poderia ocorrer nos processos de consolidação das peças foi levada em consideração no projeto das matrizes, tendo como resultados após a fabricação dos componentes, conforme demonstrado na Figura 41.

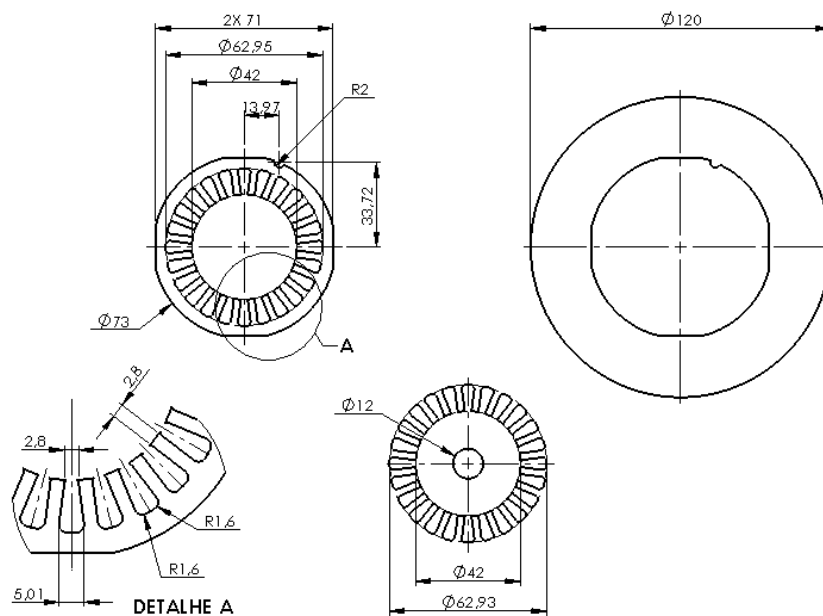
Para uma melhor precisão dimensional, devido à variação do processo de M/P, o rotor e estator foram divididos em quatro partes idênticas, que, após, foram montadas, para dar forma final ao núcleo.

Figura 39 - Desenhos das matrizes do rotor (medidas em milímetros).



Fonte: De autoria própria.

Figura 40 - Desenhos das matrizes do estator (medidas em milímetros).



Fonte: De autoria própria.

Figura 41 - Matriz do estator (esquerda) e do rotor (direita).



Fonte: Retirado de [10, 64].

*c) Obtenção dos núcleos do rotor e estator*

Para a compactação, foi utilizada uma pressão de 600 Mpa, seguindo orientações de dados da literatura, com a utilização de técnica de duplo efeito [28,29,58]. O cálculo da pressão foi definido a partir da área da cavidade da matriz, conforme desenhos das matrizes [10]. As forças aplicadas em cada componente estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Força aplicada em cada componente.

Componente	Área [mm <sup>2</sup> ]	Força [N]
Rotor	897,46	538476
Estator	1759,68	1055808

A compactação para dar forma aos componentes foi realizada utilizando a prensa de modelo PH-200t, com capacidade máxima de 200t e acionamento hidráulico por funcionamento manual.

O tratamento térmico foi realizado em forno tubular tipo mufla, marca Sanchis, temperatura máxima de 1.250 °C, com sensor termopar tipo K e resistências de Kanthal A-1. Para a liga Fe2%P, o tratamento térmico consistiu em uma sinterização com atmosfera de gás verde (95% N e 5% de H), considerando o gráfico dos patamares da Figura 25 (apresentado no item 3.2.3).

A Figura 42 demonstra as peças do rotor (A) e estator (B), sendo obtidas cinco peças que compõem o núcleo, sendo uma de cada, servindo como peças sobressalentes.

Figura 42 - Rotor (A) e estator (B) prontos.



Fonte: De autoria própria.

#### 4.6.3 Aquisição e usinagem das outras peças

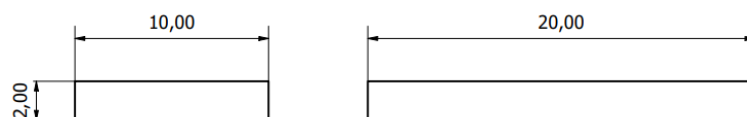
Para atender o dimensional do rotor e estator obtido via M/P, optou-se em dimensionar novos ímãs, tampas e eixo.

##### a) Obtenção dos ímãs

Os ímãs escolhidos para o projeto são compostos de neodímio-ferro-boro (NdFeB), com revestimento de níquel, pois apresentam ótimas características magnéticas.

Os ímãs foram obtidos comercialmente com as dimensões dispostas na Figura 43, sendo que foram utilizados dezesseis ímãs no núcleo da máquina.

Figura 43 - Dimensões do ímã utilizado (medidas em milímetros).

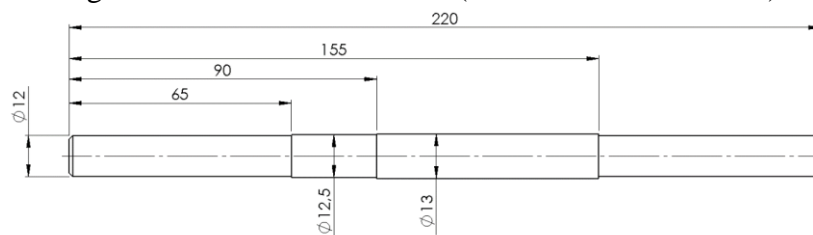


Fonte: De autoria própria.

##### b) Obtenção do eixo

O eixo foi dimensionado e torneado conforme desenho demonstrado na Figura 44.

Figura 44 - Geometria do eixo (medidas em milímetros).



Fonte: De autoria própria.

c) *Obtenção das tampas da carcaça*

As tampas foram dimensionadas e fabricadas conforme demonstrado na Figura 45.

Figura 45 - Geometria das tampas da carcaça.



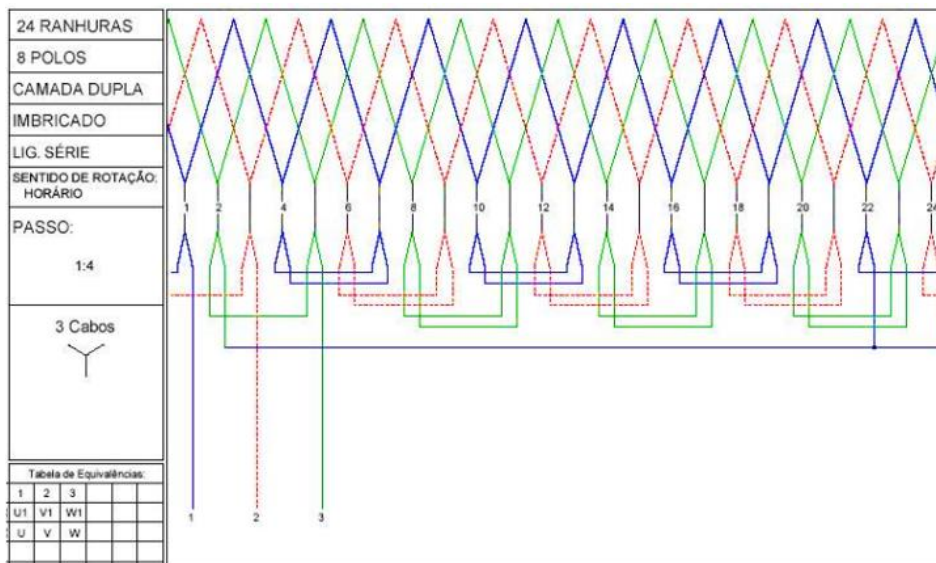
Fonte: De autoria própria.

#### 4.7 MONTAGEM DO SERVOMOTOR

O núcleo do servomotor foi bobinado seguindo o esquema de bobinamento disposto na Figura 46 e montado de acordo com o projeto original do servomotor. A Figura 47-(A) mostra a fotografia do núcleo do estator, já bobinado, onde se pode observar que este é composto de quatro partes. A Figura 47-(B) mostra a fotografia do núcleo do rotor, já com os ímãs colados, onde também é possível observar que este é composto de quatro partes.

Com exceção dos núcleos do rotor, estator, tampas e eixo, todas as outras peças utilizadas foram compradas, conforme dimensional do projeto do servomotor.

Figura 46 - Esquema do bobinamento do servomotor.



Fonte: Retirado de GUIMARÃES. F.R. 2015. 63 p. [9]



Figura 47 - Fotografias dos núcleos montados do - (A) Estator - (B) Rotor.



(A)



(B)

Fonte: De autoria própria.

## 4.8 MONTAGEM DA BANCADA DE TESTES

### 4.8.1 Introdução

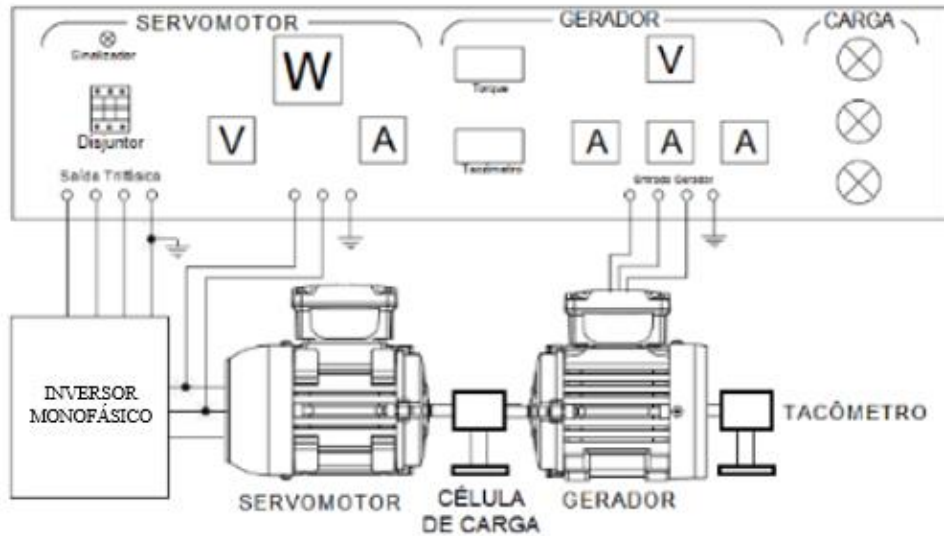
A máquina a ser desenvolvida, neste projeto, não foi testada como servomotor, mas somente como gerador elétrico, funcionando em alta frequência. Assim, foi possível testar as máquinas quanto ao seu funcionamento básico e, para esta finalidade, foi desenvolvida uma bancada de testes, com o objetivo de testar o servomotor.

### 4.8.2 Projeto da bancada de testes

Foi realizado o desenvolvimento e montagem de uma bancada de testes para o servomotor, na qual foi possível medir tensões, corrente, potência elétrica (wattímetro), velocidade angular (tacômetro) e potência mecânica (a partir de sensor de torque entre os eixos ou célula de carga). A Figura 48 mostra o desenho esquemático desta bancada, onde é possível observar que foram necessárias duas máquinas para estas medições, ou seja, a máquina da esquerda funcionando como motor e a máquina da direita funcionando como gerador.

Contudo, foram testadas duas máquinas como geradores (rotor e estator, a partir de Fe2%P, e chapas), para efeito de comparação. Observa-se, na Figura 48, que três lâmpadas estão conectadas na saída do gerador, as quais funcionaram como carga. Assim, a partir do wattímetro, é possível medir a potência elétrica de entrada do motor, a partir da célula de carga (sensor de torque), é possível medir a potência mecânica de saída do motor (e entrada do gerador) e, a partir do voltímetro, amperímetro e lâmpadas, é possível medir a potência na saída do gerador [68].

Figura 48 - Desenho esquemático da bancada para os testes dos servomotores funcionando como motor e gerador.



Fonte: De autoria própria.

Desta forma, é possível determinar os rendimentos das duas máquinas, seja funcionando como motor ou como gerador. Cita-se que o rendimento de um motor é calculado pela relação percentual entre a potência mecânica de saída na ponta do eixo do motor e a potência elétrica de entrada. Para a máquina funcionando como gerador, o rendimento é calculado invertendo-se a entrada e a saída.

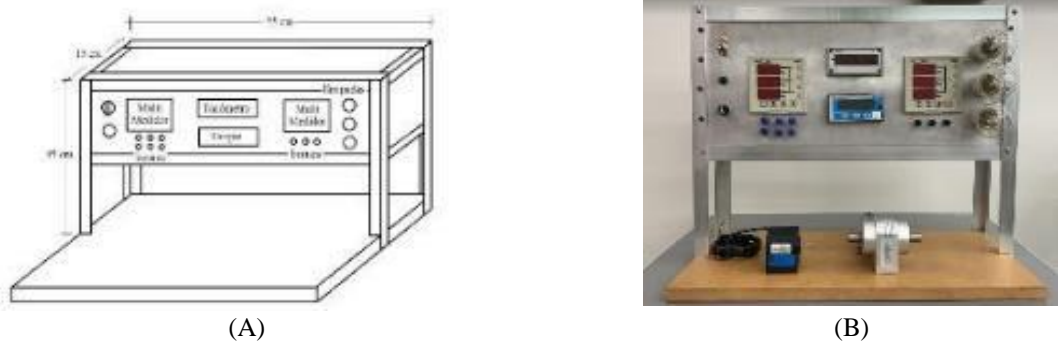
Para a medição de tensão, corrente, potência e frequência elétrica, foi utilizado o multimedidor de energia trifásico VRG 330R 90~240 Vca, da Tholz [69]. O multimedidor deve ser utilizado com um transformador de corrente MSQ 30 100/5, classe 1%. Este transformador de corrente é fabricado de acordo com as normas internacionais IEC185-1987, VDE0414 e BS7626, podendo ser utilizado em procedimentos de testes, controle, visualização da corrente consumida por dispositivos elétricos, proteção contra sobrecorrentes e demais aplicações onde é necessária amostra de corrente [70].

Para medição do torque, foi utilizado o sensor de torque dinâmico MKDC-5, da MK Controle e Instrumentação, com capacidade de 5 N.m, sentido de trabalho horário/anti-horário, alimentação de 10 Vcc, sinal de saída de 2m V/V +/- 10% e com eixo chavetado. A visualização se deu a partir do indicador digital MMK-2030, com dois relés, alimentação de 90~240 Vca, saída com dois relés, microprocessado, *display* de led 14mm, detector de pico, *reset* de pico zero, *tara* e *set-point* ajustável [71].

### 4.8.3 Montagem da bancada de testes

A Figura 49-(A) mostra o desenho dimensional da estrutura da bancada; já a Figura 49-(B), mostra a bancada pronta, na qual é possível observar os dois multimedidores, capazes de medir tensão, corrente, potência e frequência (direita e esquerda) e, ao centro, o indicador do tacômetro.

Figura 49 - Bancada para ensaios dos servomotores - (A) Desenho dimensional - (B) Bancada pronta.

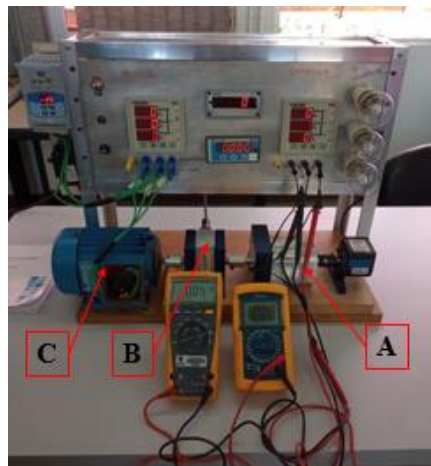


Fonte: De autoria própria.

### 4.9 ENSAIOS DO SERVOMOTOR

O servomotor foi instalado na bancada de testes e pode ser testado em diversas velocidades de rotação. O servomotor foi conectado na célula de carga pelo eixo, com um acoplador mecânico, que é acoplado pelo outro lado do mesmo eixo a um motor monofásico, que possui dois polos com potência de 7,5 kW e, portanto, podendo chegar a 3600 rpm, aproximadamente, que foi conectado por cabos aos bornes de entrada da bancada de testes. Na Figura 50, é possível observar o servomotor (A) conectado à célula de carga (B) e conectado ao motor (C).

Figura 50 - Servomotor montado na banca de testes.



Fonte: De autoria própria.

Para a calibração das informações de corrente e tensão, fornecidas pelo multimedidor de energia trifásico instalado na bancada, foi conectado um multímetro da marca Fluke, modelo 179ESFP, e um voltímetro de precisão Fluke, modelo 179, ambos na saída do gerador.

Foram realizados dois ensaios, com dois servomotores diferentes, um de estator e rotor com Fe2%P e, outro, com estator e rotor constituído de chapas, sendo ambos com as mesmas propriedades físicas, elétricas e mecânicas, para efeito de comparação dos resultados.

O ensaio dos servomotores, ou geradores, ocorreu com a aplicação de faixas de frequências de 10 Hz até no máximo 80 Hz, no inversor do motor de acionamento da bancada, assim transferindo essa rotação para o gerador, operando com segurança e extraindo os dados de corrente, tensão, torque e rotação do eixo,

Devido ao multímetro da bancada não apresentar corretamente os dados de corrente, tensão, potência e frequência elétrica, os dados foram extraídos do multímetro e do voltímetro instalados na saída do gerador e, assim, realizados os devidos cálculos para encontrar a potência e a frequência elétrica, conforme apresentado a seguir.

Com os dados obtidos de corrente e tensão, foi possível calcular a potência elétrica do gerador, através da Equação 20 [13].

$$Pot_{elét} = UL \times IL \times \sqrt{3} \quad (20)$$

Onde:

- $Pot_{elét}$  = potência elétrica [W];
- $UL$  = tensão [V];
- $IL$  = corrente [A];
- $\sqrt{3}$  = máquina trifásica.

Para calcular a potência no eixo, com os resultados de torque e velocidade angular, utiliza-se a Equação 21 [13]:

$$Pot_{eixo} = \frac{t \times N \times 2 \times \pi}{60} \quad (21)$$

Onde:

- $Pot_{eixo}$  = potência no eixo [W];
- $t$  = torque [N.m];
- $N$  = velocidade angular [rpm].

A frequência do gerador ou servomotor foi obtida a partir da Equação 22 [13]:

$$f_{gerador} = \frac{4 \times N}{60} \quad (22)$$

Onde:

- $f_{gerador}$  = frequência do gerador [Hz];
- $N$  = velocidade angula [rpm].

Para encontrar a eficiência do gerador, ou servomotor, foi utilizada a Equação 23 [13]:

$$E_{gerador} = \frac{Pot_{elét}}{Pot_{eixo}} \times 100 \quad (23)$$

Onde:

- $E_{gerador}$  = eficiência do gerador [%];
- $Pot_{elét}$  = potência elétrica [W];
- $Pot_{eixo}$  = potência no eixo [W].

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DAS AMOSTRAS

Os gráficos das Figuras 51, 52, 53, 54 e 55 demonstram os resultados das propriedades físicas das amostras, que foram coletadas na forma de peça verde e sinterizada, classificadas em números romanos (I, II, III e IV) e com as respectivas médias calculadas. No gráfico da Figura 56, apresenta-se, para efeito de comparação, as propriedades médias encontradas em percentual de variação entre as peças verdes e sinterizadas.

Figura 51 - Resultados de medidas de alturas encontradas entre peça verde e sinterizada.

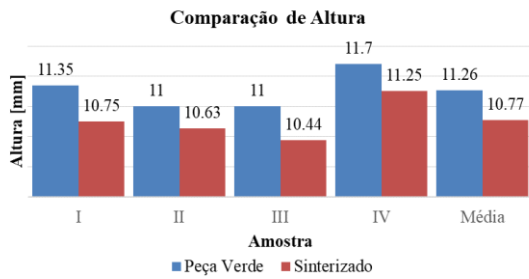


Figura 52 - Resultados de medidas de diâmetros encontradas entre peça verde e sinterizada.

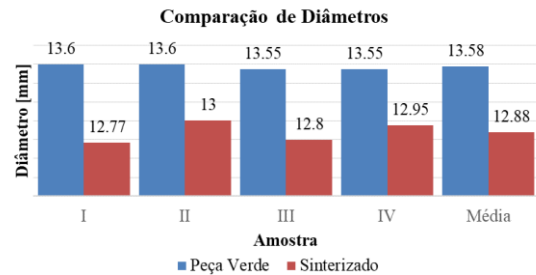


Figura 53 - Resultados de medidas de volume encontradas entre peça verde e sinterizada.

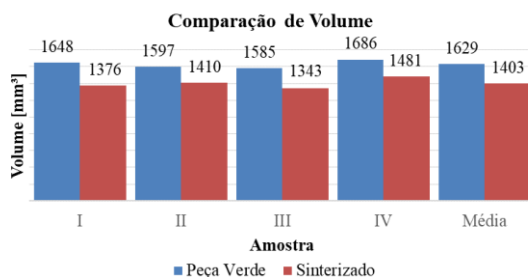


Figura 54 - Resultados de medidas de massa encontradas entre peça verde e sinterizada.

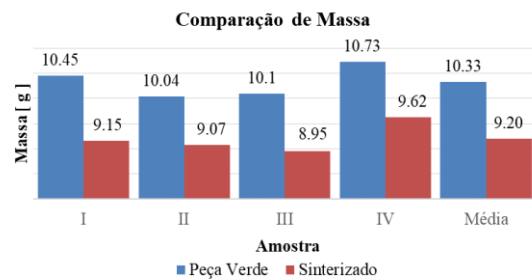


Figura 55 - Resultados de medidas de densidades encontradas entre peça verde e sinterizada.

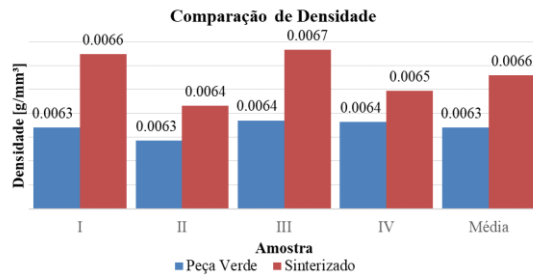
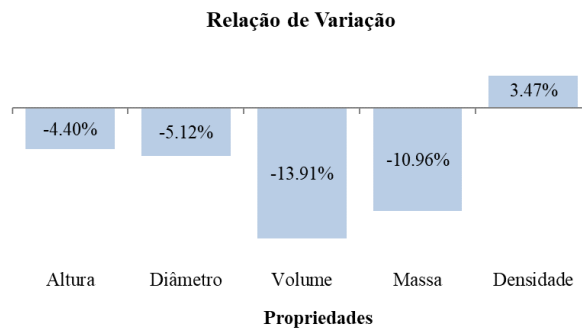


Figura 56 - Relação de variação em percentual encontradas entre peça verde e sinterizada.



Comparando os gráficos apresentados, de altura (Figura 51), diâmetro (Figura 52) e volume (Figura 53), com a ocorrência de contração das amostras, e realizando uma análise com estudos na referência bibliográfica [10,28,29], encontrou-se variação de contração entre peça verde e sinterizada, em percentual de variação de altura -4,21%, de diâmetro -1,56% e de volume -6,98%, respectivamente, e comparando com os valores encontrados neste trabalho, Figura 56, de -4,40% de variação de altura, -5,12% de variação de diâmetro e -13,91% de variação de volume.

A diferença significativa de resultados apresentados em variação de contração se dá em função de diferenças geométricas das amostras da bibliografia consultada e apresentada neste trabalho e que, segundo autores [28,29], os processos de mistura dos pós, de compactação e de sinterização, influenciam na variação da contração de peças.

A variação de massa das amostras, conforme gráfico apresentado na Figura 54, ocorreu com diminuição, em média, de 10,33 g nas peças verde e de 9,20 g para as peças sinterizadas, com uma taxa de variação de -10,96%, Figura 56, resultado que ocorre mesmo com o aumento da densidade, com a presença da fase líquida, onde o fósforo se torna distribuído de forma homogênea na peça, mas, devido à quantidade de 2% de fósforo diluído na peça que, conforme a literatura [28,29], acaba por comprometer a geometria da peça, ocasionando a retração e,

consequentemente, uma maior distorção na geometria da peça, com o surgimento de poros, conforme mostra a Figura 27 [24,57].

Conforme descreve a literatura [28,29], as ligas sinterizadas de ferro e fósforo apresentam densidade maior do que a de ferro puro, porque o fósforo na sinterização ocorre à fase líquida, ocupando, assim, os interstícios entre as partículas de pó de ferro, fazendo com que, em sua solidificação, ocorra maior contração das peças, aumentando, assim, sua densidade e diminuição geométrica.

Além disso, observa-se que, em estudos na referência bibliográfica [54], encontrou-se, na peça verde, valor médio de  $0,0065 \text{ g/mm}^3$  e, na peça sinterizada, valor médio de  $0,0069 \text{ g/mm}^3$  de densidade, ou seja, valores aproximados aos encontrados neste trabalho, de  $0,0063 \text{ g/mm}^3$  de valor médio da peça verde e de  $0,0066 \text{ g/mm}^3$  de valor médio na peça sinterizada, Figura 55, com aumento de 3,47% no percentual de densidade, Figura 56, obtendo assim, uma proximidade de valores com a literatura.

## 5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

### a) *Ensaio de dureza e compressão*

A Tabela 6 demonstra os resultados obtidos nos ensaios de dureza da liga sinterizada, de acordo com os valores da escala Rockwell B.

Tabela 6 - Corpos de prova.

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Dureza [HRB]</b>
I	99
II	89
III	96
Média	95

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos no ensaio de tensão de escoamento, sendo realizado um comparativo com as três amostras.

Tabela 7 - Tensão de escoamento obtido nas amostras.

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Tensão de Escoamento [MPa]</b>
I	565,16
II	540,37
III	533,56
Média	546,40



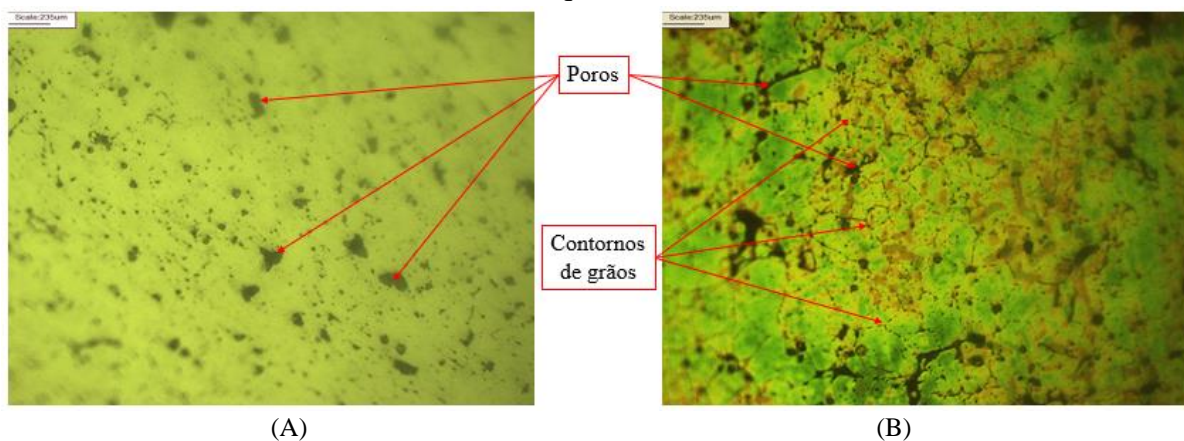
O acréscimo de fósforo permite obter as propriedades mecânicas desejadas, utilizando temperaturas menores de sinterização, devido à formação de fase líquida transiente [28,29]. O fósforo em percentuais acima de 2% confere ao ferro sinterizado elevada dureza e, conseqüentemente, um aumento da tensão de escoamento [52,53,57].

Portanto, com relação às propriedades mecânicas, a liga Fe2%P sinterizada apresenta valores superiores ao aço Fe-Si, desde liga, que são de tensão de escoamento de 337 MPa e dureza de 86 HRB, utilizados na construção dos núcleos das maiorias das máquinas elétricas rotativas [13,37,65]. Dessa forma, o material estudado atende aos parâmetros aceitáveis para utilização em núcleos do servomotor.

#### b) Ensaio de Metalografia

Através das análises metalográficas, é possível observar, na Figura 57-(A), os poros esferoidizados, representados nos pontos pretos no material, e, na Figura 57-(B), apresentam-se as linhas de contornos de grãos de ferrita uniformes e homogêneas, que, segundo a literatura, esses resultados ocorrem devido ao aumento de adição de fósforo, que resulta na esferoidização e na diminuição dos poros. Ainda, grãos de ferrita mais homogêneos e uniformes, devido à formação da fase líquida transiente durante a sinterização, sendo que, em concentrações de fósforo acima de 2%, ocorre a formação de grãos grosseiros [29,52,53,54].

Figura 57 - Imagens obtidas por metalografia para o material Fe2%P, (A) sem ataque, escala 400X, (B) ataque de nítal, escala 400X.



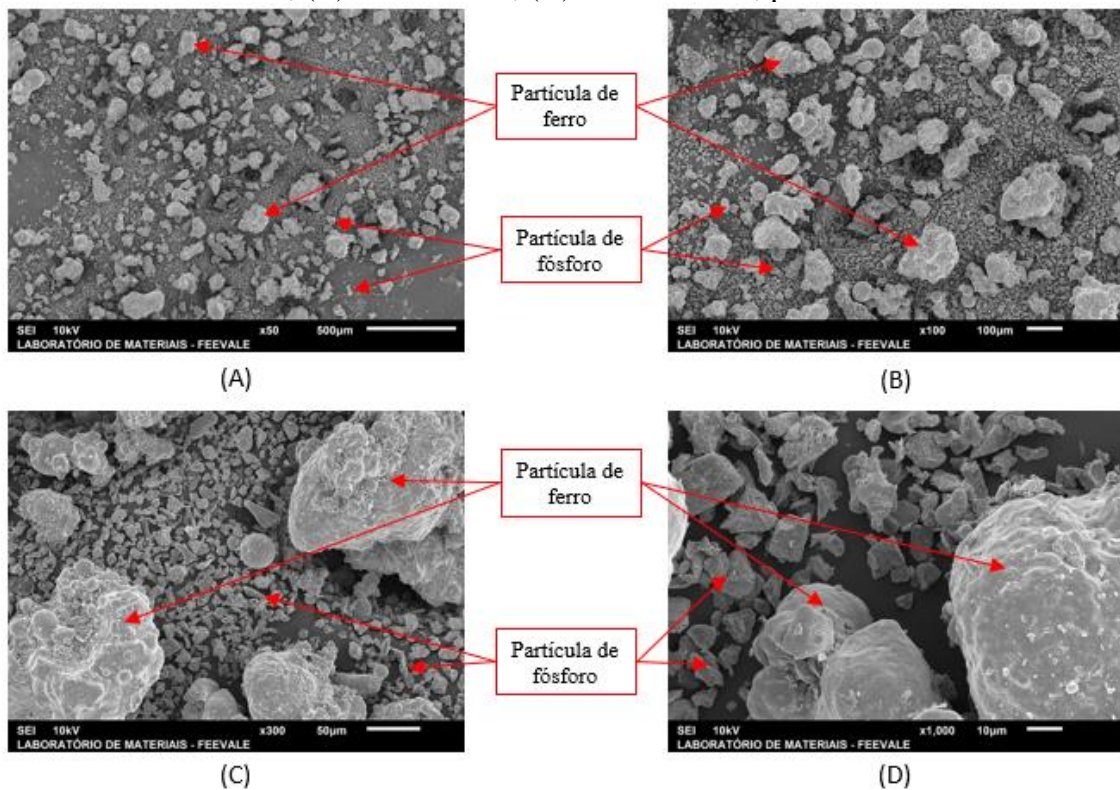
Fonte: De autoria própria.

#### c) Ensaio da Morfologia

A análise do pó do material, conforme imagens da Figura 58, demonstra que as partículas de pó de ferro possuem geometria irregular, mas arredondadas, que, segundo a

literatura, são típicas de processo de atomização à água, com tamanho de partícula entre 50  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ . Já as partículas  $\text{Fe}_3\text{P}$ , apresentam geometrias irregulares e esféricas, com tamanho dos pós variando entre perto dos 10  $\mu\text{m}$ , assim, menores do que as partículas de ferro, portanto, este tipo de formato contribui para uma boa compactação, ajudando na união mecânica das mesmas [29].

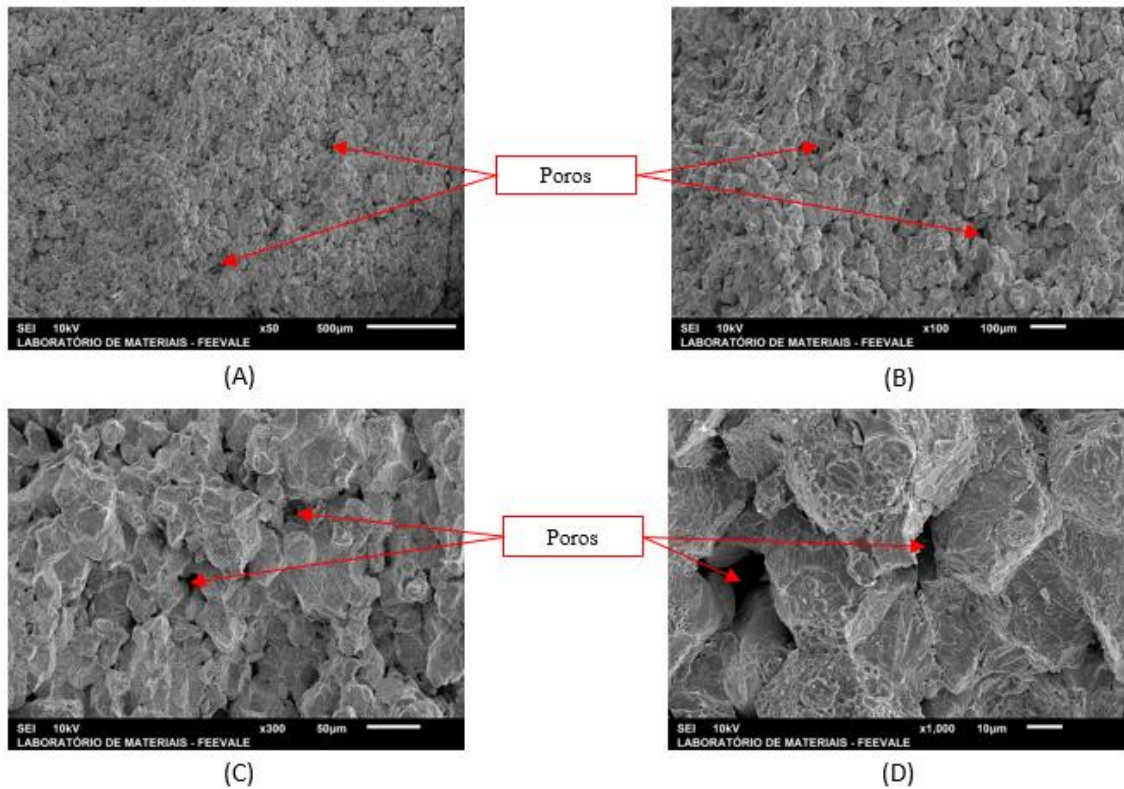
Figura 58 - Micrografias obtidas do pó metálico da mistura por MEV, (A) escala 50X, (B) escala 100X, (C) escala 300X, (D) escala 1000X, potência de 10kV.



Fonte: De autoria própria.

A análise do material sinterizado, Figura 59, demonstra o efeito da sinterização, o qual compreende a difusão das partículas compactadas próximas, formando um material denso, não sendo possível a identificação da composição de ferro e fósforo através da técnica de MEV, mas sendo possível observar a presença de porosidade na microestrutura, o que é característico dos processos da M/P, que atua como barreiras, dificultando a condutividade elétrica do material e, assim, influenciando na resistência elétrica do material [29].

Figura 59 - Micrografias obtidas do material sinterizado por MEV, (A) escala 50X, (B) escala 100X, (C) escala 300X, (D) escala 1000X, potência de 10kV.



Fonte: De autoria própria.

### 5.3 PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS

Foram obtidas as propriedades magnéticas e a resistividade elétrica dos corpos de prova estudados. A Figura 60 mostra a curva de magnetização, enquanto a Figura 61 mostra a curva de histerese, ambos da liga Fe2%P, com os valores apresentados na Tabela 8.

Figura 60 - Curva de magnetização da liga Fe2%P.

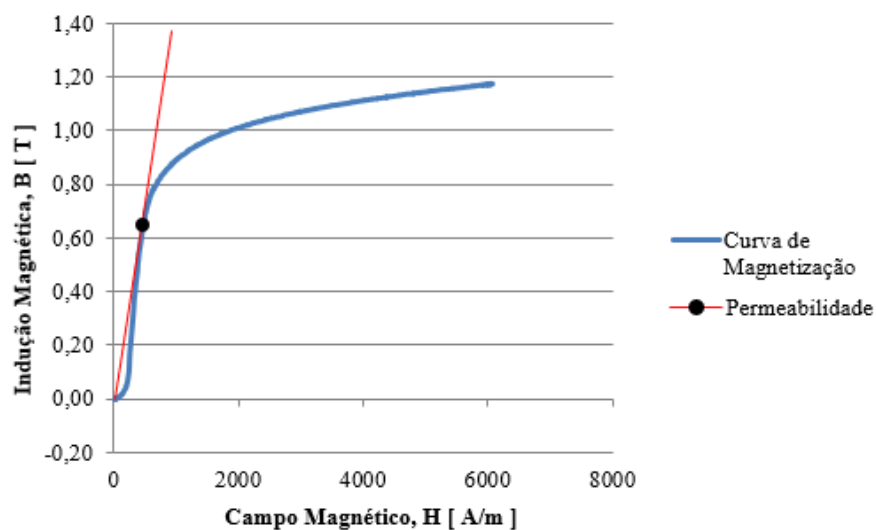
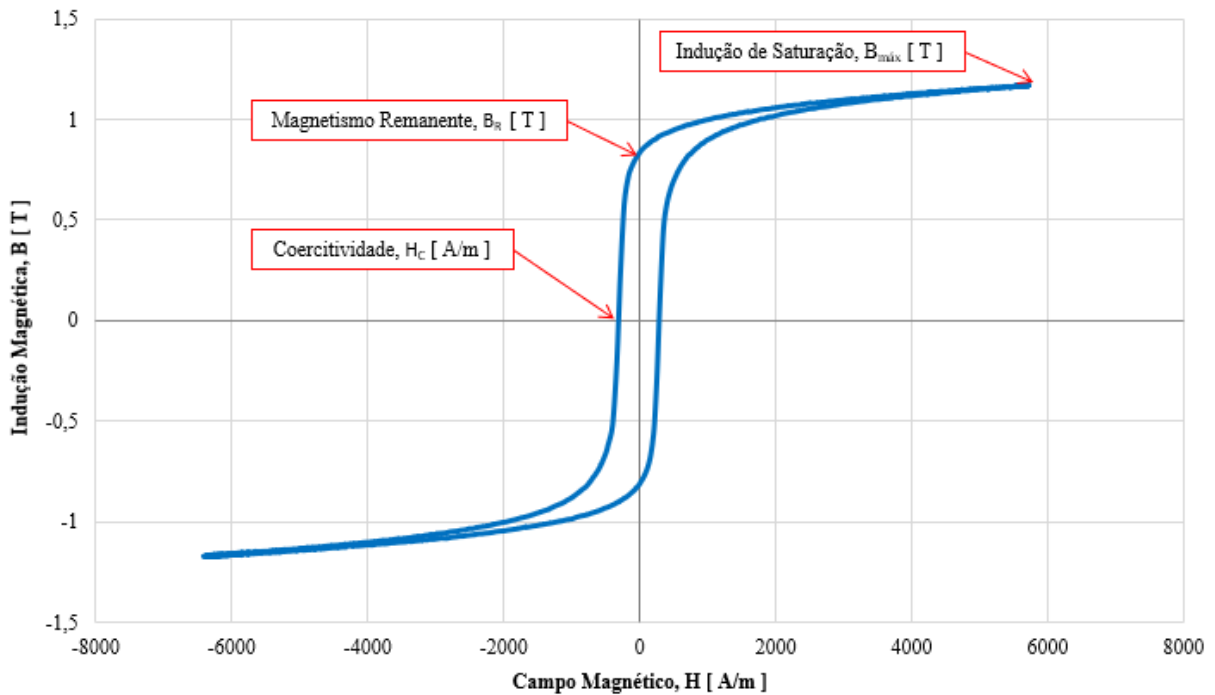


Figura 61 - Curva de histerese obtido.



A Tabela 8 apresenta os resultados das propriedades elétricas e magnéticas e das perdas por histerese observadas, a partir dos corpos de prova na forma de anel.

Tabela 8 - Propriedades elétricas e magnéticas da liga Fe2%P.

Material	Resistividade $\rho_e$ [ $\mu\Omega\text{m}$ ]	Indução de saturação B [T]	Magnetismo remanente $B_r$ [T]	Coercitividade magnética $H_c$ [A/m]	Permeabilidade magnética relativa $\mu_r$ [-]	Perdas por histerese $P_h$ [W/kg]
Fe2%P	207	1,17	0,84	306,71	2.802,3	11,59

A resistividade com a adição de fósforo tende a apresentar valores superiores em relação ao ferro baixo carbono, pois este acréscimo provoca distorções no reticulado cristalino [51,54]. Realizando uma comparação de trabalhos realizados, com o valor encontrado neste trabalho, sendo este o valor de 207  $\mu\Omega\text{m}$ , contra o valor da literatura de 0,157  $\mu\Omega\text{mm}$  do ferro puro [54,64], nota-se que o valor encontrado neste trabalho apresentou valor superior. Este valor de resistividade apresentado no ensaio com material magnético macio é fundamental para o uso em núcleo de máquinas elétricas rotativas, uma vez que, desta maneira, reduzem-se as correntes parasitas. Também, são fundamentais o valor elevado de permeabilidade magnética relativa e a indução de saturação, obtidos no ensaio de histerese, proporcionando, assim, elevado fluxo magnético no entreferro [55,57].

Em termos de indução de saturação, propriedade de grande importância para a aplicação em núcleos de máquinas elétricas, realizando uma comparação do resultado de 1,6 T [54,64], contra o valor de 1,17 T, porém menor do que núcleo em chapas formados tipicamente por ferro baixo carbono [53,54,55].

O valor de magnetismo remanente de 0,84 T apresentou valor próximo dos valores referenciais de 1,00 T obtidos [54,64] para a mesma liga.

Para o valor obtido de coercitividade de 306,71 A/m, apresenta valor superior para outras concentrações de fósforos, entre 0,45% e 3% [54,55,58,64,72]. É importante salientar que a coercitividade deve apresentar menor valor possível, pela razão de apresentar menor resistência à desmagnetização do campo magnético [3,18,19,20].

Considerando o valor de perda de  $8,64 \cdot 10^{-3}$  W/kg obtido [54,64] para a mesma liga alcançada por M/P, obteve-se um valor maior de perdas por histerese neste estudo, 11,59 W/kg, diferença que afeta o rendimento do motor elétrico [13,15,54].

A permeabilidade é a relação do campo magnético com a indução de saturação ( $B = \mu \cdot H$ ), sendo extraída da curva de histerese, não sendo uma constante, apresentando uma curva típica de cada material. A permeabilidade máxima é encontrada no ponto da curva onde a relação do campo magnético com a indução de saturação é a máxima, Figura 60, sendo designado por  $\mu_{\text{máx}}$ . Para obtenção da permeabilidade relativa, o valor foi dividido pela permeabilidade do vácuo ( $4\mu \cdot 10^{-7}$  H/m) [5,22,24]. Logo, o resultado obtido foi de 2.802,3 [-], analogamente, este valor ficou bem abaixo para os valores de trabalhos realizados com a mesma liga [54,64], porém, com estas mesmas referências citadas, valores de concentração de fósforo de 1% e 3%, apresentando valores inferiores ao apresentado neste trabalho.

De uma maneira geral, as propriedades magnéticas encontradas neste estudo apresentam melhores propriedades magnéticas em relação ao ferro puro e às ligas de silício e níquel, o que torna viável o uso desta liga na construção de núcleo do servomotor [26,55,60,73].

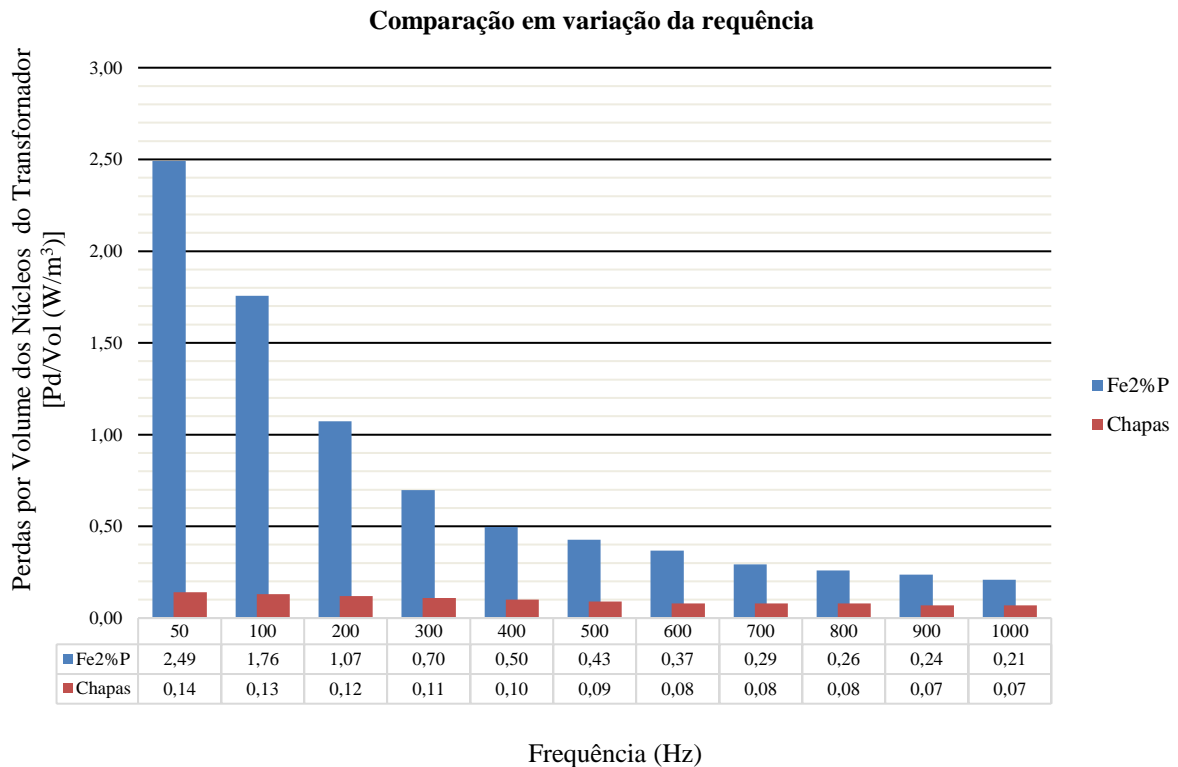
#### 5.4 ENSAIO DE PERDAS MAGNÉTICAS COM A VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA

A Figura 62 mostra as perdas do transformador obtido por M/P, com o transformador comercial em chapas e com variação da frequência, conforme descrito no item 4.5.

Analisando o gráfico das perdas em frequência, observa-se que as perdas magnéticas por correntes de Foucault e histerese, em núcleo sinterizado, diminuem drasticamente até aproximadamente 400 Hz, tendendo a uma diminuição mais estável para frequências maiores.

Em núcleo de chapas, tais perdas mantiveram-se constantes, com o aumento da frequência, o que comprova o que é encontrado nas citações bibliográficas [58].

Figura 62 - Perdas com variação da frequência.



Na avaliação das perdas observadas através do ensaio dos núcleos de transformadores, com o aumento da frequência, a tensão induzida aumenta, a corrente de magnetização diminui e, desta maneira, as perdas são menores para núcleos construídos com chapas laminadas. No entanto, para frequência 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, porém as correntes parasitas aumentam.

No núcleo sinterizado, somente a tensão induzida aumenta, a corrente de magnetização diminui e as correntes parasitas não sofrem acréscimo em seu valor, conforme citações na bibliografia [13,41,65,74]. Entretanto, estas características apresentadas por núcleos sinterizados são importantes para a aplicação em servomotores, uma vez que, como devem funcionar como motores em alta velocidade de rotação, as correntes devem apresentar alta frequência e, assim, é fundamental que haja uma diminuição das perdas nestas condições [73].

## 5.5 ENSAIOS DO SERVOMOTOR

A Tabela 9 apresenta os dados do servomotor com núcleo de Fe2%P, enquanto a Tabela 10 apresenta os dados do servomotor constituído de seu núcleo de chapas, ensaios realizados com frequências até 80 Hz aplicadas no motor de acionamento, com a transferência de rotação do motor primário para o gerador, ou servomotor, sendo que o mesmo foi projetado com quatro polos com frequência máxima de 400 Hz. As frequências foram de  $\pm 40$  Hz até  $\pm 316$  Hz nos geradores ou servomotores e sendo as lâmpadas alimentadas a 116 Hz.

Tabela 9 - Dados extraídos do ensaio do gerador com rotor e estator de Fe2%P.

Frequência do motor (Hz)	Corrente (A)	Tensão (V)	Torque (Nm)	Velocidade (rpm)	Potência Elétrica (W)	Potência no Eixo (W)	Frequência do Gerador (Hz)	Eficiência do Gerador (%)
10	0,066	22	0,486	573	2,5	29,2	38,2	8,6
20	0,087	45	0,585	1170	6,7	71,7	78,0	9,4
30	0,103	68	0,647	1750	12,1	118,6	116,7	10,2
40	0,117	90	0,714	2338	18,3	174,8	155,9	10,5
50	0,131	112	0,755	2906	25,4	229,8	193,7	11,0
60	0,143	134	0,801	3412	33,1	286,2	227,5	11,6
70	0,153	154	0,855	4073	40,8	364,7	271,5	11,2
80	0,172	175	0,884	4616	52,2	427,3	307,7	12,2

Tabela 10 - Dados extraídos do ensaio do gerador com rotor e estator de chapas.

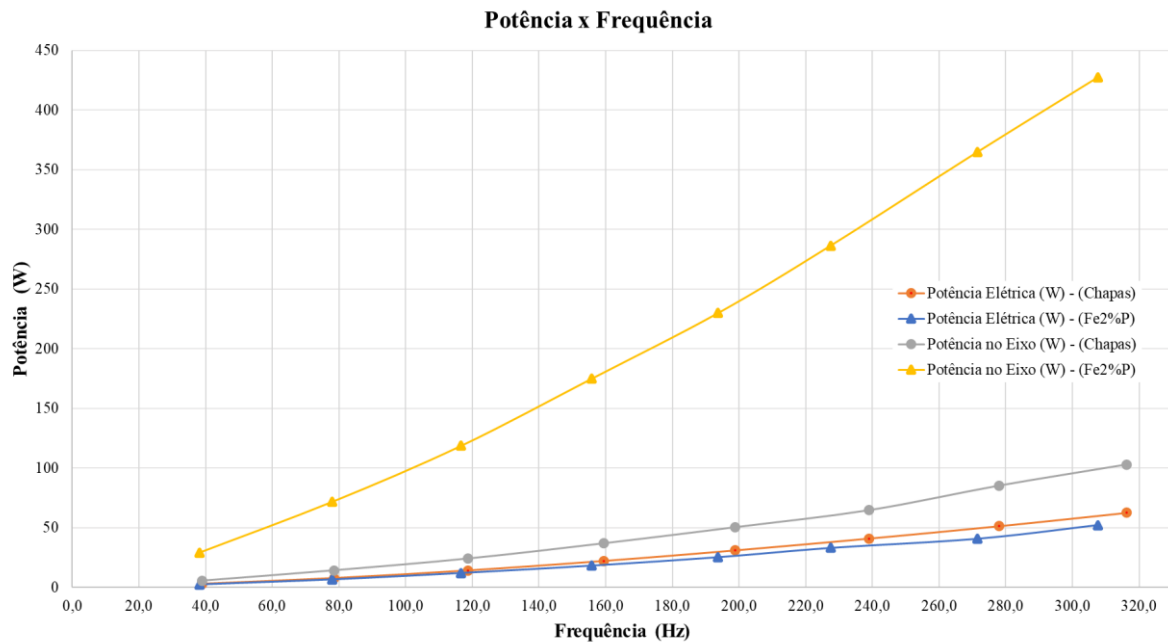
Frequência do motor (Hz)	Corrente (A)	Tensão (V)	Torque (N.m)	Velocidade (rpm)	Potência Elétrica (W)	Potência no Eixo (W)	Frequência do Gerador (Hz)	Eficiência do Gerador (%)
10	0,069	24	0,09	584	2,9	5,5	38,9	52,0
20	0,090	49	0,115	1178	7,7	14,2	78,5	54,1
30	0,109	75	0,129	1779	14,1	24,0	118,6	58,7
40	0,125	102	0,147	2390	22,1	36,8	159,3	60,0
50	0,140	128	0,161	2983	31,0	50,3	198,9	61,6
60	0,153	154	0,172	3585	40,9	64,6	239,0	63,4
70	0,166	179	0,195	4171	51,3	85,2	278,1	60,3
80	0,177	204	0,207	4745	62,5	102,9	316,3	60,8

Analisando as Tabelas 9 e 10, observa-se que, para uma mesma frequência atribuída ao motor primário, a corrente, a tensão e a velocidade se aproximam, para ambos servomotores. Para valores de torque, o servomotor de Fe2%P apresentou valores entre quatro e cinco vezes em comparação ao servomotor de chapas, demonstrando que há uma resistência mecânica e exigindo uma maior potência no eixo do motor de acionamento, indicando que existe a presença

de correntes parasitas no núcleo de Fe2%P e, como as correntes parasitas funcionam como resistência mecânica no gerador, quanto maior a circulação delas, maior é a força necessária para movimentar o gerador [10,54].

Para melhor visualização, a Figura 63 apresenta uma comparação entre potência elétrica e potência no eixo, em relação à frequência em cada gerador.

Figura 63 - Comparação entre potência elétrica em relação à frequência dos geradores.



No gerador de Fe2%P, para uma potência elétrica de 2,5 W, foi necessária potência de 29,2 W no eixo, aproximadamente doze vezes o valor da potência elétrica. Quando a máquina atingiu 427,3 W de potência no eixo, o gerador estava produzindo 52,2 W de potência elétrica, uma diferença de aproximadamente oito vezes. Observou-se que há uma redução da diferença entre a potência elétrica gerada, conforme aumenta-se a frequência de operação.

No entanto, no gerador de chapas, é possível observar que, para diferentes potências elétricas geradas e frequências, foi necessário aproximadamente o dobro de potência mecânica no eixo do gerador. Realizando uma comparação, é notável que o gerador de Fe2%P exige maior potência mecânica para gerar a mesma potência elétrica que o gerador de chapas.

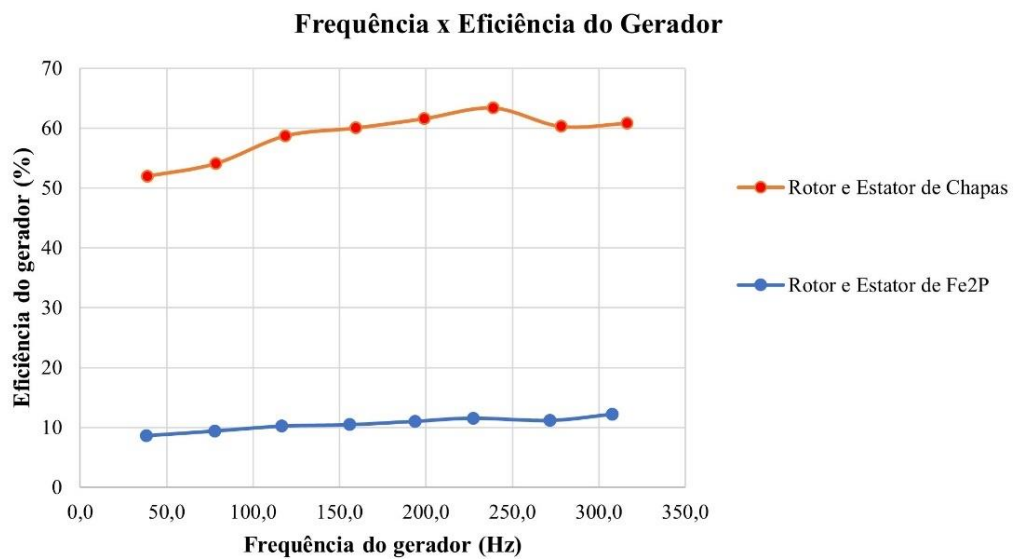
Resultados de ensaios de perdas por volume em relação à frequência (item 5.4) demonstraram que as perdas por correntes parasitas são maiores em frequências abaixo de 400 Hz, por comparação de volume entre núcleos de Fe2%P e chapas, e que, conforme aumenta a frequência, as correntes parasitas diminuem no núcleo do motor, através do aumento da tensão induzida nas bobinas, com isso, gerando a força contra eletromotriz. Apesar da liga de Fe2%P



demonstrar resistência elétrica maior, em relação ao ferro puro (ver item 5.3), ainda é baixa quando comparada a chapas isoladas. Isso acontece porque as chapas isoladas apresentam um menor volume em comparação a núcleo de Fe2%P, assim sendo, circulam correntes menores entre si, reduzindo as correntes parasitas [6,10].

A Figura 64 mostra a relação entre frequência e eficiência dos geradores constituídos de estator e rotor de Fe2%P e chapas. O núcleo de Fe2%P teve eficiência menor em todas as faixas de frequência ensaiadas. Estes resultados, possivelmente, se deram pelo fato de o núcleo de Fe2%P produzir maior volume de correntes parasitas, ou seja, maiores perdas. Um meio físico de verificação desta hipótese foi a constatação de que o gerador com núcleo de Fe2%P sofreu expressivo aquecimento da carcaça, enquanto o gerador com núcleos de chapa não sofreu aparente aquecimento dessa parte.

Figura 64 - Dados de frequência e eficiência entre servomotor de Fe2%P e Chapas.



## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento de um servomotor com núcleo formado por liga de ferro, com adição de 2% de fósforo via  $\text{Fe}_3\text{P}$ , manufaturado por M/P, que se realizou por análise das propriedades físicas, mecânicas, magnéticas e elétricas.

Com relação às propriedades mecânicas da liga estudada, a adição de fósforo no ferro promoveu o aumento da dureza e da resistência mecânica na amostra estudada, devido ao fato de que o acréscimo de fósforo acima de 1% efetiva a formação da fase líquida transiente na sinterização, porém, favorecendo o aumento da ductilidade e, conseqüentemente, a diminuição na tensão de escoamento do material.

Conforme observado nas metalografias na liga  $\text{Fe}_2\text{P}$ , com a adição de fósforo, ocorre o aumento dos grãos de ferrita. Isto acarreta propriedades magnéticas superiores, pois uma microestrutura formada por ferrita, sem a presença de contornos de grãos grosseiros, é a mais indicada para se obter os melhores resultados de histerese e magnetização para materiais ferrosos magnéticos macios.

A adição de fósforo no ferro aumentou consideravelmente a resistividade elétrica na liga, sendo um fator importante na redução de perdas magnéticas. A resistividade foi de  $207 \mu\Omega\text{m}$ , valor superior ao encontrado no aço baixo carbono, mesmo material utilizado em núcleos de motores. A redução das correntes induzidas pode ser interpretada como um aumento da resistência elétrica do material, uma vez que são grandezas físicas inversamente proporcionais. Portanto, quanto maior a resistividade do material, menores são as correntes induzidas e as perdas por correntes parasitas.

Em relação às propriedades magnéticas encontradas, a liga  $\text{Fe}_2\text{P}$  apresentou permeabilidade relativa de 2.802,3 [-] e indução de saturação de 1,17 T, que, segundo a literatura, são valores maiores obtidos em relação ao aço baixo carbono. A coercitividade de 306,71 A/m e o magnetismo remanente de 0,84 T e perdas por histerese encontradas são divergentes com os descritos na literatura sobre material sinterizado com a mesma liga, não tendo sido encontrado o motivo para tal divergência.

O ensaio de perdas magnéticas no material sinterizado apresentou resultados equivalentes aos das chapas laminadas em frequências elevadas. A liga  $\text{Fe}_2\text{P}$  apresentou melhor conjunto de propriedades magnéticas, conforme a literatura. Desta forma, pode ser aplicada em casos específicos, como em motores de elevada frequência, minimotores e em servomotores, demonstrando, assim, a capacidade da M/P como alternativa aos processos atuais

de fabricação de núcleos magnéticos de motores elétricos, com a obtenção de menores custos e a redução de etapas de fabricação.

Os resultados apresentados na simulação do servomotor, funcionando como gerador na banca, demonstram que o servomotor com a liga de Fe<sub>2</sub>P apresentou resultados não satisfatórios, pois demonstrou perdas por correntes parasitas, ocasionando eficiência inferior em relação ao servomotor constituído de chapas. Para tal motivo, se deve que o servomotor projetado apresentou a presença de correntes parasitas e que, segundo o ensaio de perdas por volume em relação à frequência, observou-se que as perdas magnéticas por correntes parasitas são maiores em frequências abaixo de 400 Hz em núcleo sinterizado, tendendo a uma diminuição mais estável para frequências maiores, através do aumento da tensão induzida nas bobinas, com isso, gerando a força contra eletromotriz.

Com base nos resultados encontrados no desenvolvimento da liga Fe<sub>2</sub>P para materiais magnéticos macios sinterizados, visando a substituição das chapas laminadas utilizadas em núcleo de motores elétricos, não ocorreu como esperado no ensaio de banca. A liga estudada apresentou perdas por correntes parasitas, não sendo indicada a possibilidade de aplicação para núcleos de servomotores de até 400 Hz.

## 7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Apresentam-se, a seguir, algumas sugestões para trabalhos futuros sobre esse tema:

- construir um núcleo de motores elétricos com o Fe<sub>2</sub>P com camada isolante, visando a diminuição das correntes parasitas apresentadas neste trabalho;
- desenvolver novos materiais, na forma de SMC, os quais possuam isolação elétrica a base de óxidos entre as partículas de ferro, diminuindo as perdas por correntes parasitas;
- realizar testes em motores elétricos com frequência acima de 400 Hz, com núcleo e estator com Fe<sub>2</sub>P, pois, conforme constatado neste trabalho e em referências bibliográficas, com o aumento da frequência as perdas de núcleo se instabilizam;
- refazer o projeto do rotor com a liga Fe<sub>2</sub>P, em núcleos divididos em mais de quatro partes, com o objetivo de estudar como as correntes parasitas se comportam em volumes menores, em cada parte do núcleo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. TOSHITAKA ISHIZAKI, HIDEYUKI NAKANO, SHIN TAJIMA AND NAOKO TAKAHASHI, **Improving Powder Magnetic Core Properties via Application of Thin, Insulating Silica-Nanosheet Layers on Iron Powder Particles**, nanomaterials, MDPI, 2016. 13 p.
- [2]. HIJIRI TSURUTA, TOMOYUKI UENO, KOUJI YAMADA, **Development of Low Iron Loss Soft Magnetic Powder Core**, J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, Vol. 63, No. 7, 2015. 643-646 p.
- [3]. FIORILLO FAUSTO, M. PASQUALE, APPINO CARLO, **Soft Magnetic Materials**, INRIM Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, 1999. 43 p.
- [4]. B.V. NEAMȚU, M. NASUI, T.F. MARINCA, F. POPA, I. CHICINAȘ, **Soft magnetic composites based on hybrid coated Fe-Si nanocrystalline powders**, Surface & Coatings Technology. 330, 2017. 219-227 p.
- [5]. H. SHOKROLLAHI, K. JANGHORBAN, **Soft magnetic composite materials (SMCs)**, Journal of Materials Processing Technology 189, 2007. 12 p.
- [6]. M.M. DIAS, H.J. MOZETIC, J.S. BARBOZA, R.M. MARTINS, L. PELEGRINI, L. SCHAEFFER, **Influence of resin type and content on electrical and magnetic properties of soft magnetic composites (SMCs)**, Powder Technol. 237,2013. 213-220p.
- [7]. GUOLIANG ZHAO, CHEN WU, MI YAN, **Enhanced magnetic properties of Fe soft magnetic composites by surface oxidation**, Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 399, 2016. 51-57 p.
- [8]. Product catalog: Somaloy, URL: <http://www.hoganas.com/en/products>, Höganäs AB, Höganäs, Sweden. Consulta realizada em 15/04/2020.
- [9]. GUIMARÃES. F.R. **Desenvolvimento de uma máquina síncrona trifásica com ímãs de Nd-Fe-B e núcleo do estator a partir de Fe2%P sinterizado aplicado em aerogerador de 1kW**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. 63 p.
- [10]. BITTENCOURT, S. D. **Caracterização de ligas magnéticas sinterizadas para aplicação em núcleos de máquinas elétricas rotativas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. 90 p.
- [11]. WEG. **Sevoacionamentos: Guia de Especificação**. Rev. 12, 2013. 194p.

- [12]. HANSELMAN, D. C. **Brushless Permanent Magnet Motor Design**, 2. Ed. USA; Ohio, Magna, 2006. 411 p.
- [13]. FITZGERALD, A.E. KINGSLEY, CHARLES JR. UMAS, STEPEHEN D. **Máquinas Elétricas**, 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 657 p.
- [14]. CARVALHO, G. **Máquinas Elétricas: Teoria e Ensaio**s. 4. ed. Érica, 2011. 264 p.
- [15]. CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**, 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 698 p.
- [16]. <https://www.citisystems.com.br/servo-motor/>, consulta realizada no dia 07/05/2020.
- [17]. KRAUS, J.D. & CARVER, K.R. **Electromagnetics**. McGraw Hill Inc. 1973. 343 p.
- [18]. CULLITY, B. D. GRAHAM, C. D. **Introduction of Magnetic Materials**. John Wiley & Sons, Inc., Publication, USA; New Jersey, 2009. 550 p.
- [19]. GRIFFITHS, D. J.; COLLEGE, R. **Introduction to Electrodynamics**. USA; New Jersey, v. 4, 2013. 613 p.
- [20]. LALL, C. **Soft magnetism, Fundamentals for powder metallurgy and metal injection molding**. Princeton, New Jersey. Metal Powder Industries Federation, 1992. 139 p.
- [21]. SKARRIE, H. **Design of Powder Core**. Lund University, 2001. 161 p.
- [22]. FIORILLO, F. **Characterization and Measurement of Magnetic Materials**., 1 ed. Torino. Elsevier Inc., 2004. ISBN 0-12-257251-7. 666 p.
- [23]. ASM HandBook, **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, Volume 2, 1992. 3470 p.
- [24]. JILES, D. **Introduction to Magnetismo and Magnetic Materials**. London, Chapman and Hall, 1991. 440 p.
- [25]. LANDGRAF, F.J.G., RODRIGUES D. **Materiais Magnéticos Produzidos por M/P**. Artigo de Publicação Interna – IPT. São Paulo. 1999.
- [26]. FIORILLO, **Magnetic Materials for Electrical Application: a review**: INRIM, Technical report, 2010. 124 p.
- [27]. FERREIRA, José M.G. de Carvalho; **Tecnologia da Pulverometalurgia**, Lisboa: 2002.
- [28]. CHIAVERINI, Vicente; **Metalurgia do pó: técnica e produtos**, 4°. ed. São Paulo: 2001. 358 p.
- [29]. GERMAN, R.M. **Powder Metallurgy Science**, Princeton, New Jersey. 1984.
- [30]. VLACK, L. H. V. **Princípio de Ciência dos Materiais**, S. Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1970. 427p.

- [31]. LUBORSKY, F. E.; LIVINGSTON, J. D.; CHIN, G. Y. **Magnetic Properties of Metals and Alloys**. Physical Metallurgy. Amsterdam: Elsevier Science, 1996.
- [32]. LALL, C.; BAUM, L. W. High Performance Soft Magnetic Components by Powder Metallurgy and Metal Injection Molding. **Modern Developments in P/M**, v. 18, 1998. 363-389p
- [33]. POPOV, Z. P.; RATCHEV, T. L.; YANKOV, Y. **The influence of Boron Additives on the Magnetic and Electrical Properties of PM Fe-Si-Cr-P Soft Magnetic Material**, Advances in Powder Metallurgy, v. 5, 1991. 189-193p.
- [34]. MOYER, K. H. **The Effect of Proposity on the Properties of Iron Compacts**. Riverton, N.J. Hoeganes Corporation, 1980.
- [35]. JAMES, B. A.; WILLIAMS, G. **Review of the Magnetic Properties of Sintered Iron**. Powder Metallurgy, v. 22, n. 2, 1979. 75-85p.
- [36]. 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, 677-681p.
- [37]. AÇOS ELÉTRICOS. **Grão não Orientado**. Artigo de Circulação Interna da ACESITA, 1993.
- [38]. LALL, C. **The effect Sintering Temperature and Atmosphere on the Soft Magnetic Properties of P/M Materials**, Advances in Power Metallurgy, v.3, 1992.
- [39]. LENEL, F.V. Magnetic Applications. Metals Handbook, v.7, 1984. 638-641p.
- [40]. BAS, J.A., PUIG, J., MOLINS, C.B. Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art. Modern Developments in Power Metallurgy, Princeton, New Jersey. Metal Power Industries Federation, v.18, 1988. 745-756p.
- [41]. KRAUSE, R. F.; BULARZIK, J. H.; KOKAL, H. R. **New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications**. Magnetics Inc, Burns Harbor, IN, USA. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 6, n. 6, Dec. 1997, p. 710-712p.
- [42]. ITOH, Y.; TAKEDA, Y.; KUROISHI, N. **AC Magnetic Properties of New Fe—Si Sintered Alloy**. Modern Developments in Powder Metallurgy. v. 17. Special Materials, Toronto, Canada, 17-22 June 1984. Metal Powder Industries Federation, 105 College Rd. East, Princeton, New Jersey 08540, USA, 1985. 641-655p.
- [43]. FRAYMAN, L. L.; RYAN, D. R.; RYAN, J. B. **Modified P/M Soft Magnetic Materials for Automotive Applications**, The International Journal of Powder Metallurgy, v. 34, n.7, 1998. 31-39p.

- [44]. ANISIMOVA, E. A.; OLEINIKOV, A. M.; SERDYUK, G. G. **Powder Materials with Specified Electrical and Magnetic Properties for Heavy and Two-Layer Rotors of Asynchronous Motors**. Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics (English translation of Poroshkovaya Metallurgiya), v.29, n.9, Feb 1991. 741-744p.
- [45]. PERSSON, M., JANSSON, P., JACK, A.G., MECROW, B.C. **Soft Magnetic Composite Materials - Use for Electrical Machines**. IEE Conference, Publication n.412, 1995. IEE, Stevenage, Engl. 242-246p.
- [46]. ENESCU, E., SOPTEA, E., GAVRILIU, S., CRISTESCU, E. **New Composite Materials Based on Iron for Soft Magnetic Cores**. Cercet. Metal. Mater. (Metall. New Mater. Res.), II, (3), 2014. 69-78p.
- [47]. PERSSON, M., JANSSON, P. **Advances in Power Metallurgy Soft Magnetic Composite Materials for Electrical Machines**. IEE Colloquium (Digest), n.234, 1995. IEE, Stevenage, Engl. 4/1-4/6p.
- [48]. JACK, A.G. **Impact of New Materials on the Design of Electrical Machines**. IEE Colloquium (Digest) n 234, 1995. IEE, Stevenage, Engl. 1/1-1/5p.
- [49]. JACK, A. G., MECROW, B.C., MADDISON, C.P., WAHAB, N.A. **Claw Pole Armature Permanent Magnet Machines Exploiting Soft Iron**. IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, IEMDC, 1997. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 97TH8282. MA1 5.1-5.3p.
- [50]. JANSSON, P. **Soft Magnetic Materials for AC Applications**. Hoeganes A. B. Hoeganes Swed, Powder Metallurgy, v. 35, n. 1, 1992, 63-66p.
- [51]. ASM Metals Handbook. **Alloy Phase Diagrams**. ASM International, v. 3, 1992. 2-48 p.
- [52]. ASM Metals Handbook. **POWDER METALLURGY & APPLICATION**. ASM International, v. 7, 1146 p.
- [53]. ASSIS, A. S., **A Influência do Fosfeto de Ferro como Promovedor de Fase Líquida em Ligas Metálicas**. 2010 Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2010.
- [54]. BITTENCOURT, S. D.; ITO, D. K.; MATTOS, M. D.; AQUIM, P. M.; MARTINS, R, M.; SCHAEFFER, L. **Estudo da Influência do Teor De Fósforo nas Propriedades Magnéticas do Ferro Obtidas por Metalurgia do Pó**. Revista de Engenharia e Tecnologia, ISSN 2176-7270, V.8, No 3, Pág. 92, 2016. 12 p.
- [55]. HANEJKO, F. G. *et al.* **Effects of Processing and Materials on Soft Magnetic Performance of Powder Metallurgy**, Hoeganaes Corporation, 1992. 26 p.



- [56]. FRAYMAN, L. L.; RYAN, D. R.; RYAN, J. B. **Modified P/M Soft Magnetic Materials for Automotive Applications**, The International Journal of Powder Metallurgy, v. 34, n.7, 1998. 31-39 p.
- [57]. CHUANG, M. -S. *et al.* **Effects of Phosphorus Addition on the Magnetic Properties of Sintered Fe-50 wt.% Ni Alloys**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 12, 2003. 23-28 p.
- [58]. CHAURASIA. S. K, PRAKASH.UJJWAL, MISRA. P.S, CHANDRA. K, **Development of P/M Fe-P soft magnetic materials**. Bull. Mater. Sci., Vol. 35, No. 2, April 2012, 191-196 p.
- [59]. ASTM E18. **Standard methods for Rockwell hardness and Rockwell superficial hardness of metallic materials**. 39 p.
- [60]. ASTM E9. **Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature**. 10 p.
- [61]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A773/A773M-14: standard test method for direct current magnetic properties of low coercivity magnetic materials using hysteresigraphs**. West Conshohocken: ASTM International; 2014. [http://dx.doi.org/10.1520/A0773\\_A0773M-14](http://dx.doi.org/10.1520/A0773_A0773M-14). 12 p.
- [62]. BOYLESTAD, R.L., NASHESKY, L. **Electronic Devices and Circuit Theory**. New Jersey, Prentice Hall, 2009. 894 p.
- [63]. ASTM A712-14. **American Standard Test Method for Electrical Resistivity of Soft Magnetic Alloys**.
- [64]. BITTENCOURT, S. D.; SCHAEFFER, L.; DIAS, M. M. **Ligas Magnéticas Sinterizadas Usadas em Máquinas Elétricas Rotativas**. 1. ed. Porto Alegre: Novas Edições Acadêmicas, 2015. 105 p.
- [65]. NASAR, S.A. **Máquinas Elétricas**. São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1984. 216 p.
- [66]. FITZGERALD, A.E., KINGSLEY Jr., C. & KUSKO, A. **Máquinas Elétricas**. S. Paulo, McGraw Hill do Brasil, 1973. 621p.
- [67]. KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Editora Globo: 2006. 667 p.
- [68]. <https://www.seinstrumentos.com.br/> - Acessado em 25/04/2020.
- [69]. <https://tholz.com.br/industriais/vrg/> - Acessado em 02/05/2020.
- [70]. <https://www.viewtech.ind.br/transformador-de-corrente-msq-30-1005-classe-1> - Acessado em 24/04/2020.
- [71]. <http://www.mkcontrole.com.br/a-empresa> - Acessado em 24/04/2020.

- [72]. DIAS, M. D. M.; MARTINS, R. M.; AQUIM, P. M.; BITTENCOURT, S. D.; PAULETTI, P.; SCHAEFFER, L.; **Aplicação de Materiais Magnéticos Macios Sinterizados em Máquinas Elétricas Rotativas Síncronas**. Tecnologia e Tendências, Novo Hamburgo, 2014. 29 p.
- [73]. BRADBURY, S. **Powder Metallurgy Equipament Manual**. New Jersey, USA, MPIF, 1986. 199 p.
- [74]. HANEJKO, F.G.; ELLIS, G.W.; HALE, T.J. **Application of high performance material processing: electromagnetic products**. Las Vegas: Hoeganaes Corporation, Presented at PM2TEC, 1998. 16 p.

## APÊNDICE A – TABELA DE ENSAIO DE PERDAS EM FREQUÊNCIA – CHAPAS

Tabela 11 - Ensaio de perdas - Chapas

Frequência [Hz]	Tensão [V]	Corrente [mA]	Ângulo [graus]	Papa [VA]	Pat [W]	Preat [VAR]	Rt [Ω]	Xt [Ω]	V [V]	I [A]	Ângulo [graus]	Papa [VA]	Pat [W]	Preat [VAR]	Rx + R1 [Ω]	P(Rx+R1) [W]	PRn [W]	Volume [m <sup>3</sup> ]	Pd/Vol [W/m <sup>3</sup> ]
50	6,12	840	25,20	5,14	4,65	2,19	6,59	3,10	6,00	0,82	41,68	4,94	3,69	3,29	2,00	1,36	2,33	1,00	2,33
100	5,56	560	29,52	3,11	2,71	1,53	8,64	4,89	6,00	0,60	50,40	3,63	2,31	2,79	2,00	0,73	1,58	1,00	1,58
200	5,20	384	32,40	2,00	1,69	1,07	11,43	7,26	6,00	0,44	58,85	2,66	1,38	2,28	2,00	0,39	0,98	1,00	0,98
300	5,08	312	33,75	1,58	1,32	0,88	13,54	9,05	6,00	0,37	65,45	2,21	0,92	2,01	2,00	0,27	0,65	1,00	0,65
400	4,96	268	36,00	1,33	1,08	0,78	14,97	10,88	6,00	0,32	69,80	1,95	0,67	1,83	2,00	0,21	0,46	1,00	0,46
500	4,94	240	40,50	1,19	0,90	0,77	15,65	13,37	6,00	0,29	71,05	1,75	0,57	1,65	2,00	0,17	0,40	1,00	0,40
600	4,94	216	41,71	1,07	0,80	0,71	17,07	15,22	6,00	0,26	72,44	1,57	0,47	1,50	2,00	0,14	0,34	1,00	0,34
700	4,93	200	42,50	0,99	0,73	0,67	18,17	16,65	6,00	0,24	74,57	1,46	0,39	1,41	2,00	0,12	0,27	1,00	0,27
800	4,92	186	43,55	0,92	0,66	0,63	19,17	18,22	6,00	0,23	75,48	1,36	0,34	1,32	2,00	0,10	0,24	1,00	0,24
900	4,92	168	45,49	0,83	0,58	0,59	20,53	20,88	6,00	0,20	76,15	1,23	0,29	1,19	2,00	0,08	0,21	1,00	0,21
1K	4,92	150	50,40	0,74	0,47	0,57	20,91	25,27	6,00	0,18	77,04	1,10	0,25	1,07	2,00	0,07	0,18	1,00	0,18

Tabela 12 - Perdas em frequência - Chapas

Frequência [Hz]	Pd/Vol [W/m <sup>3</sup> ]
50	2,33
100	1,58
200	0,98
300	0,65
400	0,46
500	0,40
600	0,34
700	0,27
800	0,24
900	0,21
1K	0,18

## APÊNDICE B – TABELA DE ENSAIO DE PERDAS EM FREQUÊNCIA – FE2%P

### Tabela 13 - Ensaio de perdas - Fe2%P

Frequência [Hz]	Tensão [V]	Corrente [mA]	Ângulo [graus]	Papa [VA]	Pat [W]	Preat [VAR]	Rt [Ω]	Xt [Ω]	V [V]	I [A]	Ângulo [graus]	Papa [VA]	Pat [W]	Preat [VAR]	Rx + R1 [Ω]	P(Rx+R1) [W]	PRn [W]	Volume [m <sup>3</sup> ]	Pd/Vol [W/m <sup>3</sup> ]
50	5,85	996	16,36	5,83	5,59	1,64	5,64	1,65	6,00	1,02	41,68	6,13	4,58	4,08	2,00	2,09	2,49	1,00	2,49
100	5,99	766	19,80	4,59	4,32	1,55	7,36	2,65	6,00	0,77	50,40	4,60	2,93	3,55	2,00	1,18	1,76	1,00	1,76
200	6,06	524	22,50	3,18	2,93	1,22	10,68	4,43	6,00	0,52	58,85	3,11	1,61	2,66	2,00	0,54	1,07	1,00	1,07
300	6,08	430	23,18	2,61	2,40	1,03	13,00	5,57	6,00	0,42	65,45	2,55	1,06	2,32	2,00	0,36	0,70	1,00	0,70
400	6,01	376	23,88	2,26	2,07	0,91	14,62	6,47	6,00	0,38	69,80	2,25	0,78	2,11	2,00	0,28	0,50	1,00	0,50
500	6,12	340	24,55	2,08	1,89	0,86	16,37	7,48	6,00	0,33	71,05	2,00	0,65	1,89	2,00	0,22	0,43	1,00	0,43
600	6,12	313	24,86	1,92	1,74	0,81	17,74	8,22	6,00	0,31	72,44	1,84	0,56	1,76	2,00	0,19	0,37	1,00	0,37
700	6,13	292	25,17	1,79	1,62	0,76	19,00	8,93	6,00	0,29	74,57	1,71	0,46	1,65	2,00	0,16	0,29	1,00	0,29
800	6,13	275	25,63	1,69	1,52	0,73	20,10	9,64	6,00	0,27	75,48	1,62	0,40	1,56	2,00	0,14	0,26	1,00	0,26
900	6,14	261	25,95	1,60	1,44	0,70	21,15	10,29	6,00	0,26	76,15	1,53	0,37	1,49	2,00	0,13	0,24	1,00	0,24
1K	6,14	249	26,23	1,53	1,37	0,68	22,12	10,90	6,00	0,24	77,04	1,46	0,33	1,42	2,00	0,12	0,21	1,00	0,21

### Tabela 14 - Perdas em frequência - Fe2%P

Frequência [Hz]	Pd/Vol [W/m <sup>3</sup> ]
50	2,49
100	1,76
200	1,07
300	0,70
400	0,50
500	0,43
600	0,37
700	0,29
800	0,26
900	0,24
1K	0,21

## ANEXO A – FICHA TÉCNICA DO PÓ DE FERRO

Höganäs 

## ASC100.29

The most widely used atomised iron powder with very high compressibility and good dimensional stability frequently found in WT parts.

## Typical data

Apparent density, g/cm <sup>3</sup>	Flow, sec/50g
2.98	25

## Sieve analysis, %

+ 212 µm	0
+ 150 µm	7
- 45 µm	23

Compressibility, g/cm<sup>3</sup>

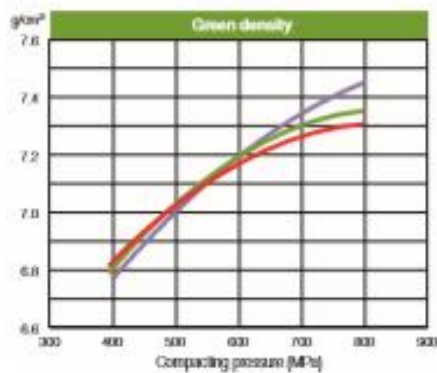
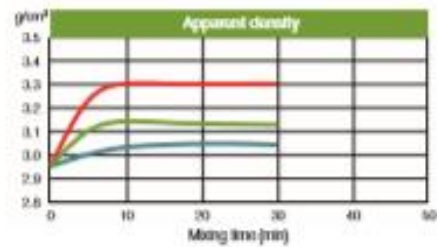
Compacting pressure	Lubricated die	0.0% Konolube®	0.8% Zn-st
400 MPa	6.77	6.79	6.82
600 MPa	7.20	7.19	7.17
800 MPa	7.45	7.36	7.31

## Green strength, MPa

Compacting pressure	Lubricated die	0.0% Konolube	0.8% Zn-st
400 MPa	21	14	9
600 MPa	34	21	14
800 MPa	50	24	16

## Chemical analysis, %

Carbon	<0.01
O-tot	0.08



— Lubricated die  
— 0.0% Amido-wax  
— 0.0% Konolube  
— 0.0% Zn-steroxide

[www.hoganas.com/pmc](http://www.hoganas.com/pmc)