

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

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA COM ÍMÃS
PERMANENTES E NÚCLEO SINTERIZADO UTILIZADA EM
AEROGERADOR

LUCIANO LOHMANN CERVA

Tese para a obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre

2014

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

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA COM ÍMÃS
PERMANENTES E NÚCLEO SINTERIZADO UTILIZADA EM
AEROGERADOR

LUCIANO LOHMANN CERVA
Engenheiro Eletricista

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

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre

2014

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

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Lírio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Moisés de Mattos Dias
ICET / FEEVALE

Prof. Dr. Vicente Mariano Canalli
FENG / PUCRS

Prof. Dr. Ricardo Martins de Martins
ICET / FEEVALE

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE QUADROS	10
LISTA DE ABREVIATURAS.....	11
LISTA DE SÍMBOLOS.....	12
RESUMO.....	14
ABSTRACT	15
1. INTRODUÇÃO.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. GERADORES SÍNCRONOS TRIFÁSICOS.....	18
2.1.1. INTRODUÇÃO	18
2.1.1.1. GERADOR SÍNCRONO COM ÍMÃS PERMANENTES.....	18
2.2. MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS E ÍMÃS PERMANENTES APLICADOS A NÚCLEO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS	19
2.2.1. INTRODUÇÃO	19
2.2.2. MATERIAS MAGNÉTICOS MACIOS APLICADOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS.....	20
2.2.3. PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS	20
2.2.3.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS SINTERIZADOS	24
2.2.4. ÍMÃS PERMANENTES APLICADOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ...	26
3. PARTE EXPERIMENTAL – MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1. OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	29
3.1.1. INTRODUÇÃO	29
3.1.2. MATRIZES DOS CORPOS DE PROVA	30
3.1.3. OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	34
3.1.3.1. PREPARAÇÃO DOS PÓS	34
3.1.3.2. COMPACTAÇÃO	34
3.1.3.3. SINTERIZAÇÃO.....	34
3.1.3.4. DIMENSÕES E DENSIDADES DOS CORPOS DE PROVA.....	35
3.1.4. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS.....	35
3.1.4.1. PROPRIEDADES ELÉTRICAS	35
3.1.4.2. PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	36

3.1.4.3. ENSAIOS DE PERDAS MAGNÉTICAS COM A VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA.....	38
3.1.4.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	41
3.2. PROJETO DO GERADOR SÍNCRONO DE 7,5 KW COM ÍMÃS PERMANENTES.....	42
3.2.1. INTRODUÇÃO.....	42
3.2.2. PROJETO DO NÚCLEO.....	42
3.2.3. DIMENSIONAMENTO DOS ÍMÃS.....	46
3.3. SIMULAÇÃO DO GERADOR.....	47
3.3.1. INTRODUÇÃO.....	47
3.3.2. SIMULAÇÃO MÁQUINA SÍNCRONA.....	47
3.4. MONTAGEM DO GERADOR.....	49
3.4.1. INTRODUÇÃO.....	49
3.4.2. DESENVOLVIMENTO DA MATRIZ E FERRAMENTAL.....	49
3.4.3. OBTENÇÃO DOS NÚCLEOS DO ROTOR.....	51
3.4.4. MONTAGEM FINAL DA MÁQUINA.....	53
3.5. DISPOSITIVO DE ACIONAMENTO UTILIZADO.....	54
3.5.1. INTRODUÇÃO.....	54
3.5.2. DESCRIÇÃO DA BANCADA DE TESTES.....	55
3.6. ENSAIOS DA MÁQUINA CONSTRUÍDA.....	56
3.6.1. INTRODUÇÃO.....	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.1. CORPOS DE PROVA.....	58
4.1.1. DENSIDADE DOS CORPOS DE PROVA.....	58
4.1.2. PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS.....	60
4.1.3. PERDAS MAGNÉTICAS.....	62
4.1.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	63
4.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DA MÁQUINA.....	64
4.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DA MÁQUINA.....	68
5. CONCLUSÕES.....	70
6. SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS.....	71
A. GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS ENVOLVIDAS NO ESTUDO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS.....	72
A.1. INTRODUÇÃO.....	72

A.2. CAMPO, INDUÇÃO E FLUXO MAGNÉTICO	72
A.3. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA RELATIVA.....	73
A.4. CURVA DE HISTERESE	74
A.5. MAGNETIZAÇÃO	76
A.6. RELAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE UNIDADES MKS E CGS	78
A.7. RELUTÂNCIA E FORÇA MAGNETOMOTRIZ.....	80
B. METALURGIA DO PÓ	81
B.1. INTRODUÇÃO.....	81
B.2. OBTENÇÃO DOS PÓS	81
B.3. MISTURA DOS PÓS	82
B.4. COMPACTAÇÃO.....	83
B.5. SINTERIZAÇÃO	85
C. GERADORES SÍNCRONOS	88
C.1. FUNCIONAMENTO DE GERADORES SÍNCRONOS.....	88
C.2. TIPOS DE GERADORES SÍNCRONOS TRIFÁSICOS	92
C.2.1. GERADOR SÍNCRONO COM CAMPO OU POLOS FIXOS.....	92
C.2.2. GERADOR SÍNCRONO COM CAMPO MÓVEL OU POLOS ROTATIVOS ...	92
C.2.3. GERADOR SÍNCRONO DE POLOS LISOS.....	93
C.2.4. GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES	94
C.2.5. GERADOR SÍNCRONO COM ROTOR BOBINADO	95
C.2.5.1. GERADOR SÍNCRONO COM ROTOR BOBINADO E ALIMENTAÇÃO DE CAMPO EXTERNA	95
C.2.5.2. GERADOR SÍNCRONO COM ROTOR BOBINADO E EXCITATRIZ INTERNA	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Máquina trifásica com ímã permanente.	18
Figura 2 - Ciclo de histerese para um material ferromagnético	21
Figura 3 - 2º quadrante de curvas BxH de ímãs dispo níveis comercialmente.....	26
Figura 4 - Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro	30
Figura 5 - Geometria da matriz de compactação dos corpos de prova na forma de cilindro.....	31
Figura 6 - Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel.....	31
Figura 7 - Geometria da matriz de compactação dos corpos de prova na forma de anel	32
Figura 8 - Matriz para compactação do núcleo tipo T	32
Figura 9 - Geometria da matriz do núcleo tipo T	33
Figura 10 - Matrizes para compactação do núcleo tipo E	33
Figura 11 - Geometria da matriz do núcleo tipo E	33
Figura 12 - Curva de sinterização	35
Figura 13 - Exemplo de material utilizado no ensaio de resistividade.....	36
Figura 14 - Sistema para ensaio de resistividade.....	36
Figura 15 - Anel de Rowland bobinado e corte mostrando as camadas presentes...37	
Figura 16 - Esquema de conexão para ensaio de histerese	38
Figura 17 - Núcleo obtido através da M/P (esquerda) e núcleo de chapas laminadas (direita)	38
Figura 18 - Núcleos obtidos através da M/P	39
Figura 19 - Núcleo convencional e núcleo maciço obtido por M/P	39
Figura 20 - Esquema da bancada de testes.....	40
Figura 21 - Formas de onda e tempo de defasagem	40
Figura 22 - Motor de indução 3φ 7,5 kW	42
Figura 23 - Motor parcialmente desmontado.....	43
Figura 24 - Topologia do núcleo.....	43
Figura 25 - Topologia do rotor no plano horizontal.....	44
Figura 26 - Cotas do rotor em corte transversal	45
Figura 27 - Cotas dos ímãs	46
Figura 28 - Metodologia FEM.....	47
Figura 29 - Corte transversal da máquina analisada no programa de simulação.....	48
Figura 30 - Curva de magnetização do Fe2%P sinterizado.	49
Figura 31 - Foto da matriz	50
Figura 32 - Punção superior	50

Figura 33 - Punção inferior	50
Figura 34 - Misturador tipo “V”	51
Figura 35 - Peça compactada	52
Figura 36 - Peças sinterizadas	53
Figura 37 - Peças usinadas.....	53
Figura 38 - Componentes (a) e pré-montagem do rotor (b-1)	54
Figura 39 - Fixação dos ímãs	54
Figura 40 - Bancada de testes	55
Figura 41 - Indicadores de tensão e corrente.....	56
Figura 42 - Osciloscópio (1), <i>datalogger</i> (2), tacógrafo (3) e sensor de torque (4)....	56
Figura 43 - Conexão física da máquina na bancada de testes.....	57
Figura 44 - Corpos de prova.....	58
Figura 45 - Curvas de magnetização das ligas sinterizadas	60
Figura 46 - Laço de histerese com os materiais estudados.	60
Figura 47 - Rendimento dos transformadores com a variação da frequência	62
Figura 48 - Perdas com a variação da frequência.....	62
Figura 49 - Fluxo magnético no máquina simulada.....	65
Figura 50 - Densidade de fluxo magnético no rotor, comparando ligas sinterizadas.	65
Figura 51 - Magnitude de fluxo magnético das ligas	66
Figura 52 - Torque da máquina em relação ao material simulado	67
Figura 53 - Formas de onda geradas pela máquina construída.....	68
Figura A1 - Ciclo de histerese para um material magnético	75
Figura A2 - Ciclo de histerese para materiais magnéticos duro e macio.....	75
Figura A3 - Estágios sucessivos de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo	77
Figura A4 - (a) Curva de magnetização típica e (b) relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado H.....	78
Figura B1 - Formato de algumas partículas (a) poligonal, (b) esférica e (c) angular.	81
Figura B2 - Misturadores - (a) cilíndrico - (b) rotacional cúbico (c) - cone duplo - (d) dupla concha	83
Figura B3 - Estágios de uma compactação de um pó em uma matriz	83
Figura B4 - Sequência de operação de compactação com duplo efeito	85
Figura B5 - Desenvolvimento do vínculo interpartícula durante a sinterização	86

Figura C1- Gerador síncrono elementar.....	88
Figura C2 - Distribuição de fluxo	89
Figura C3 - Variação da f.e.m. induzida no tempo	89
Figura C4 - Gerador síncrono elementar de 4 polos	90
Figura C5 - Variação da f.e.m. induzida no tempo	91
Figura C6 - Tensões geradas em sistema trifásico	91
Figura C7 - Gerador síncrono de polos fixos.....	92
Figura C8 - Gerador síncrono de polos rotativos.....	93
Figura C9 - Gerador síncrono de polos lisos	94
Figura C10 - Gerador síncrono de polos salientes	94
Figura C11 - Gerador síncrono com alimentação de campo externa	95
Figura C12 - Gerador síncrono com excitatriz interna.....	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades físicas de ligas fundidas a partir do ferro.....	24
Quadro 2 - Propriedades físicas de ligas magnéticas macias sinterizadas.....	24
Quadro 3 - Propriedades físicas de alguns ímãs disponíveis comercialmente	28
Quadro 4 - Ligas sinterizadas.....	29
Quadro 5 - Força aplicada na compactação dos corpos de prova	34
Quadro 6 - Densidade a verde	52
Quadro 7 - Densidades dos corpos de prova a verde na forma de cilindro.....	58
Quadro 8 - Densidades dos corpos de prova sinterizados na forma de cilindro	59
Quadro 9 – Propriedades magnéticas e resistividade elétrica.....	61
Quadro 10 - Dureza Brinell para ligas sinterizadas	63
Quadro 11 - Tensão de escoamento	63
Quadro 12 - Comparativo entre densidade de fluxo máximo e torque	67
Quadro 13 - Comparativo entre rotação, frequência e tensão gerada	69
Quadro A1 - Permeabilidade relativa de alguns materiais	74
Quadro A2 - Principais sistemas de unidades utilizadas em magnetismo	79
Quadro B1 - Temperatura, tempo e atmosfera de sinterização para alguns materiais	87

LISTA DE ABREVIATURAS

Am	Amostra
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CGS	Sistema dimensional - centímetro, grama, segundo
Cp	Amostra compactada
Ct	Contração da amostra compactada
CV	Cavalo vapor
f.e.m.	Força eletromotriz
HB	Dureza Brinell
MKS	Sistema dimensional – metro, quilograma, segundo
M/P	Metalurgia do pó
N_e	Nº de espiras de uma bobina
RPM	Rotações por minuto
St	Amostra Sinterizada
Vcc	Fonte de tensão de corrente contínua

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da superfície para compressão	[mm ²]
B	Indução magnética	[G] ou [T]
B_r	Retentividade	[G] ou [T]
c_b	Comprimento da cavidade da matriz da forma de barra	[mm]
$e_{imãs}$	Espessura dos imãs	[mm]
F	Força de Compressão	[N]
f	Frequência	[Hz]
H	Campo magnético	[Oe] ou [A/m]
H_c	Coercitividade	[Oe] ou [A/m]
H_{ci}	Campo coercivo intrínseco	[Oe] ou [A/m]
h_{sal}	Altura da saliência do núcleo do rotor do motor de indução	[mm]
I	Corrente elétrica	[A]
I_e	Corrente de entrada	[A]
I_r	Corrente no resistor	[A]
J	Densidade de corrente	[A/m ²]
jX	Reatância	[Ω]
K	Constante relacional	N/C
l	Comprimento do condutor	[m]
l_b	Largura da cavidade da matriz da forma de barra	[mm]
l_{reent}	Largura da reentrância do rotor do motor de indução	[mm]
l_{mi}	Comprimento do núcleo do rotor do motor de indução	[mm]
l_{sal}	Largura da saliência do rotor do motor de indução	[mm]
P_p	Potencia no primário	[W]
R	Resistência	[Ω]
r_b	Raio da cavidade da matriz da forma de barra	[mm]
r_{nr}	Raio da cavidade da matriz da forma de cilindro	[mm]
T	Temperatura	[°C]
T_{Cu}	Temperatura de Curie	[°C]
T_{def}	Tempo de defasagem	[s]
T_{Rev}	Coeficiente de temperatura reversível	[%/°C]
V	Tensão elétrica	[V]
V_e	Tensão de entrada	[V]

V_r	Tensão no resistor	[V]
V_s	Tensão de saída	[V]
Z	Impedância	[Ω]
α	Constante relacional	N/C
ε	Força eletromotriz	[V]
ϕ_c	Diâmetro da cavidade da matriz da forma de cilindro	[mm]
ϕ_{cm}	Diâmetro da cavidade da matriz	[mm]
ϕ_{ea}	Diâmetro da cavidade da matriz no forma de anel	[mm]
ϕ_{eix}	Diâmetro do eixo do rotor do motor de indução	[mm]
ϕ_{ia}	Diâmetro do pino macho da matriz em forma de anel	[mm]
ϕ_{rmi}	Diâmetro do rotor do motor de indução	[mm]
φ	Ângulo de defasagem de tensão e corrente	[$^\circ$]
μ	Permeabilidade Magnética do Material	[H/m]
μ_r	Permeabilidade magnética relativa	Adimensional
μ_o	Permeabilidade magnética do vácuo	[$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m]
η	Rendimento do transformador	[%]
θ_{reent}	Ângulo da reentrância do rotor do motor de indução	[$^\circ$]
θ_{sal}	Ângulo da saliência do rotor do motor de indução	[$^\circ$]
ρ_s	Densidade do material	[kg/m ³]
ρ_e	Resistividade elétrica	[$\Omega \cdot m$]
σ_e	Tensão de escoamento	[N/mm ²]

RESUMO

Este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de uma máquina síncrona com ímãs permanentes de até 7,5 kW, no qual o núcleo do rotor, usualmente construído de chapas de aço laminadas, foi substituído por um bloco maciço de uma liga ferromagnética obtida através da metalurgia do pó. Para a construção do rotor, foram estudados materiais magnéticos macios sinterizados, a partir de ligas com ferro, onde foram avaliadas propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas, os quais influenciam diretamente no desempenho da máquina. A partir destas propriedades foi definida uma liga, considerando que o rotor construído resultaria em um melhor desempenho na máquina. Testes foram efetuados, possibilitando uma comparação com máquinas construídas da maneira convencional.

ABSTRACT

The aim of this project is to develop a synchronous machine with permanent magnets up to 7.5 kW, where the rotor core, usually built of laminated steel sheets, was replaced by a massive block of a ferromagnetic alloy obtained through Powder Metallurgy. Process soft magnetic materials using iron alloys were studied in order to build the rotor, and the magnetic, electrical and mechanical properties were analyzed, due to their direct influence on the performance of the machine. An alloy was selected according to these analyses considering a better performance of the machine using the rotor built from this alloy. Experiments were carried out to enable a comparison to machines built in traditional processes.

1. INTRODUÇÃO

Estudos indicam que materiais magnéticos sinterizados, obtidos a partir do processo de metalurgia do pó (M/P), podem ser utilizados na construção de núcleos de máquinas elétricas [1-5]. Assim, ligas de materiais magnéticos macios, compostos de pós de ferro, em conjunto a outros elementos, tais como, fósforo, silício ou níquel, poderão ser utilizadas em máquinas elétricas síncronas para obtenção de núcleos do estator, usualmente construídos a partir de chapas de aço laminadas.

Certos núcleos de micromotores e motores de pequeno porte já estão sendo construídos a partir de materiais sinterizados [2-4]. Um novo material compósito de pó de ferro revestido com polímero, chamado de SMC (Soft Magnetic Composite) ou pó de ferro microencapsulado [5], para fins eletromagnéticos, foi lançado no mercado internacional nos últimos anos. Suas propriedades ainda não cumpriram as promessas teóricas, mas podem encontrar um importante nicho de aplicação, se o controle de velocidade por meio de acionamento eletrônico ganhar mais espaço no mercado.

Dependendo do caso, o uso de materiais obtido através da M/P em máquinas elétricas poderá conferir melhores características de desempenho e rendimento, além de simplificar e baratear o seu processo de fabricação. As máquinas desenvolvidas a partir desta tecnologia poderão ser aplicadas com vantagens em um grande número de acionamentos elétricos a velocidade variável, tais como bombas, ventiladores, compressores, motores para refrigeradores, ar condicionado, máquinas de lavar, automóveis e veículos em geral.

Dadas às características dos materiais sinterizados, será possível a obtenção de máquinas mais leves e com rendimentos maiores, propiciando uma economia de energia significativa. A faixa de potência de motores até 7,5 kW inclui a grande maioria de motores monofásicos produzidos no Brasil (cerca de 96%, segundo dados da ABINEE – Associação Brasileira de Industrias Eletro - Eletrônicas) e uma parcela significativa dos motores trifásicos (33%, segundo a ABINEE) [6]. Observa-se que o rendimento desta faixa de motores é bastante baixo, da ordem de 40% para os monofásicos e 70% a 80% para os trifásicos. Usando-se materiais sinterizados e dotando-se o motor de um controle de velocidade por meio de um conversor de frequência, o mesmo deverá apresentar, teoricamente, um rendimento

acima de 90%. Uma aplicação de grande interesse é em automóveis, uma vez que, a partir do acionamento proposto, estes poderão substituir com vantagens os tradicionais motores de corrente contínua [7].

As perspectivas são mais interessantes ainda, quando se visualiza a hipótese de serem construídas determinadas máquinas elétricas com todas as partes magnéticas obtidas a partir da M/P. Assim, uma máquina elétrica síncrona poderia ser construída com núcleo do estator, rotor e carcaça sinterizados, e com ímãs permanentes de alto produto energético em substituição aos enrolamentos de campo. Uma vantagem construtiva deste tipo de máquina seria adequar as ligas magnéticas sinterizadas dos núcleos do estator e rotor à configuração e forma dos ímãs utilizados, além de serem construídos, estator e carcaça em uma única peça.

Assim, este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de uma máquina elétrica síncrona rotativa com ímãs permanentes de NdFeB e núcleo do rotor construído a partir da M/P. A máquina desenvolvida neste estudo destina-se a substituir um aerogerador de 7,5 kW, e foi montada utilizando-se partes de um motor de indução de alto rendimento de mesma potência, produzido por Eberle Motores. Inicialmente, foram realizados estudos de possíveis ligas sinterizadas a serem utilizadas para a construção dos núcleos, para as quais foram avaliadas as propriedades físicas de interesse destes materiais. A seguir, o rotor da máquina foi projetado, simulado e construído a partir do ferro puro sinterizado. Ímãs foram acoplados e, finalmente, a máquina foi montada e testada em bancada.

Ressalta-se que máquinas desta potência nunca foram implementadas com núcleos desenvolvidos por M/P, pois apesar de economicamente viável sua produção em grande escala, existe um grande investimento no ferramental necessário, como matrizes e prensas para compactação de núcleos em tais dimensões. Estudos apontam que núcleos sinterizados tendem a ter melhor desempenho quando utilizados em conjunto com ímãs permanentes [3].

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GERADORES SÍNCRONOS TRIFÁSICOS

2.1.1. INTRODUÇÃO

Um dos tipos mais importantes de máquinas elétricas rotativas é o gerador síncrono. Esta máquina é capaz de converter energia mecânica em elétrica quando operada como gerador, e energia elétrica em mecânica quando operada como motor. Geradores síncronos são utilizados na maioria das usinas hidrelétricas e termelétricas. O nome síncrono se deve ao fato de esta máquina operar com uma velocidade de rotação constante sincronizada com a frequência da tensão elétrica alternada aplicada nos terminais da mesma [8].

2.1.1.1. GERADOR SÍNCRONO COM ÍMÃS PERMANENTES

Nos geradores com ímãs permanentes não há enrolamentos de campo. Estes são substituídos por ímãs permanentes. Não possuem igualmente escovas ou fonte de tensão contínua, reduzindo com isto manutenções, aumentando o rendimento e com melhor relação torque/volume. Os ímãs são fixados, em alguns casos, tangencialmente na superfície dos polos do rotor, ou axialmente internamente no rotor. Alguns possuem uma configuração híbrida.

A Figura 1 mostra um diagrama esquemático de uma máquina trifásica com ímã permanente. Uma análise desta figura permite observar as semelhanças entre a máquina trifásica com ímã permanente e a máquina síncrona convencional. Por este motivo, as máquinas trifásicas com ímã permanente podem ser analisadas a partir de cálculos muito semelhantes àqueles utilizados para análise de máquinas síncronas convencionais, simplesmente considerando que a máquina é excitada por uma corrente de campo de valor constante, fazendo-se as devidas correções [9].

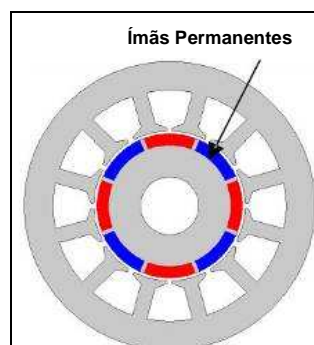


Figura 1 - Máquina trifásica com ímã permanente.

Atualmente, o uso de ímãs permanentes com alto produto energético em substituição aos enrolamentos de campo em máquinas elétricas tem aumentado consideravelmente. Esta tendência é devido à necessidade de sistemas de campo baratos e confiáveis produzidos a partir de ímãs de ferrita que, dependendo da aplicação, são adequados. Entretanto, um desenvolvimento mais importante ocorreu a partir da utilização de novos materiais magnéticos, como os ímãs permanentes de terras raras (super ímãs), que possuem um produto energético muito superior às ferritas. Estes super ímãs utilizados são conhecidos por sua composição, ou seja, o neodímio-ferro-boro ou NdFeB e o samário-cobalto ou SmCo. A utilização de super ímãs em novas configurações resultou um alto rendimento destas máquinas elétricas, bem como em outras características que são difíceis de comparar com máquinas sem ímãs permanentes (máquinas convencionais). A utilização dos super ímãs diminuiu sensivelmente os riscos de desmagnetização dos ímãs, uma vez que estes ímãs possuem elevada coercitividade (campo desmagnetizante), além de possibilitar o desenvolvimento de máquinas com uma elevada relação torque/volume. Os ímãs permanentes são disponíveis em uma larga faixa de características magnéticas e permitem uma considerável gama de possibilidades na escolha do ímã mais adequado [10].

Relação torque/volume mais elevada é obtida em máquinas síncronas com ímãs permanentes. Estas máquinas têm melhor rendimento que máquinas com enrolamento de campo porque não têm nenhuma perda de excitação de campo, uma vez que não possuem enrolamentos no motor, exceção feita às máquinas que, além de ímãs, possuem uma gaiola. Os ímãs ocupam menos espaço que campo com enrolamentos, e para tamanhos de armadura pequenos esta vantagem é significativa, e o custo reduzido, particularmente quando ímãs cerâmicos (ferritas) são usados, tende a fazer estes motores com custo bastante competitivo [10].

2.2. MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS E ÍMÃS PERMANENTES APLICADOS A NÚCLEO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

2.2.1. INTRODUÇÃO

Materiais magnéticos macios são utilizados por terem uma qualidade única, indisputada por outros metais, polímeros ou cerâmicas: sua capacidade de concentrar milhares de vezes um campo magnético externamente aplicado. Essa propriedade é o que viabiliza a existência da maioria das máquinas elétricas:

motores, geradores e transformadores. Os ímãs, que compõem os materiais magneticamente duros, são uma solução importante em muitas aplicações, pela sua capacidade de disponibilizar campo magnético sem necessitar de passagem de corrente elétrica [11].

2.2.2. MATERIAS MAGNÉTICOS MACIOS APLICADOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

Na sua grande maioria, os núcleos do estator e do rotor de máquinas elétricas são construídos com chapas de aço baixo carbono. Algumas máquinas de maior rendimento ainda são construídas com chapas de aço-silício, com um percentual de 1 a 3% de silício. O processo total para a confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, corte, tratamento para isolação, empacotamento e fixação. No caso de chapas de aço baixo carbono, o processo para isolação consiste em um tratamento térmico, no qual os pacotes de chapas são colocados em fornos durante certo tempo, havendo então a oxidação da superfície das chapas e, em consequência, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes [12, 13].

2.2.3. PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS

Os seguintes fatores determinam o desempenho das máquinas elétricas:

- Elevada Permeabilidade Magnética: Quanto maior a permeabilidade magnética das ligas, menor o campo magnético no núcleo e maior o campo no entreferro. Em uma máquina elétrica rotativa (motor ou gerador), o entreferro (espaço compreendido entre o núcleo do rotor e estator) deve apresentar o maior campo magnético possível (mais precisamente a maior indução magnética possível) Em um motor elétrico, o conjugado eletromagnético (torque) desenvolvido na ponta de eixo pela máquina é proporcional ao fluxo magnético de entreferro (fluxo, indução e campo magnético são grandezas relacionadas e proporcionais). No caso de um gerador, a tensão induzida a rotação constante nos enrolamentos de armadura também é proporcional ao fluxo de entreferro;
- Elevada Indução de Saturação: Quanto maior a indução de saturação, maior será o fluxo de entreferro. A saturação magnética limita a indução, ou seja, aquela região da curva de histerese do material onde, mesmo com o aumento do campo magnético, a indução magnética pouco se altera;

- Baixas Coercitividade e Retentividade: O ideal é a curva de histerese se aproximar de uma reta, ou seja, baixas coercitividade e retentividade. A área da curva de histerese representa as perdas em um dispositivo eletromagnético alimentado com corrente alternada;
- Elevada Resistividade Elétrica: Todo dispositivo eletromagnético alimentado com corrente alternada apresenta tensões induzidas no núcleo de ferro do dispositivo. Esta tensão induz correntes no núcleo, conhecidas por correntes parasitas ou correntes de Foucault, que são responsáveis por uma apreciável perda nos núcleos destes dispositivos. Por este motivo, estes núcleos são construídos a partir de finas lâminas com espessura menor que o milímetro, isoladas eletricamente uma da outra. Isto limita e reduz as correntes induzidas, diminuindo as perdas por correntes parasitas. Outra forma de atenuar os efeitos das correntes parasitas e, em consequência as perdas, é desenvolver um material que, sem perder as características magnéticas, apresente alta resistividade elétrica.

As propriedades magnéticas de retentividade, coercitividade e permeabilidade relativa são analisadas a partir da curva de histerese. Esta curva relaciona campo magnético H aplicado a um material com indução magnética B resultante. A relação $B \times H$ é ilustrada na Figura 2.

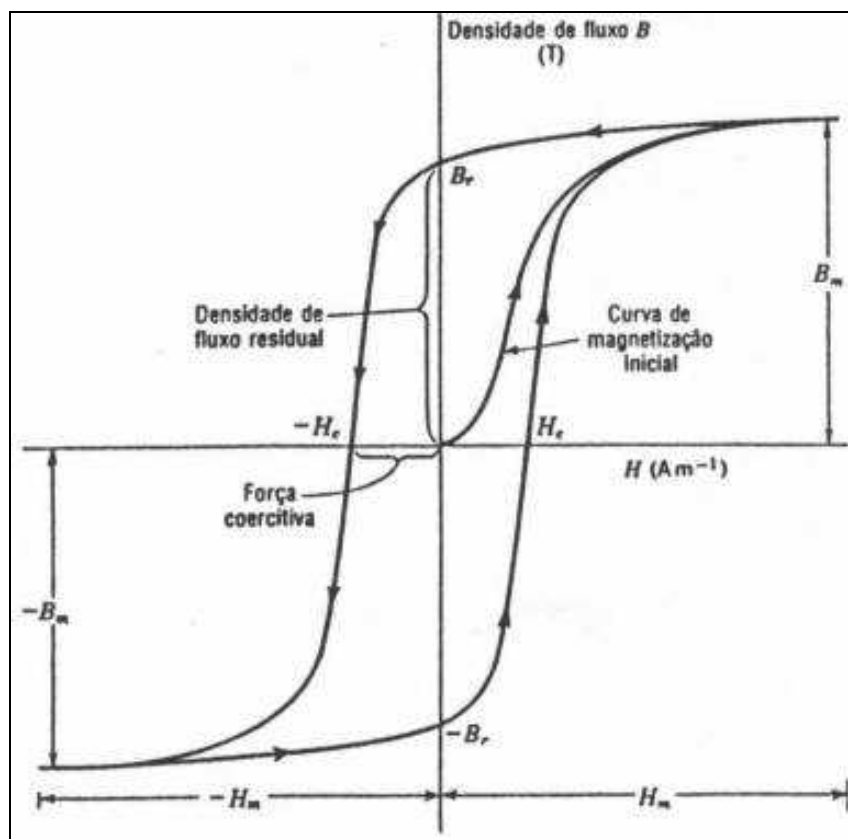


Figura 2 - Ciclo de histerese para um material ferromagnético

O ponto em que a curva corta o eixo de B , no quadrante superior esquerdo, é denominado de magnetismo remanente ou retentividade B_r e representa a indução magnética residual que permanece no espécime mesmo após a retirada da bobina, ou seja, sem campo magnético aplicado ($H = 0$). O ponto em que a curva corta o eixo de H no mesmo quadrante é denominado de força coercitiva ou coercitividade H_c e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime ($B = 0$). Outro fator importante na identificação de materiais magnéticos é o produto energético $B.H_{max}$ e está associado à densidade de energia armazenada em um ímã permanente.

Os materiais magnéticos macios mais utilizados são as ligas de aço em geral, com exceção de algumas ligas de aço inox que são paramagnéticos e apresentam a mesma permeabilidade magnética relativa do vácuo. Em geral, 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 núcleo 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 [9, 10].

Os três tipos de materiais mais utilizados para núcleos de máquinas elétricas tradicionais, relacionados a seguir, são: aço baixo carbono, aço-silício não orientado e aço-silício orientado [14].

- Aço baixo carbono: Este tipo de aço, com, aproximadamente, 0,05% de carbono, foi originalmente utilizado como material para construção de núcleos para transformadores, motores e geradores, mas é limitado hoje, principalmente, para núcleo de pequenos motores. Essencialmente, este tipo de material é o mesmo utilizado na construção de automóveis, máquinas diversas e outros. 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 pode 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 carbono, nitrogênio e oxigênio. Apesar da alta permeabilidade magnética, o ferro “puro” não é utilizado comercialmente em função do alto custo e baixa resistividade, o que induz correntes parasitas.

- Aço-Silício não orientado: Este tipo de aço foi desenvolvido pelo metalurgista inglês Robert Hadfield em 1900 e logo tornou-se o material preferido 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. A adição de silício ao ferro resulta os seguintes efeitos sobre as propriedades físicas: a resistividade elétrica aumenta, causando uma redução nas correntes parasitas; a anisotropia cristalina diminui, levando a um aumento na permeabilidade, com conseqüente decréscimo da indução de saturação. O percentual de silício varia de aproximadamente 1,05 a 3,25% para as ligas não orientadas e 3,25% para as ligas orientadas, e o percentual de carbono varia de 0,03% (não orientado) a 0,01% (orientado). A permeabilidade magnética relativa, a uma indução de 15 kG (1,5 T), 60 Hz, para as ligas não orientadas, varia de 1.100 (1,05% de Si) até 7.000 (3,25% de Si), e para as ligas orientadas varia de 16.000 a 23.000. As chapas são obtidas por laminação a quente até aproximadamente à espessura final; a seguir, é realizada uma decapagem para retirar a película de óxido e, após, laminado a frio para a espessura final, melhorando as características mecânicas; finalmente, é realizado um recozimento à baixa temperatura.

- Aço-silício com grãos orientados: Este material foi desenvolvido pelo metalurgista americano Norman Goss em 1933. Ele descobriu que, com uma laminação a frio com um recozimento intermediário, acrescido de um recozimento final a alta temperatura, produz-se chapas com melhores propriedades magnéticas na direção de laminação, do que as chapas com laminação a quente. Esta melhora é devido a uma textura magneticamente favorável, produzida por um recristalização secundária, durante o recozimento à alta temperatura. Chapas com grãos orientados começaram a ser produzidas comercialmente por volta de 1945 e, desde então, suas propriedades têm sido melhoradas continuamente.

O Quadro1 relaciona algumas ligas fundidas a partir do ferro, com as propriedades físicas de interesse, na qual ρ_s é a densidade, B_{max} , a indução máxima, B_r , a retentividade, H_c , a coercitividade, μ_r , a permeabilidade magnética relativa máxima e ρ_e , a resistividade elétrica.

Quadro 1 - Propriedades físicas de ligas fundidas a partir do ferro

Liga	ρ_s [kg/m ³]	B_{max} [T]	B_r [T]	H_c [A/m]	μ_r [Ad.]	ρ_e [mΩ.m]
ASTM A848 (Ferro)	7.890	1,70	1,28	79,58	5.000	0,13
ASM-Handbook (Fe-Si)	7.650	-	-	56,00	8,000	0,47
Carpenter Tech. (aço-ferrítico)	7.260	1,20-	0,60	159,00	2.000	-
ASM-Handbook (Fe-50%Ni)	8.200	1,60	0,80	3,98	70.000	-

2.2.3.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS SINTERIZADOS

Todas as ligas que podem ser utilizadas na obtenção de núcleos das máquinas elétricas têm como elemento básico o ferro, com algum outro material como o silício ou fósforo. Outra opção é a liga FeNi50% que tem como inconveniente o custo do níquel [15, 16]. O Quadro 2 relaciona algumas ligas que podem ser utilizadas na construção de núcleos magnéticos e suas propriedades físicas de interesse.

Quadro 2 - Propriedades físicas de ligas magnéticas macias sinterizadas

Liga	ρ_s [kg/m ³]	B_{max} [T]	B_r [T]	H_c [A/m]	μ_r [Ad.]	ρ_e [μΩ.m]
Fe	7.200	1,36	1,18	127	3.700	0,12
Fe - 0,45% P	7.200	1,34	1,12	80	4.800	0,21
Fe - 0,8 % P	7.200	1,32	1,13	119	-	0,30
Fe - 1% P	7.200	1,38	1,15	64	-	0,38
Fe - 3% Si	7.000	1,31	1,09	92	4.900	0,55
Fe - 50% Ni	7.100	1,09	0,80	20	21.000	0,69
Fe - 81% Ni - 2% Mo	7.800	0,72	0,48	6	77.000	0,60
Fe - 6% Si	7.000	1,31	1,09	92	4.900	0,55
Fe - 50% Ni Pré Ligado	7.100	1,09	0,80	20	21.000	0,69
Fe - 50% Co - 2% Nb	7.200	1,24	0,73	175	-	-

As propriedades magnéticas e elétricas dos materiais obtidos por metalurgia do pó são influenciadas por vários fatores, sendo que, aqueles considerados de maior importância no desenvolvimento de núcleos magnéticos de máquinas elétricas, estão relacionados a seguir:

- Na maioria dos casos, a resistividade de um elemento metálico aumenta quando são adicionadas impurezas, uma vez que estas impurezas provocam distorções no reticulado cristalino. Quanto maior as imperfeições da rede cristalina, maior a resistividade. Por esta razão, uma resistividade maior em metais é obtida em ligas compostas de dois ou mais metais, nas mesmas proporções, ou em proporções próximas. Nestas condições, há uma interpenetração das redes cristalina dos materiais presentes na liga [17].
- As impurezas como carbono, nitrogênio e oxigênio também afetam as propriedades magnéticas das ligas de ferro sinterizadas [18].
- A adição de silício ao ferro, além de aumentar a resistividade elétrica, aumenta também a permeabilidade magnética relativa máxima, diminuindo a coercitividade, contudo, reduz também a indução de saturação [18].
- A maioria dos materiais metálicos ferrosos sinterizados possui resistividade elétrica maior do que materiais maciços de mesma composição química, devido, principalmente, à porosidade e a 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, portanto, a densidade. A resistividade das ligas metálicas diminui com o aumento da densidade, independente do tipo de metal [19, 20].
- Com o aumento da porosidade, há uma diminuição da permeabilidade magnética, uma diminuição da indução de saturação e um aumento da coercitividade [21].
- A resistividade elétrica para a maioria das ligas metálicas também é função do tamanho de grão. Quanto menor o tamanho de grão, maior a quantidade de contornos de grãos, que também provocam distúrbios na rede cristalina, aumentando a resistividade. Entretanto, a diminuição do tamanho de grão causa um decréscimo da permeabilidade magnética e um aumento da coercitividade [22, 23].
- O aumento da granulometria do pó aumenta a permeabilidade magnética, mas aumenta também a coercitividade. Além disto, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização também alteram algumas propriedades físicas [24].

2.2.4. ÍMÃS PERMANENTES APLICADOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

Ímãs são materiais que permanentemente exibem um campo magnético e, portanto, são capazes de exercer força à distância em objetos magnetizados ou magnetizáveis. São usados em alto-falantes, motores, eletro-válvulas e muitos outros fins. Os ímãs hoje mais utilizados, cerâmicos de hexaferrato de estrôncio e bário e os superímãs de terras raras, são fabricados por técnicas de processamento de materiais particulados: sinterização ou aglomeração com polímeros. O desempenho de um ímã em serviço pode ser previsto analisando o comportamento do segundo quadrante da curva de histerese, que mostra como o magnetismo do material, medido pela indução magnética B [T], é afetado pela presença de um campo magnético H [A/m] contrário, mostrado na Figura 3. Para simplificar a abordagem, serão analisados dois pontos dessa curva, indicadores da qualidade de um ímã: a retentividade B_r e a coercitividade H_c [25].

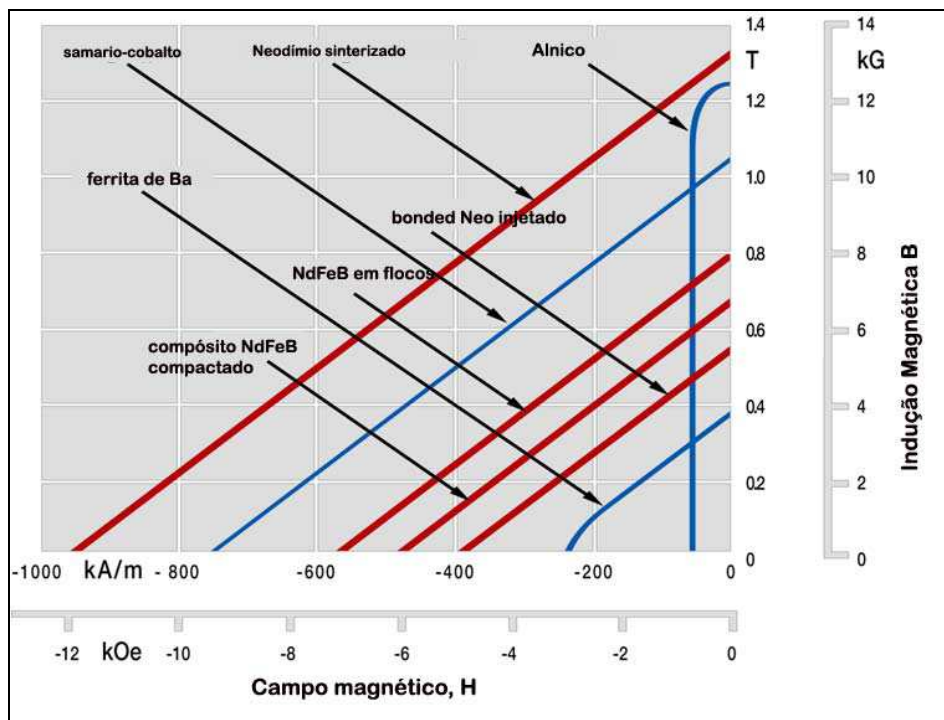


Figura 3 - 2º quadrante de curvas BxH de ímãs dispo níveis comercialmente

O que faz de um material ser um ímã é sua capacidade de reter o magnetismo, ou seja, sua resistência a desmagnetizar-se mesmo quando lhe é aplicado um forte campo externo. Por isso, a propriedade fundamental de um ímã é seu campo coercivo intrínseco, H_{ci} . Essa propriedade está associada a uma característica intrínseca da substância magnética principal, o campo de anisotropia. A fase magnética do ímã conhecido como Alnico, desenvolvido em 1920, não tinha um

campo de anisotropia alto e, portanto, estava limitado a um campo coercivo baixo. Assim que foi identificado o alto campo de anisotropia da ferrita de bário, nos anos 1940, esse material passou a substituir o Alnico, apesar de sua remanência muito menor. O campo coercivo pode variar de 150 a 1.000 kA/m, também dependendo da composição química e do processo de fabricação. Essa é a propriedade mais sensível ao processo: o campo coercivo pode reduzir-se a valores abaixo de 1 kA/m dependendo do tamanho de grão e da velocidade de resfriamento do material após sua fabricação [25].

Por sua vez, o que faz do ímã um bom ímã é sua capacidade de produzir no espaço um alto valor de indução magnética, e isso depende fortemente do valor da saturação magnética e remanência. O valor da retentividade pode variar de 0,3 a 1,4 T, dependendo da composição química, que estabelece o valor máximo possível para o material, e do processo de fabricação. Qualquer região não magnética no interior do material, como poros, fases não magnéticas, ou um polímero, reduzirá o valor da remanência. A textura cristalográfica (distribuição das orientações dos cristais no interior do material) também afetará muito o valor da remanência: ímãs de alta remanência, chamados “anisotrópicos”, são aqueles em que as partículas foram orientadas antes da consolidação, diferentemente dos ímãs “isotrópicos”, em que as partículas estão distribuídas ao acaso. A remanência de um ímã anisotrópico pode chegar a ser até o dobro do valor da remanência de um ímã feito com o mesmo material, porém não-orientado. Por outro lado, a alta remanência só será obtida na direção em que os cristais estiverem orientados, o que pode ser uma desvantagem em certas aplicações [25].

Um ímã ideal é um ímã do tipo anisotrópico. Quando aplicado um campo magnético H muito intenso, no primeiro quadrante, o material é completamente magnetizado e B atinge o valor de saturação, B_{max} . O teste da perfeição do alinhamento ocorre quando o campo H é reduzido a zero e a polarização magnética nada diminui: as partículas estão perfeitamente orientadas e tão perfeitamente magnetizadas que mesmo reduzindo o campo, a polarização magnética remanente é igual o de saturação [25].

A técnica de fabricação ideal para obter o ímã ideal, do ponto de vista de propriedade magnética, é o processamento de materiais particulados (metalurgia do pó ou método cerâmico). Baseando-se no fato de que a fase magnética é obrigatoriamente anisotrópica, ou seja, a magnetização espontânea do material em

uma única direção cristalina, se o material for moído a ponto de que cada partícula contenha um só cristal, se as partículas forem colocadas numa cavidade e forem ainda relativamente soltas, submetidas a um campo magnético intenso, as partículas sofrerão uma rotação, de maneira que cada uma delas alinhe sua direção cristalina de magnetização espontânea na direção do campo externo aplicado. Somente essa técnica permite obter um altíssimo grau de paralelismo das direções cristalinas das partículas, chamada etapa de orientação das partículas, para maximizar a remanência [25].

O Quadro 3 mostra as propriedades físicas de alguns ímãs, na qual T_{max} é a máxima temperatura de operação, T_{Rev} é o coeficiente de temperatura reversível e T_{Cu} é a temperatura de Curie ou temperatura na qual os ímãs desmagnetizam [26].

Quadro 3 - Propriedades físicas de alguns ímãs disponíveis comercialmente

Ímãs	B_r [T]	H_c [kA/m]	$B.H_{max}$ [kJ/m³]	ρ_s [kg/m³]	T_{max} [°C]	T_{Rev} [%/°C]	T_{Cu} [°C]
<i>AlNiCo V</i>	1,28	50	41	7.300	550	-0,016	870
<i>AlNiCo VIII</i>	0,90	127	48	7.300	550	-0,005	870
<i>Cerâmico 7 (ferrita)</i>	0,36	255	23	4.900	350	-0,200	450
<i>Cerâmico 8 (ferrita)</i>	0,40	247	29	4.900	350	-0,200	450
<i>Ímã aglomerado (terra rara Co-B₂)</i>	0,55	360	48	5.100	120	-0,040	-
<i>Nd₂Fe₁₄B</i>	1,3	955	300	7.500	200	-0,3	350
<i>Terra rara Co H-90^a</i>	0,82	597	122	8.200	250	-0,047	710
<i>Terra rara Co H-90B</i>	0,87	653	142	8.300	250	-0,042	710
<i>Terra rara Co H-99^a</i>	0,97	477	176	8.300	250	-0,035	870
<i>MnAlC</i>	0,58	190	45	5.000	300	-0,140	350

3. PARTE EXPERIMENTAL – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, foi estudado o desenvolvimento de ligas sinterizadas a partir de pós de ferro, fósforo, silício e níquel através da metalurgia do pó. Neste processo, as ligas são misturadas, compactadas e sinterizadas. Os teores de adição foram baseados em dados bibliográficos [27-31].

O Quadro 4 mostra a relação das ligas sinterizadas estudadas.

Quadro 4 - Ligas sinterizadas

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

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

3.1. OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

3.1.1. INTRODUÇÃO

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

- Densidade
- Resistividade Elétrica
- Curva de Histerese
- Curva de Magnetização

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

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

3.1.2. MATRIZES DOS CORPOS DE PROVA

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

a) Matriz para obtenção dos corpos de prova na forma de cilindro:

Os corpos de prova obtidos a partir desta matriz foram utilizados para medição da densidade e realização dos ensaios de dureza e compressão.

A Figura 4 mostra a matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro, e a Figura 5 sua geometria expressa em milímetros.



Figura 4 - Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro

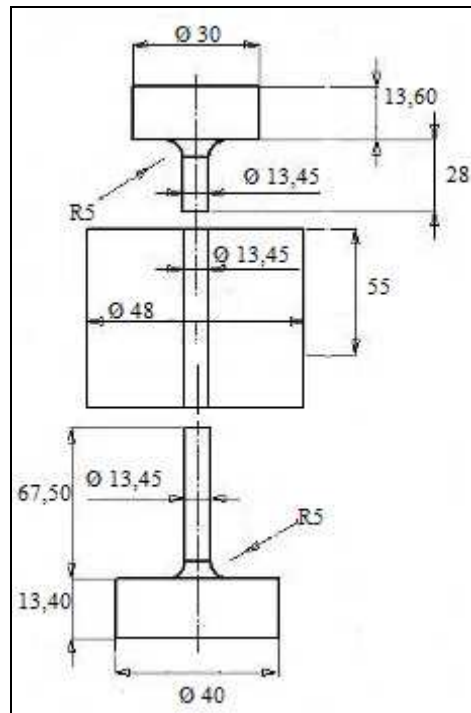


Figura 5 - Geometria da matriz de compactação dos corpos de prova na forma de cilindro

b) Matriz para obtenção dos corpos de prova na forma de anel:

Estes corpos de prova foram utilizados para obtenção das curvas de histerese e magnetização, assim como para a determinação da resistividade elétrica.

As Figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, a matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel e a sua geometria.



Figura 6 - Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel

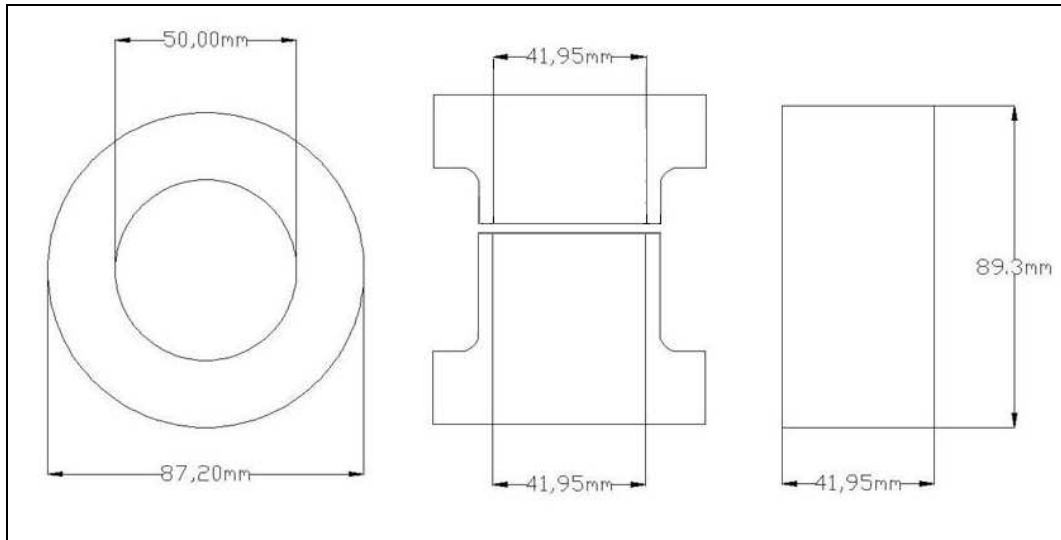


Figura 7 - Geometria da matriz de compactação dos corpos de prova na forma de anel

c) Matrizes para obtenção dos núcleos de transformadores:

Os corpos de prova obtidos foram utilizados para medir as perdas totais do núcleo de pequenos transformadores. A Figura 8 mostra a matriz para compactação do núcleo tipo T e a Figura 9 sua geometria expressa em milímetros.



Figura 8 - Matriz para compactação do núcleo tipo T

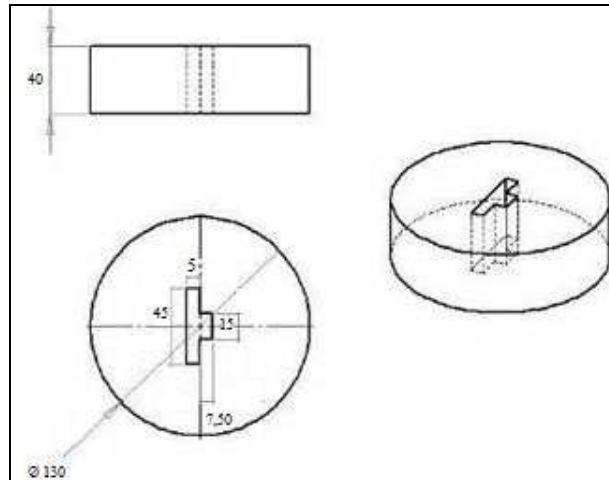


Figura 9 - Geometria da matriz do núcleo tipo T

A Figura 10 mostra a matriz para compactação do núcleo tipo E e a Figura 11 sua geometria expressa em milímetros.



Figura 10 - Matrizes para compactação do núcleo tipo E

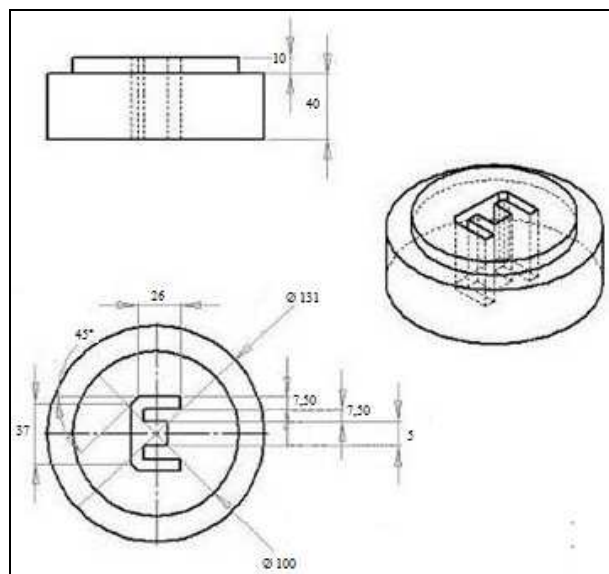


Figura 11 - Geometria da matriz do núcleo tipo E

3.1.3. OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

3.1.3.1. PREPARAÇÃO DOS PÓS

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

Para a obtenção dos corpos de prova, os pós tiveram suas massas determinadas e misturados com 1% de lubrificante sólido (estearato de zinco). O misturador utilizado foi do tipo cone, com 30 minutos de mistura [27].

3.1.3.2. COMPACTAÇÃO

Os corpos de prova via Metalurgia do Pó foram compactados a uma pressão de 600 Mpa [27]. O cálculo da pressão foi definido a partir da área de cavidade da matriz [27, 32], portanto observou-se o desenho dimensional das matrizes. Nas compactações realizadas, utilizou-se a técnica de duplo efeito [27, 32].

As forças aplicadas na compactação dos corpos de prova estão relacionadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Força aplicada na compactação dos corpos de prova

Forma	Área [cm²]	Força [N]
<i>Cilindro</i>	1,42	83.581,2
<i>Anel</i>	5,81	341.976,6
<i>Transformador T</i>	4,58	269.578,8
<i>Transformador E</i>	8,47	498.544,2

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

3.1.3.3. SINTERIZAÇÃO

A sinterização dos corpos de prova foi realizada em forno tubular horizontal, com atmosfera de argônio de alta pureza. A curva de sinterização utilizada está representada na Figura 12. A taxa de aquecimento utilizada foi de 10 °C/min. Empregaram-se dois patamares durante o processo térmico de sinterização. O primeiro patamar, a 550 °C, para garantir a extração do estearato de zinco e o

segundo a 1150 °C, no qual ocorreu a sinterização, permanecendo nesta temperatura durante 60 minutos. Após, as peças foram mantidas no forno, para resfriamento lento, até a temperatura ambiente [33, 34].

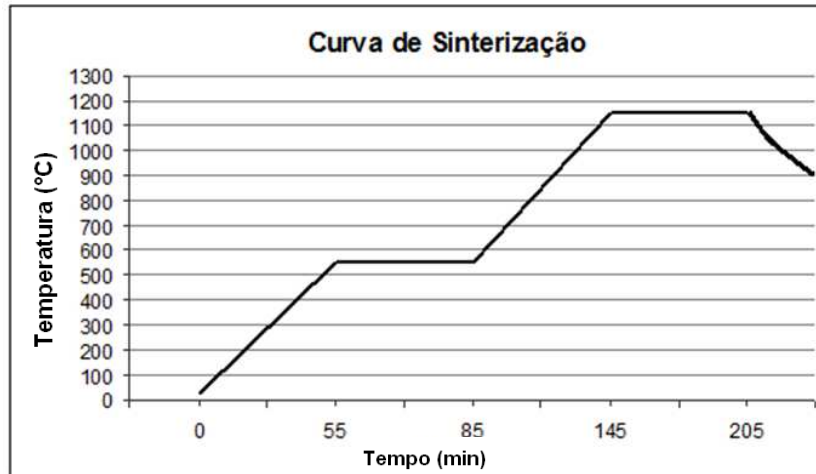


Figura 12 - Curva de sinterização

3.1.3.4. DIMENSÕES E DENSIDADES DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova na forma de cilindro tiveram suas dimensões medidas antes e após a sinterização, com o auxílio de balança de precisão *Marte*, modelo *AL 500* e de paquímetro *Mitutoyo*, precisão 0,01, obtendo-se a densidade aparente (kg/m^3) dos corpos de prova.

3.1.4. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS

3.1.4.1. PROPRIEDADES ELÉTRICAS

A resistividade dos corpos de prova foi determinada a partir do cálculo da resistência elétrica. Para esta medição, utilizou-se multímetro *Minipa*, modelo *ET2930*, equipamento que mede a resistência elétrica do corpo. Para a verificação de resistência elétrica muito baixa, aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. Entretanto, utilizou-se um artifício, pois o inverso é mais prático. Assim, aplicou-se uma corrente no corpo de prova e mediu-se a tensão. [35, 36]

O corpo de prova para determinação da resistividade deve ter área da secção transversal bem menor que seu comprimento. Para isto, realizou-se um corte na secção do perímetro dos corpos de prova na forma de anel (Figura 13). [35, 36]



Figura 13 - Exemplo de material utilizado no ensaio de resistividade

A corrente de valor constante foi fornecida por fonte de corrente contínua *Jomed*, modelo *PS2403D* e mediu-se a tensão sobre o anel com o auxílio de multímetro de precisão *Minipa*, modelo *ET2930*. A resistividade elétrica foi calculada com a Equação 1, a partir da resistência elétrica dos corpos de prova em forma de anel. [35, 36]

$$\rho_e = R \cdot \frac{A}{l} = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{l} \quad (1)$$

O sistema do ensaio está representado na Figura 14,

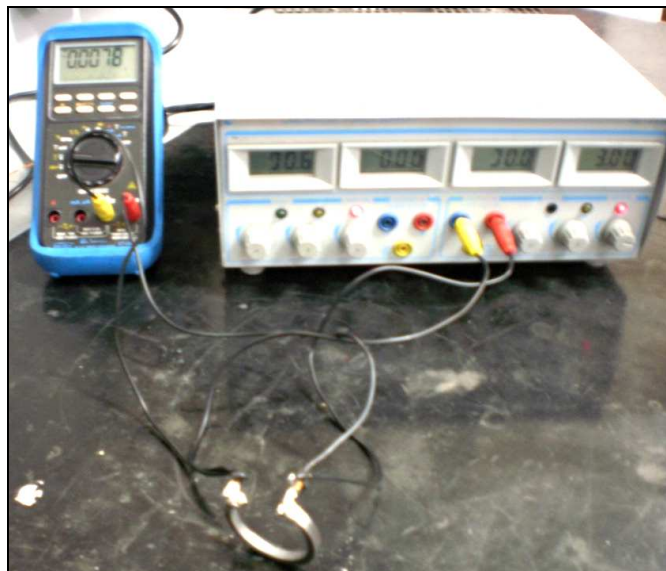


Figura 14 - Sistema para ensaio de resistividade

3.1.4.2. PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

Para a obtenção da curva de histerese e magnetização, tendo como base a norma ASTM A773/A 773M-01, foram confeccionados os anéis de Rowland (Figura 27), a partir dos corpos de prova sinterizados. Inicialmente, os anéis foram isolados

com fita isolante e, em seguida, bobinados com fio de cobre AWG 26 (0,41 mm de diâmetro). Foi obtido o número de espiras da bobinagem secundária. Posteriormente, foram isolados novamente com fita adesiva e bobinados com fio de cobre AWG 23 (0,57 mm de diâmetro). Também, determinou-se o número de espiras da bobinagem primária. Os anéis de Rowland foram, então, conectados ao equipamento como mostra a Figura 15. O equipamento utilizado para aquisição dos dados foi a traçador de curvas de histerese, modelo *TLMP-FLX-D*. Para todas as amostras, utilizou-se durante o ensaio corrente de 5 A e frequência de 0,05 Hz. Os dados de entrada para a obtenção da curva de histerese foram:

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

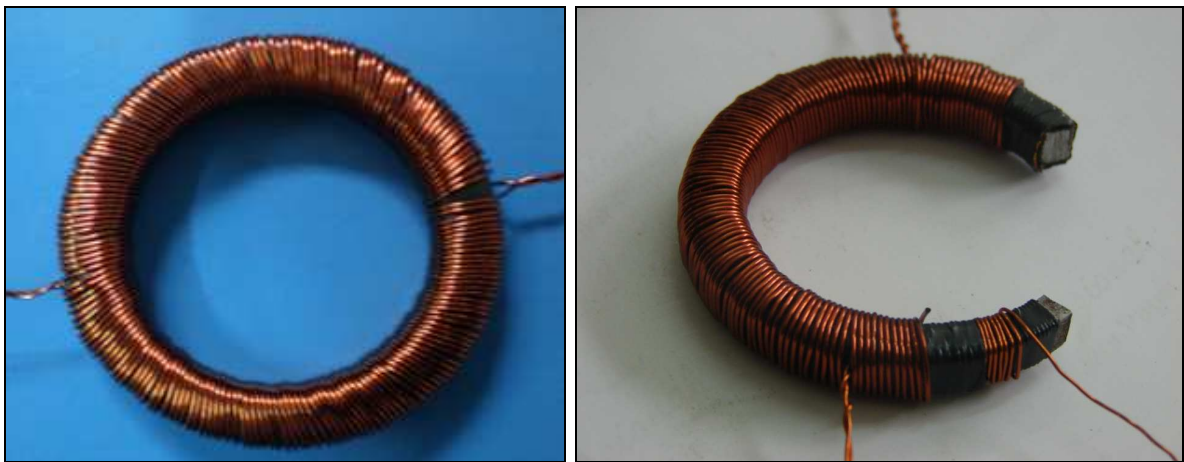


Figura 15 - Anel de Rowland bobinado e corte mostrando as camadas presentes

A Figura 16 mostra uma imagem do esquema de ligação, sendo o secundário ligado na entrada “B” e o primário nos bornes “H”, do traçador de curvas de histerese.



Figura 16 - Esquema de conexão para ensaio de histerese

3.1.4.3. ENSAIOS DE PERDAS MAGNÉTICAS COM A VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA

Para avaliação das perdas magnéticas totais com a variação da frequência, foram construídos corpos de prova na forma de núcleos de transformadores e comparados aos usualmente comercializados de chapas laminadas. O núcleo de transformadores convencionais se constitui de duas partes: o núcleo tipo *E* e o tipo *T* [37]. Estas duas partes são encaixadas para obtenção do núcleo final, onde são acoplados os enrolamentos primário e secundário.

Na avaliação das características de funcionamento e desempenho, foi considerada a geometria de um núcleo transformador convencional com relação 127/220 V para 12 V e corrente de 500 mA. A Figura 17 mostra da esquerda para direita o núcleo maciço obtido através dos processos da M/P e o núcleo de um transformador convencional.

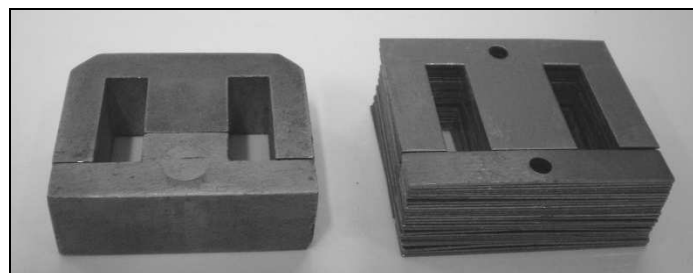


Figura 17 - Núcleo obtido através da M/P (esquerda) e núcleo de chapas laminadas (direita)

A pressão de compactação utilizada foi de 600 MPa. Uma vez compactados, os núcleos foram sinterizados para a obtenção da resistência mecânica nas peças [38]. Após, os núcleos sinterizados foram usinados, no intuito de se obter a mesma dimensão do transformador convencional utilizado para comparação. A Figura 18 mostra os núcleos obtidos pelos processos da M/P após a usinagem.



Figura 18 - Núcleos obtidos através da M/P

Salienta-se que este trabalho usou como base um transformador convencional de baixa potência, desta forma, optou-se por construir os novos núcleos com dimensões mais próximas possíveis do modelo comercial. Ainda, os enrolamentos utilizados nos transformadores desenvolvidos foram os mesmos do transformador original, possibilitando uma comparação sob as mesmas condições. A Figura 19 apresenta o transformador convencional (esquerda) e uma das amostras sinterizadas e montadas (direita):

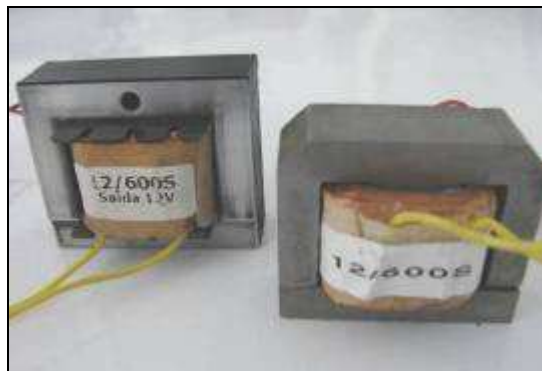


Figura 19 - Núcleo convencional e núcleo maciço obtido por M/P

Para a realização dos ensaios de perdas com a variação da frequência, foi montada uma bancada de testes, conforme a Figura 20, utilizando os seguintes componentes e equipamentos:

- Osciloscópio digital *Minipa*, modelo *MO1150D*
- Multiteste digital *Minipa*, modelo *ET2930*
- Gerador de função *Minipa* (1), modelo *MFG4202*
- Circuito amplificador (3), utilizando *TDA7294*
- Fonte de tensão contínua simétrica *Jomed* (2), modelo *PS2403D* (2)
- Resistor (R1) em série com o primário: $1 \Omega \times 10 W$

- Resistor (R2) conectado no secundário: $10\text{ k}\Omega \times \frac{1}{2}\text{ W}$
- Transformado (enrolamento do primário (4), enrolamento do secundário (5), e núcleo (6))

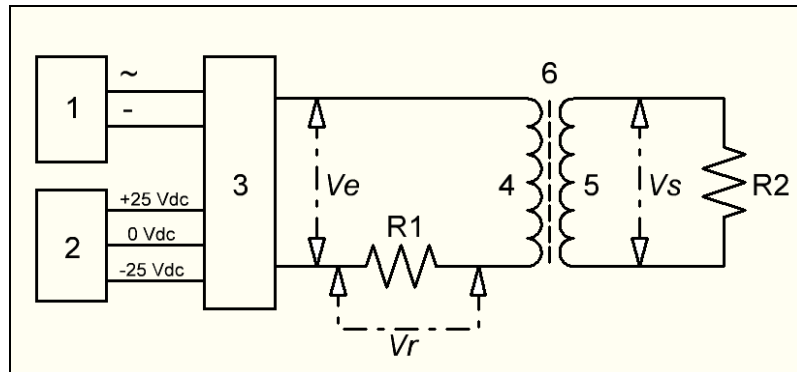


Figura 20 - Esquema da bancada de testes

Os ensaios foram realizados variando-se a frequência (f) de entrada do sinal, com o emprego do gerador de função em conjunto com o circuito amplificador. Para cada frequência, aplicou-se a tensão de entrada (V_e) necessária para que fosse atingida a mesma tensão de saída (V_s) que foi apresentada no transformador convencional, nesta mesma frequência. Uma vez observada a tensão de entrada e através da medição efetuada no resistor em série com o primário, foi possível visualizar no osciloscópio o tempo de defasagem (T_{def}) entre as ondas de tensão e corrente, possibilitando o cálculo do fator de potência ($\cos\phi$), bem como, o valor da corrente de entrada ($I_e=I_r$), importante para a cálculo da potência aparente do transformador. Na Figura 21 pode-se observar as formas de onda de tensão e corrente, e o tempo de defasagem.

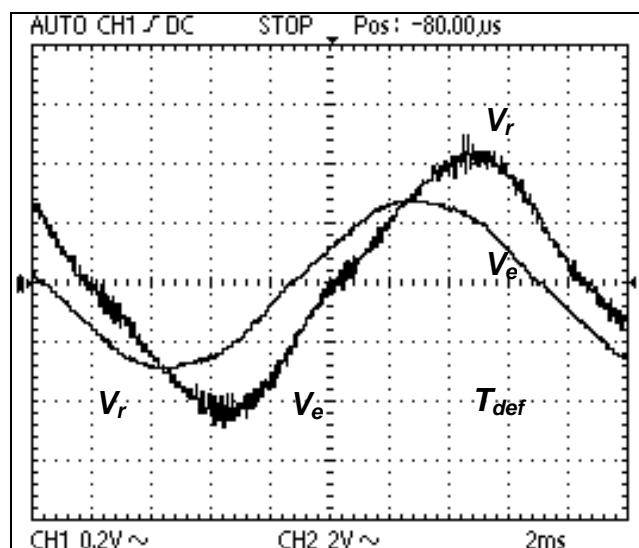


Figura 21 - Formas de onda e tempo de defasagem

Com as medições efetuadas, foi possível calcular θ através da Equação 2:

$$\varphi = \frac{360 \cdot T_{def}}{T} \quad (2)$$

Para o cálculo da potência de entrada no primário (P_p), utilizou-se a Equação 3:

$$P_p = (V_e - V_r) \cdot I_r \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

Sabendo-se que a corrente no resistor pode ser expressa por:

$$I_r = \frac{V_r}{1\Omega} \quad (4)$$

A potência no secundário foi calculada através da Equação 5:

$$P_s = \frac{V_s^2}{10k\Omega} \quad (5)$$

Desta forma, por meio da Equação 6, chegou-se aos valores de rendimentos:

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \cdot 100 \quad (6)$$

3.1.4.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para determinação das ligas a serem utilizadas no desenvolvimento dos motores, foram analisadas, também, as propriedades mecânicas dureza e tensão de escoamento.

a) Dureza: Os ensaios foram realizados com durômetro Precision - England, para medir a Dureza Brinell (HB), sendo utilizados os seguintes parâmetros: endentador tipo esfera de 2,5mm de diâmetro e força de 1.837,5 N.

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

$$\sigma_e = \frac{F}{A} \quad (7)$$

3.2. PROJETO DO GERADOR SÍNCRONO DE 7,5 kW COM ÍMÃS PERMANENTES

3.2.1. INTRODUÇÃO

A máquina síncrona com ímãs permanentes proposta neste trabalho foi projetada baseando-se em um motor de indução trifásico de alto rendimento, 4 polos e 7,5 kW, utilizando carcaça, o estator, eixo e rolamentos da máquina. O núcleo do rotor construído de chapas de aço laminadas foi substituído por um bloco, composto de 5 bolachas de material sinterizado a partir das ligas escolhidas. A Figura 22 mostra uma fotografia do motor utilizado como base para o projeto.



Figura 22 - Motor de indução 3 ϕ 7,5 kW

3.2.2. PROJETO DO NÚCLEO

A topologia e as dimensões do núcleo do rotor foram baseadas nas máquinas de relutâncias convencionais que possuem melhor desempenho de acordo com dados bibliográficos [28]. O rotor foi desenvolvido a partir das características e dimensões do rotor retirado do motor de indução de 7,5 kW. A Figura 23 mostra o motor parcialmente desmontado, podendo assim serem retiradas as cotas do rotor.



Figura 23 - Motor parcialmente desmontado

A Figura 24 mostra a topologia escolhida do núcleo do rotor com a fixação dos ímãs permanentes.

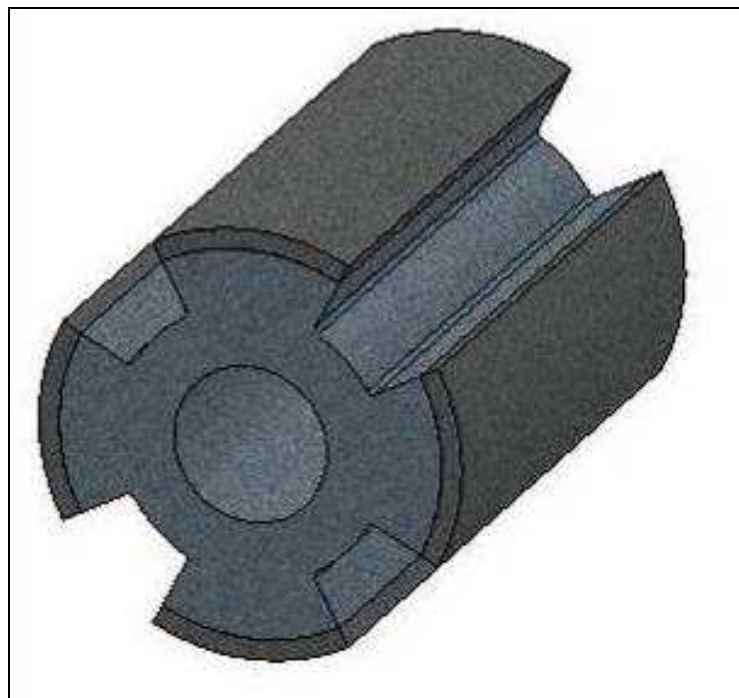


Figura 24 - Topologia do núcleo

O projeto do núcleo também levou em consideração o processo de compactação envolvido na M/P. Uma vez que o rotor apresenta dimensões relativamente grandes, uma matriz para compactação também deveria ser projetada. Entretanto, foi encontrada na oficina do Centro de Tecnologia da UFRGS uma matriz que apresentava dimensões bem próximas ao diâmetro necessário para compactação do

núcleo, utilizada em outro trabalho [28]. Devido aos custos de fabricação da matriz, optou-se então pela utilização desta já pronta, para qual apenas ajustes deveriam ser feitos. O capítulo 3 descreve a matriz e seus componentes.

Sabendo-se o diâmetro e a topologia do núcleo a ser projetado, a matriz a ser utilizada e as peças que seriam reutilizadas do motor inicial, tais como o eixo e rolamentos, pode-se então dimensionar o primeiro rotor a ser compactado. As medidas utilizadas com base encontram-se a seguir:

- Diâmetro do rotor do motor de indução: $\Phi_{rmi} = 137,20$ mm
- Comprimento do núcleo do rotor do motor de indução: $l_{rmi} = 150,00$ mm
- Diâmetro do eixo: $\Phi_{eix} = 49,80$ mm
- Diâmetro da cavidade da matriz: $\Phi_{cm} = 124,10$ mm

A Figura 25 mostra a topologia do rotor no plano horizontal (X).

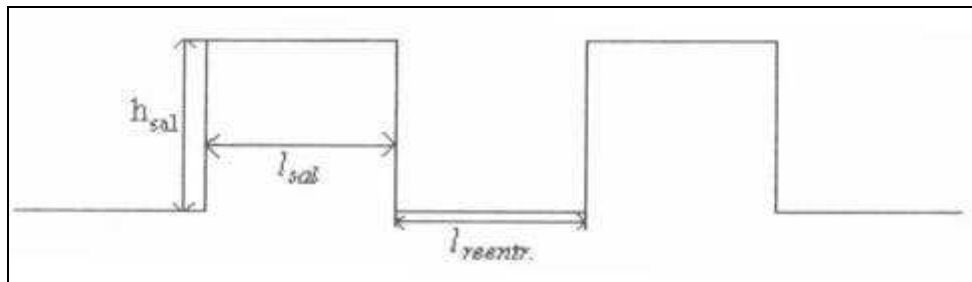


Figura 25 - Topologia do rotor no plano horizontal

A relação utilizada para o cálculo das geometrias do rotor define a altura da saliência h_{sal} [mm] em aproximadamente 50% do raio do núcleo. O raio do núcleo do rotor r_{nr} [mm] é:

$$r_{nr} = \frac{\phi_{cm}}{2} - \frac{\phi_{eix}}{2} \quad (8)$$

$$r_{nr} = \frac{124,1}{2} - \frac{49,8}{2} = 37,15 \quad (9)$$

então:

$$h_{sal} = \frac{37,15}{2} = 18,572 \quad (10)$$

A largura da saliência l_{sal} [mm] e a largura da reentrância l_{reent} [mm] são definidas a partir da relação:

$$\alpha = \frac{l_{sal}}{l_{sal} + l_{reent}} \quad (11)$$

sendo α é uma constante que relaciona estas larguras. Nas máquinas trifásicas síncronas de relutância, α varia de 0,6 a 0,7. O perímetro do rotor foi calculado como:

$$4(l_{sal} + l_{reent}) = \pi \cdot \phi_{cm} \quad (12)$$

então:

$$l_{sal} + l_{reent} = \frac{\pi \cdot 124,1}{4} = 97,41 \quad (13)$$

Admitindo-se $\alpha = 0,65$:

$$l_{sal} = 97,41 \cdot 0,65 = 63,32 \quad (14)$$

$$l_{reent} = 97,41 - 63,32 = 34,07 \quad (15)$$

Representando l_{sal} e l_{reent} em graus, obtém-se $\theta_{sal} = 58,5^\circ$ e $\theta_{reent} = 31,5^\circ$. Entretanto, para facilitar a usinagem ficou definido $\theta_{sal} = 55^\circ$ e $\theta_{reent} = 35^\circ$.

A Figura 26 mostra as cotas do rotor em corte transversal.

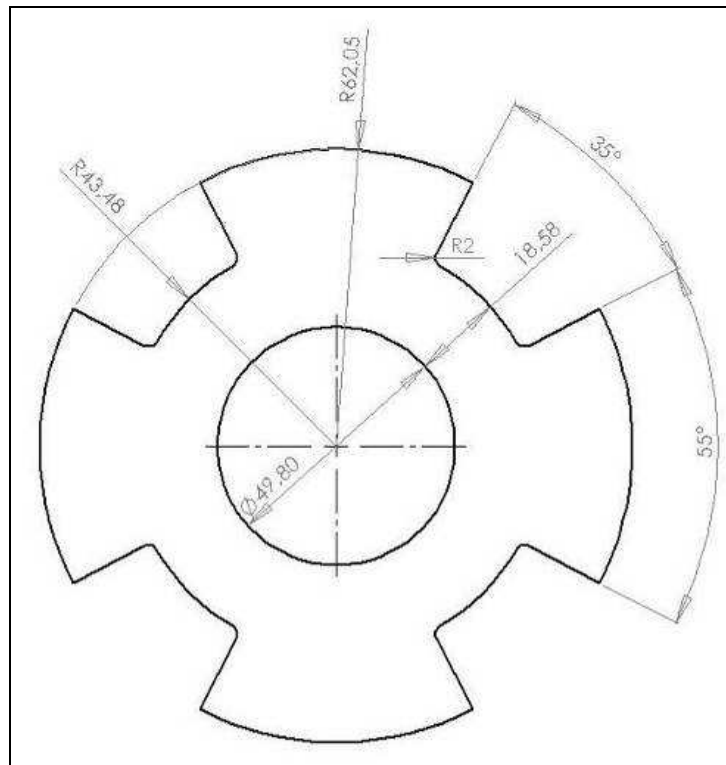


Figura 26 - Cotas do rotor em corte transversal

3.2.3. DIMENSIONAMENTO DOS ÍMÃS

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

A espessura dos ímãs $e_{ímãs}$ [mm] foi definida pela equação:

$$e_{ímãs} = \frac{\phi_{rmi} - \phi_{cm}}{2} \quad (16)$$

$$e_{ímãs} = \frac{137,2 - 124,1}{2} = 6,55 \quad (17)$$

O raio de curvatura dos ímãs é igual a metade do diâmetro da cavidade da matriz, ou seja, 62,05mm, e o comprimento igual à $l_{rmi} = 150$ mm. A Figura 27 mostra as cotas dos ímãs.

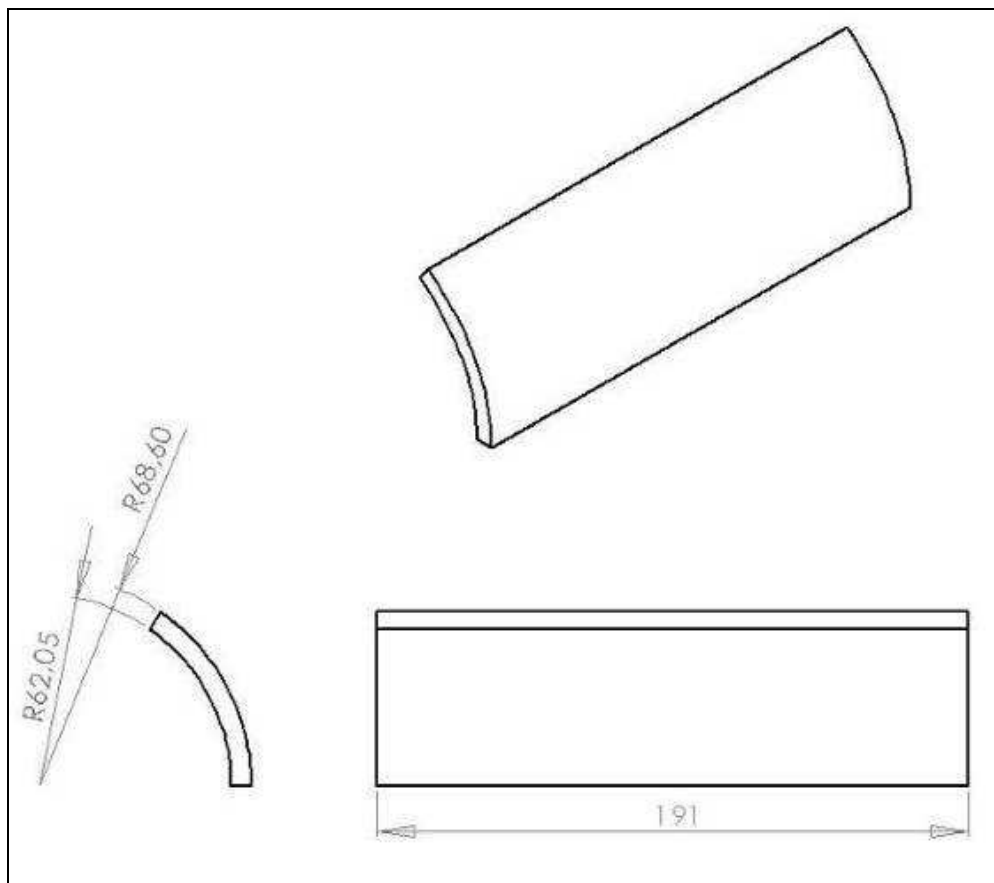


Figura 27 - Cotas dos ímãs

Para aquisição dos ímãs, contatou-se uma empresa na China, que possibilitou a fabricação destes nas dimensões apresentadas.

3.3. SIMULAÇÃO DO GERADOR

3.3.1. INTRODUÇÃO

Os resultados das interações eletromagnéticas foram obtidos através de simulações em programa de elementos finitos FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics). A metodologia de elementos finitos tem como objetivo a solução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas. A ideia principal é dividir o problema em um grande número de regiões, cada um com uma geometria simples (ex. triângulo). [39]

A vantagem de dividir a área inicial em pequenos elementos é que a partir de uma área conhecida, o problema torna-se mais fácil de resolver. Através do processo de discretização, é formado um problema de álgebra linear com milhares de variáveis, o que seria impossível de resolver sem o auxílio de processadores com algoritmos. A figura 28 mostra um diagrama esquemático sobre a metodologia FEM. [39]

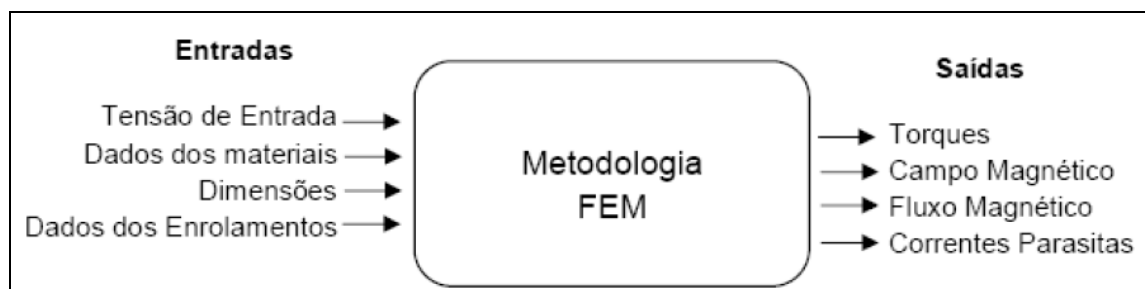


Figura 28 - Metodologia FEM

Determinar as propriedades magnéticas de um motor sem o auxílio de um programa de simulação por elementos finitos é difícil e por muitas vezes impreciso. Através do FEMM 4.2, é possível verificar dados importantes tais como o torque momentâneo da máquina elétrica e o fluxo concatenado em cada bobina. O conhecimento destes resultados permite ao projetista verificar a eficiência da máquina elétrica rotativa e as propriedades que devem ser trabalhadas para atingir o ponto ideal de trabalho. [39]

3.3.2. SIMULAÇÃO MÁQUINA SÍNCRONA

A simulação foi efetuada partindo-se do projeto dimensional do motor, conforme as medidas apresentadas na capítulo 3. Foi utilizada a metodologia de bobinamento

em série para um motor de 4 polos, sendo 12 espiras com fio 12 AWG por ranhura do estator. A corrente nominal utilizada, conforme dados do motor, foi de 14,2 A, para uma tensão de 380V - Y. Cabe lembrar que trata-se de um motor para utilização em frequência padrão de 60Hz.

São formados no rotor, pelos ímãs, quatro polos. Suas polaridades devem ser invertidas a cada sequência, para que se observe fluxo magnético no rotor. A figura 29 ilustra a montagem final da máquina para a simulação no programa de elementos finitos FEMM 4.2, onde, (1), (2) e (3) representam os polos para as correntes “U”, “V” e “W”, (1’), (2’) e (3’) os polos para as correntes “-U”, “-V” e “-W”, (4) os ímãs de NdFeB, com suas respectivas orientações; (5) o eixo do rotor e (6) o núcleo do rotor e estator.

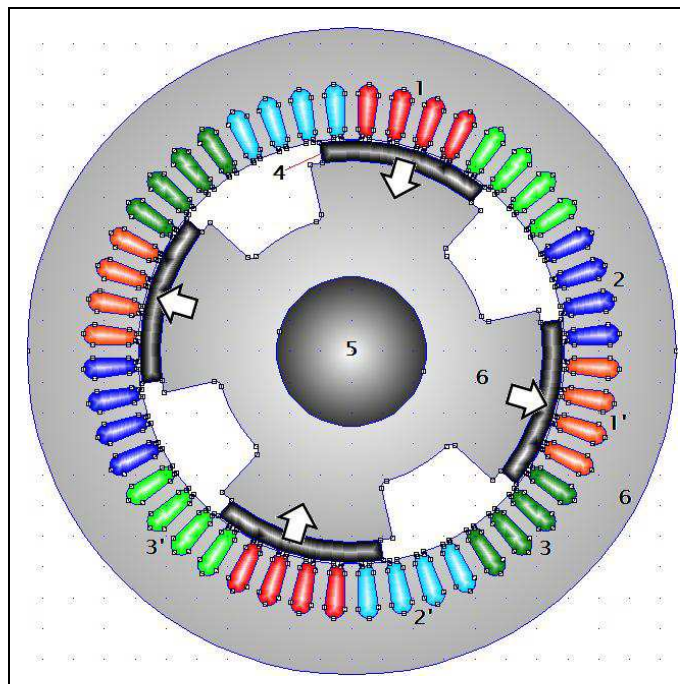


Figura 29 - Corte transversal da máquina analisada no programa de simulação

Foram efetuadas simulações para núcleo da máquina com material laminado, em aço elétrico comum. Em seguida para os núcleos com material sinterizado, utilizando-se Fe puro e as ligas Fe1%P, Fe1%Si, Fe2%P, Fe3%P, Fe3%Si, Fe5%Si e Fe50Ni. O teor das adições de silício, fósforo e níquel nas ligas foram baseadas em dados da literatura [27-31] e em resultados obtidos com corpos de prova testados no LdTM (Laboratório de Transformação Mecânica). Foram analisadas propriedades mecânicas (densidade, dureza e tenacidade) e perdas magnéticas (perdas por ciclo de histerese e perdas correntes de Foucault) [40-42].

Após obtenção das curvas de magnetização dos materiais sinterizados (Pág. 60, Figura 45), como demonstrado na Figura 30, estes dados foram inseridos no programa FEMM 4.2.

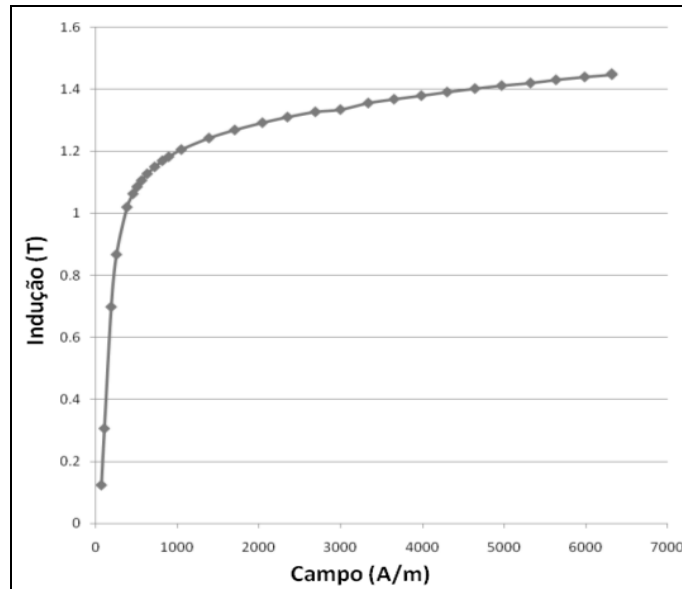


Figura 30 - Curva de magnetização do Fe2%P sinterizado.

3.4. MONTAGEM DO GERADOR

3.4.1. INTRODUÇÃO

Para a obtenção do núcleo da máquina, optou-se por desenvolver um projeto no qual o rotor, ao invés de ser um único bloco, pudesse ser dividido em poucas peças de material sinterizado, ou bolachas, uma vez que, para compactar uma única peça no comprimento do rotor, envolveria dimensões de matriz e pressões muito altas.

3.4.2. DESENVOLVIMENTO DA MATRIZ E FERRAMENTAL

Para a compactação das bolachas que constituem o núcleo do rotor, uma matriz deveria ser projetada e construída, onde a cavidade apresentasse o diâmetro levemente maior que o do núcleo do rotor. Entretanto, foi encontrada na oficina do Centro de Tecnologia da UFRGS uma matriz que apresentava dimensões bem próximas, utilizada em outra pesquisa [28]. Foi apenas necessário projetar punções novos e adaptar esta matriz, retificando-a e projetando um sistema de fixação na prensa. A Figura 31 mostra a fotografia de matriz antes dos ajustes.



Figura 31 - Foto da matriz

Punções foram projetados, no intuito de se obter uma peça maciça, no formato da cavidade da matriz. A Figura 32 mostra o desenho do projeto do punção superior, enquanto que a Figura 33 o desenho do projeto do punção inferior.

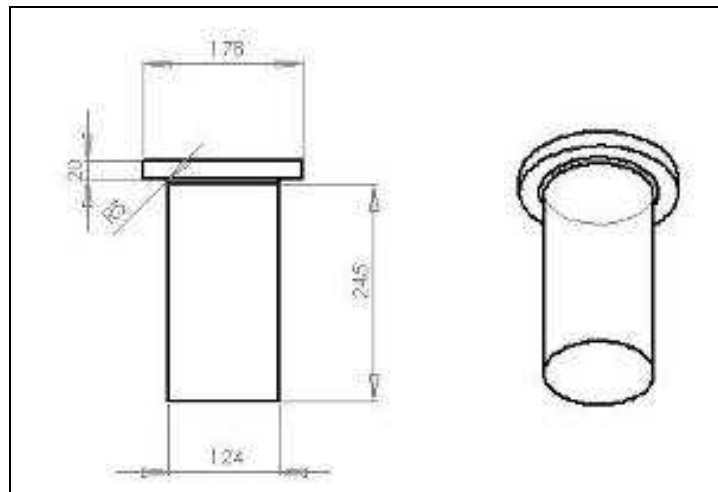


Figura 32 - Punção superior

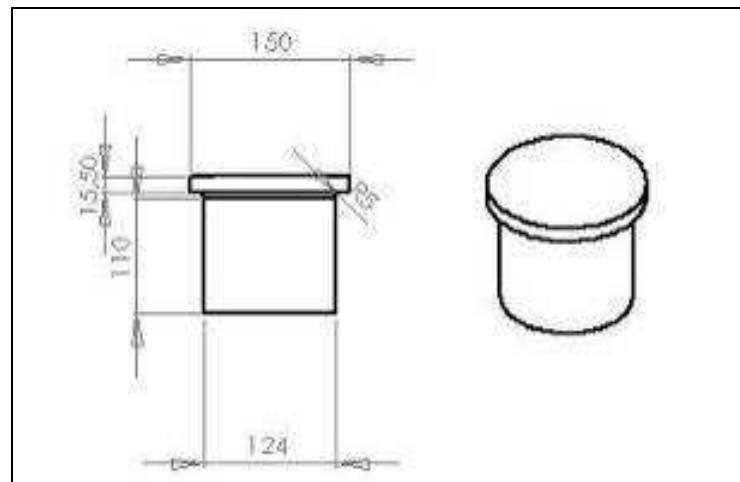


Figura 33 - Punção inferior

Conforme será descrito no item 3.4.3, a força necessária para compactação é de aproximadamente 600 toneladas. A prensa capaz de fornecer tal força é a FKL, localizada no Centro de Tecnologia da UFRGS.

Para a fixação da matriz na prensa, utilizou-se uma mesa de aço, que foi parafusada à base da prensa. Na matriz, foi soldado um anel que serviu de sustentação desta na mesa. Calços foram usinados para servir de apoio ao punção inferior. Também foi feito um aro de alumínio que foi alojado entre a mesa e o anel de aço, servindo como um amortecedor, viabilizando assim, no momento da compactação ajustes de alinhamento do punção superior com a cavidade da matriz.

3.4.3. OBTENÇÃO DOS NÚCLEOS DO ROTOR

Para a obtenção da mistura da quantidade de pó necessária para a compactação do núcleo do rotor do gerador desenvolvido, cerca de 15 kg, foi necessária a utilização de um misturador relativamente grande. A Figura 34 mostra a fotografia do misturador utilizado.



Figura 34 - Misturador tipo "V"

A pressão escolhida para compactação das peças que compõe o núcleo da máquina foi 600 MPa:

$$600MPa = 6 \times 10^8 \frac{N}{m^2} = 6 \times 10^4 \frac{ton}{m^2} = 6 \frac{ton}{cm^2} \quad (18)$$

O diâmetro de cavidade da matriz é de aproximadamente 120 cm², então a força aplicada pela prensa é de:

$$F_{FKL} = 120\text{cm}^2 \cdot 6 \frac{\text{ton}}{\text{cm}^2} = 720\text{ton} = 7.060,79\text{kN} \quad (19)$$

A Figura 35 mostra a fotografia de uma das cinco peças compactadas.



Figura 35 - Peça compactada

O Quadro 6 mostra a densidade a verde, a qual é obtida antes da sinterização, calculada para cada peça.

Quadro 6 - Densidade a verde

Peça	Massa (g)	ϕ (mm)	h (mm)	Volume (cm³)	Densidade a verde (kg/m³)
1	5.980	124,28	76,26	925,07	6.460
2	4.340	124,28	55,41	672,15	6.460
3	3.905	124,30	49,91	605,63	6.450
4	4.090	124,20	52,35	634,22	6.450
5	2.045	124,25	25,79	312,70	6.540

Comparando-se a densidade a verde das peças compactadas com a dos corpos de prova (capítulo 4.1, tabela 7), que apresentaram uma média de 6.580 kg/m³, nota-se que as peças para este parâmetro estão aceitáveis.

A sinterização das peças foi realizada em forno tubular tipo mufla, com atmosfera controlada e argônio, conforme os patamares de sinterização representados na Figura 12 (Página 34).

A Figura 36 mostra as peças sinterizadas (1) e também o rotor que será substituído (2).

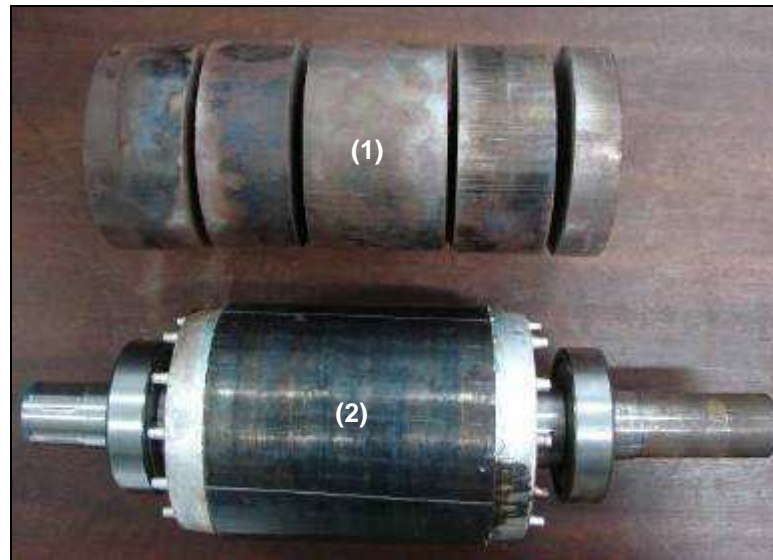


Figura 36 - Peças sinterizadas

As peças foram usinadas conforme o projeto descrito no item 3.2.2. A figura 37 mostra a fotografia das peças usinadas.



Figura 37 - Peças usinadas

3.4.4. MONTAGEM FINAL DA MÁQUINA

As peças foram introduzidas no eixo do gerador sob pressão, utilizando-se uma prensa. A Figura 38 (a) mostra a fotografia do eixo, rolamentos e as peças usinadas, e a Figura 38 (b), o rotor parcialmente montado (1) e o rotor a ser substituído (2).

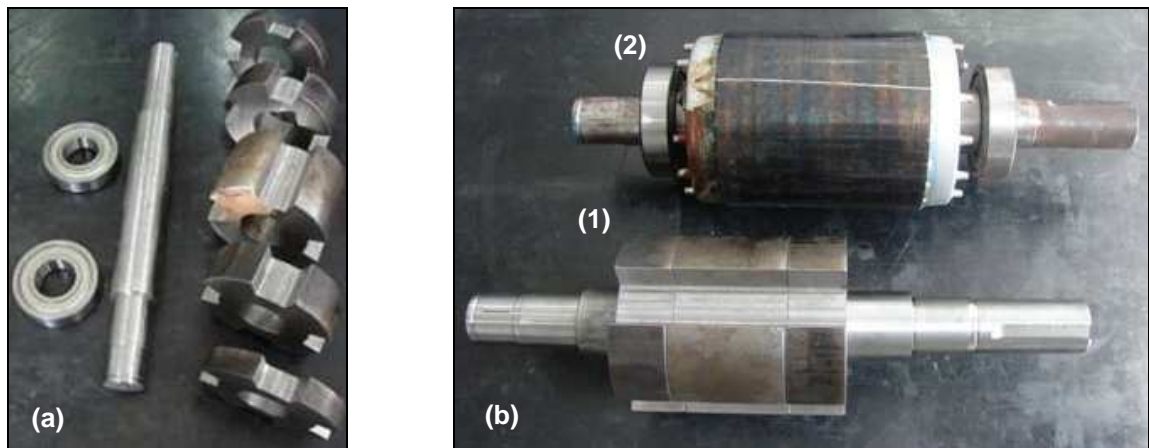


Figura 38 - Componentes (a) e pré-montagem do rotor (b-1)

A Figura 39 mostra os ímãs fixados no rotor.



Figura 39 - Fixação dos ímãs

3.5. DISPOSITIVO DE ACIONAMENTO UTILIZADO

3.5.1. INTRODUÇÃO

Para realizar os ensaios da máquina, uma bancada de testes foi projetada e construída com peças e equipamentos disponíveis no Laboratório de Transformação Mecânica, onde esta pesquisa foi realizada. Na bancada construída, a máquina rotativa pode ser testada como motor e gerador.

3.5.2. DESCRIÇÃO DA BANCADA DE TESTES

A estrutura física da bancada foi montada reutilizando-se partes recicladas de outras bancadas e prateleiras, disponíveis no laboratório, conforme pode ser visto na Figura 40. Materiais elétricos de consumo, como cabos, conectores, interruptores, lâmpadas indicativas, soquetes, etc., foram adquiridos no comércio, utilizando verba de projetos de pesquisa desenvolvidos no laboratório, e a taxa de bancada.



Figura 40 - Bancada de testes

Um motor trifásico de 7,5 kW de dois polos foi instalado, para rotacionar a máquina construída e um inversor trifásico vetorial *CFW-080280T* para ajustar os níveis de tensão e frequência aplicados ao motor principal, ou a máquina. Este inversor pode ser acionado remotamente, facilitando assim os controles da tensão (0-600 V) e frequência (0-300 Hz) aplicados.

Medidores de tensão (1) e corrente (2) foram instalados para monitorar estes parâmetros, em cada fase, do motor principal (a) ou máquina testada como gerador e/ou motor (b), como mostra a Figura 41.

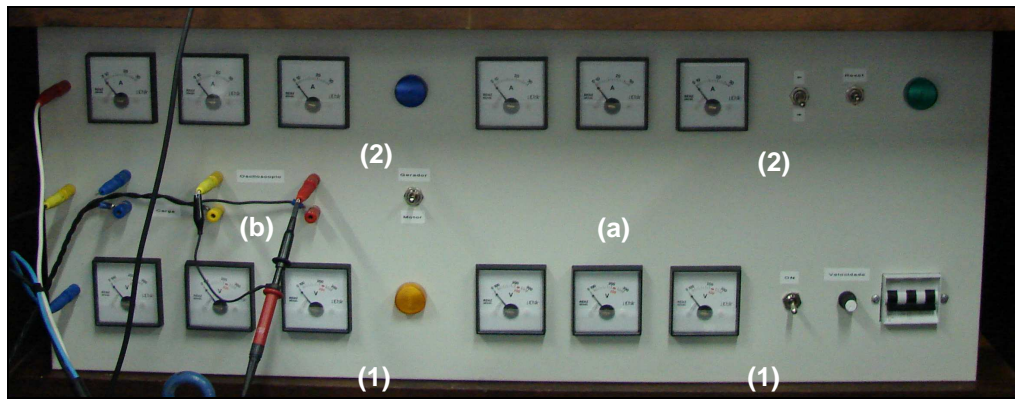


Figura 41 - Indicadores de tensão e corrente

A estrutura construída também disponibilizou de osciloscópio digital, para visualizar as formas de onda de tensão gerada, tacógrafo digital, sensor de torque, e *datalogger*, como demonstra a Figura 42.

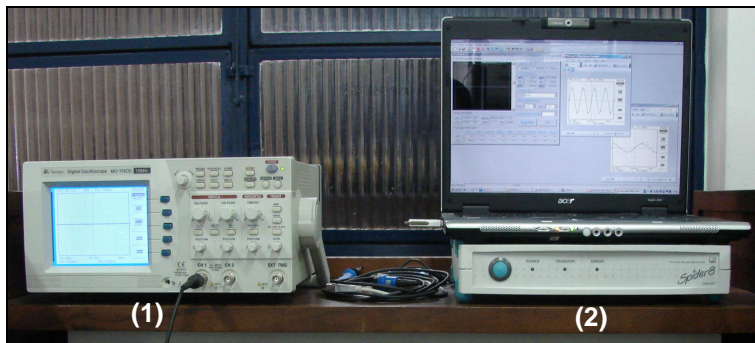


Figura 42 - Osciloscópio (1), *datalogger* (2), tacógrafo (3) e sensor de torque (4)

Lâmpadas incandescentes de 70W foram instaladas para serem utilizadas como carga.

3.6. ENSAIOS DA MÁQUINA CONSTRUÍDA

3.6.1. INTRODUÇÃO

A máquina construída foi instalada na bancada de testes, e pode ser testada em diversas velocidades de rotação. Ela foi conectada fisicamente ao um motor trifásico de 7,5kW através de um acoplador mecânico e conectada por cabos, aos bornes de entrada da bancada de testes. Na figura 43, pode-se observar a máquina construída (b) conectada fisicamente ao motor (a), através do acoplador mecânico (c).

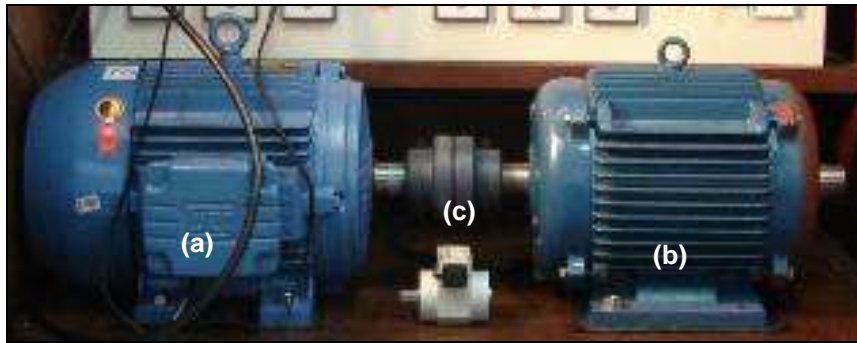


Figura 43 - Conexão física da máquina na bancada de testes

Níveis de tensão, corrente e frequência, foram mensurados pelo osciloscópio digital, e a velocidade de rotação, pelo tacógrafo digital. Na saída do gerador, foram conectadas, em estrela, três lâmpadas incandescentes de 70W cada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CORPOS DE PROVA

A Figura 44 mostra os corpos de prova das ligas magnéticas obtidas, onde se pode observar, da esquerda para direita, o cilindro, o anel e os núcleos dos transformadores.

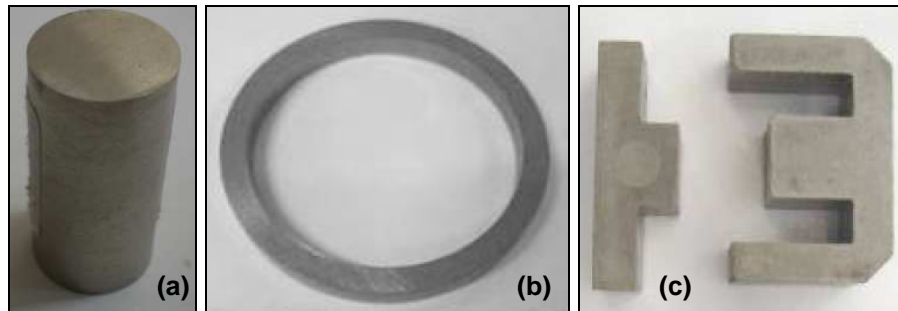


Figura 44 - Corpos de prova

(a) Cilindro, (b) Anel e (c) Núcleos dos transformadores tipo T e E

Todas as grandezas físicas observadas relacionadas a seguir foram consideradas como a média aritmética de três corpos de prova para a obtenção do valor final.

4.1.1. DENSIDADE DOS CORPOS DE PROVA

Devido à proximidade dos resultados encontrados na avaliação das densidades, optou-se pela apresentação dos valores das densidades dos corpos de prova na forma de cilindro. As dimensões antes e após a sinterização seguem nos Quadros 7 e 8.

Quadro 7 - Densidades dos corpos de prova a verde na forma de cilindro

Liga	Densidade (kg/m³)	
	Média	Desvio Padrão
<i>Fe Puro</i>	6.580	29,1
<i>Fe1%P</i>	6.464	34,3
<i>Fe2%P</i>	6.494	4,6
<i>Fe3%P</i>	6.336	9,6
<i>Fe1%Si</i>	6.559	15,7
<i>Fe3%Si</i>	6.478	20,4
<i>Fe5%Si</i>	6.468	4,0
<i>Fe50Ni</i>	6.633	118,0

Quadro 8 - Densidades dos corpos de prova sinterizados na forma de cilindro

<i>Liga</i>	<i>Densidade (kg/m³)</i>	
	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
<i>Fe Puro</i>	6.632	23,4
<i>Fe1%P</i>	6.712	38,6
<i>Fe2%P</i>	6.874	21,9
<i>Fe3%P</i>	7.003	16,5
<i>Fe1%Si</i>	6.697	72,6
<i>Fe3%Si</i>	6.732	49,1
<i>Fe5%Si</i>	6.762	23,8
<i>Fe50Ni</i>	7.251	24,0

As referências bibliográficas indicam que o ferro puro sinterizado apresenta uma densidade entre 6.800 a 7.400 kg/m³, resultando contudo neste estudo em uma densidade de 6.632 kg/m³. O Fe1%P apresenta uma densidade entre 7.000 a 7.400 kg/m³, porém os resultados apresentaram uma densidade de 6.712 kg/m³. O Fe3%Si apresenta uma densidade entre 6.800 a 7.200 kg/m³, mas a densidade resultante nesta pesquisa foi de 7.003 kg/m³. O Fe50%Ni apresenta uma densidade entre 6.800 a 7.500 kg/m³, entretanto nos testes realizados uma densidade de 7.251 kg/m³.

Observa-se que a densidade de ligas sinterizadas, tais como ferro fósforo, é maior que a do ferro puro, porque o fósforo na sinterização atinge a fase líquida, ocupando assim os interstícios entre as partículas de pó de ferro, fazendo com que em sua solidificação, haja uma maior contração das peças, aumentando assim sua densidade. [27, 43].

Das considerações, observa-se que somente a liga Fe50%Ni estudada resultou na densidade de acordo com as referências. As outras ligas ficaram no limite inferior ou abaixo deste. Tal ocorreu devido às muitas variantes nos processos da M/P, no qual fatores como tamanho e forma de partícula, pressão de compactação, patamares de sinterização e atmosfera influenciam na densidade desejada [27, 43].

Além disto, percebeu-se em estudos preliminares que, em muitas referências bibliográficas sobre as densidades obtidas de ligas sinterizadas, não consta a pressão de compactação. Salienta-se também que, em alguns estudos utilizam-se pressões até 800 MPa para materiais compósitos por M/P [44], e tal pressão tende a aumentar a densidade.

4.1.2. PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS

Foram obtidas propriedades magnéticas e resistividade elétrica para os corpos de prova estudados. A Figura 45 mostra as curvas de magnetização do ferro puro sinterizado e das ligas misturadas com fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 5%) e níquel (50%).

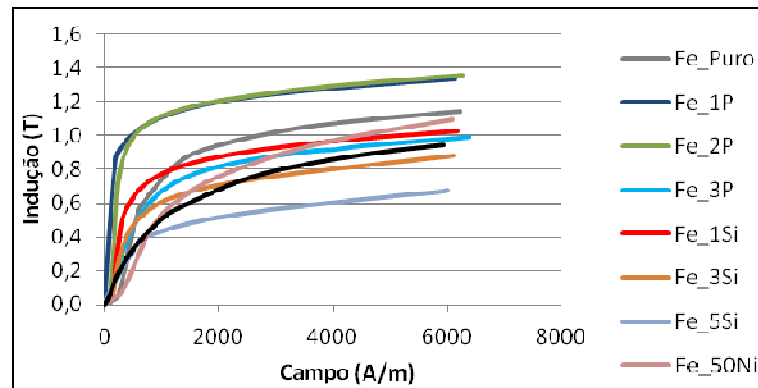


Figura 45 - Curvas de magnetização das ligas sinterizadas

A Figura 46 mostra os laços de histerese do ferro puro sinterizado e dos resultados mais significativos em cada liga.

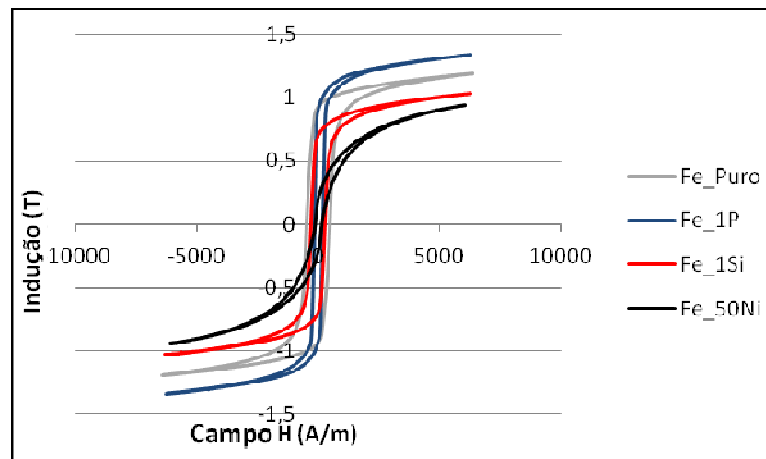


Figura 46 - Laço de histerese com os materiais estudados.

A partir da Figura 46, pode-se observar que o Fe50%Ni apresentou menores coercitividade e perdas por histerese (área interna da curva) que os demais materiais sinterizados. Porém, apresentou também, menor indução de saturação, propriedade de grande importância para aplicação destes materiais em núcleos de máquinas elétricas. Salienta-se que a curva de histerese do Fe puro tem características semelhantes ao ferro baixo carbono, material típico utilizado em pacotes de chapas laminadas utilizados na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas convencionais. O Fe1%P apresentou maior indução máxima,

menores perdas por histerese e coercitividade em relação ao Fe puro, resultado esperado e indicado para utilização em máquinas elétricas rotativas [15,16].

O Quadro 9 mostra os resultados da resistividade elétrica e das propriedades magnéticas observadas, a partir dos corpos de prova na forma de anel.

Quadro 9 – Propriedades magnéticas e resistividade elétrica

Liga	Resistividade ($\Omega.m$)	Indução de saturação (T)	Magnetismo Remanente (T)	Força Coercitiva (A/m)	Permeabilidade Magnética Relativa
<i>Fe Puro</i>	$1,57.10^{-7}$	1,19	0,90	448,2	1852,6
<i>Fe1%P</i>	$1,97.10^{-7}$	1,25	0,96	215,8	2766,1
<i>Fe2%P</i>	$3,58.10^{-7}$	1,36	1,00	207,9	4198,7
<i>Fe3%P</i>	$4,21.10^{-7}$	0,98	0,50	210,7	919,4
<i>Fe1%Si</i>	$2,76.10^{-7}$	1,03	0,71	246,3	1959,8
<i>Fe3%Si</i>	$4,44.10^{-7}$	0,85	0,48	225,4	1258,7
<i>Fe5%Si</i>	$4,82.10^{-7}$	0,67	0,30	216,3	493,8
<i>Fe50%Ni</i>	$3,71.10^{-7}$	0,93	0,22	112,1	945,6

A resistividade aumentou com a adição de P, Si, e Ni no Fe, pois estes acréscimos provocam distorções no reticulado cristalino [45, 46]. O Fe puro apresentou resistividade de $1,57.10^{-7} \Omega.m$, contra $4,82.10^{-7} \Omega.m$ da liga Fe5%Si. A maior resistividade foi obtida na liga Fe5%Si, pois o silício, durante o processo de sinterização, não se densifica homoganeamente no ferro e a substituição dos grãos de ferrita pelo Si aumenta a imperfeição na rede cristalina e eleva a resistividade [47-49]. As elevadas resistividades apresentadas no ensaio com material magnético macio são fundamentais para o uso em núcleo de máquinas elétricas rotativas, uma vez que, desta maneira, reduzem-se as correntes parasitas. Também são fundamentais valores elevados de permeabilidade magnética relativa e indução de saturação, obtidos nos ensaios de histerese, proporcionando assim elevado fluxo magnético no entreferro [50-52]. Observa-se também que a liga Fe2%P foi à segunda de menor coercitividade e com melhores propriedades magnéticas em geral, o que justificaria esta liga para a construção do núcleo do rotor, porém esta não foi utilizada, pois como será descrito posteriormente, apresentou uma alta dureza, dificultando assim sua usinagem.

4.1.3. PERDAS MAGNÉTICAS

As Figuras 47 e 48 mostram os rendimentos e as perdas dos transformadores construídos por M/P e suas comparações com o transformador utilizado comercialmente, com a variação da frequência, conforme descrito em 3.1.4.3:

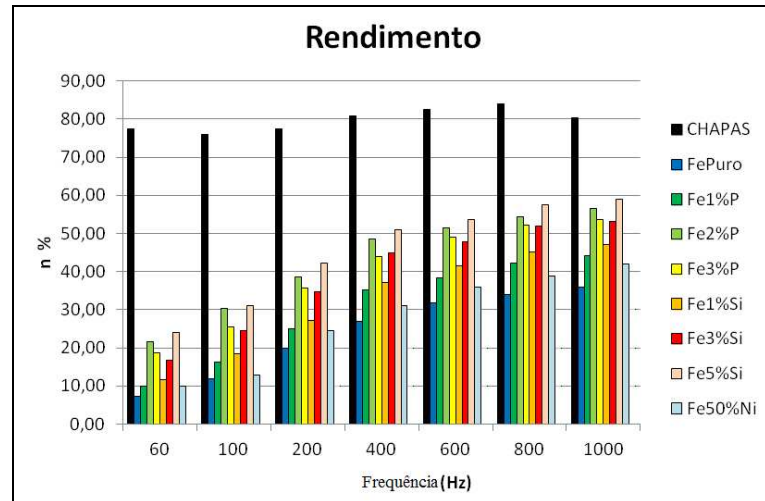


Figura 47 - Rendimento dos transformadores com a variação da frequência

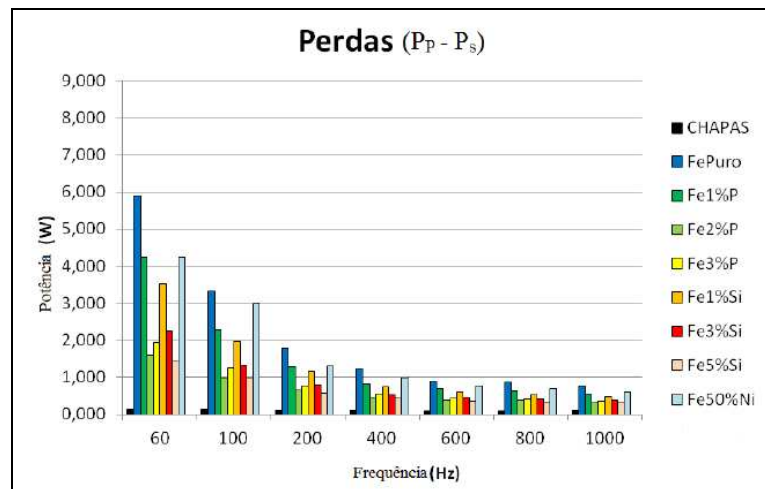


Figura 48 - Perdas com a variação da frequência

Analisando-se o gráfico das perdas em frequência observa-se que as perdas magnéticas por corrente de Foucault e histerese, em núcleos sinterizados diminuem drasticamente até aproximadamente 400 Hz, tendendo a uma estabilidade para frequências maiores. Em os núcleos de chapas, tais perdas tendem a manterem-se constantes em função da frequência, o que corrobora as citações bibliográficas [53].

Na avaliação das perdas observadas através do ensaio dos núcleos de pequenos transformadores, com o acréscimo da frequência, a tensão induzida aumenta, a corrente de magnetização diminui e, desta maneira, as perdas seriam

menores para os núcleos construídos com chapas laminadas. No entanto, para frequências acima de 400 Hz, o efeito da construção do núcleo de chapas laminadas não reduz as correntes parasitas, comparativamente ao núcleo maciço, ou seja, a tensão induzida aumenta e a corrente de magnetização diminui, mas as correntes parasitas aumentam. Nos núcleos sinterizados, somente a tensão induzida aumenta, a corrente de magnetização diminui e as correntes parasitas não sofrem acréscimo em seu valor conforme bibliografia [53-55].

4.1.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS

O Quadro 10 mostra a dureza para as diversas ligas sinterizadas estudadas, de acordo com os valores da escala Brinell.

Quadro 10 - Dureza Brinell para ligas sinterizadas

Ligas	Dureza Brinell (HB)
<i>Fe-puro</i>	52,07
<i>Fe1%P</i>	124,50
<i>Fe2%P</i>	202,40
<i>Fe3%P</i>	242,90
<i>Fe1%Si</i>	64,50
<i>Fe3%Si</i>	73,20
<i>Fe5%Si</i>	101,90
<i>Fe50%Ni</i>	101,00

A média dos resultados obtidos da tensão de escoamento é demonstrada no Quadro 11 mostra um comparativo para as diversas ligas sinterizadas estudadas.

Quadro 11 - Tensão de escoamento

Liga	Força [N]	Tensão de Escoamento [N/mm²]
<i>Fe-puro</i>	1.947	137,10
<i>Fe1%P</i>	2.059	144,94
<i>Fe2%P</i>	1.759	123,87
<i>Fe3%P</i>	1.669	117,50
<i>Fe1%Si</i>	2.078	146,31
<i>Fe3%Si</i>	2.226	156,70
<i>Fe5%Si</i>	2.400	168,95
<i>Fe50%Ni</i>	2.295	161,60

O acréscimo de fósforo permite obter as propriedades mecânicas desejadas utilizando temperaturas de sinterização menores, devido à formação de fase líquida transiente [45, 57]. O fósforo em percentuais inferiores a 1% não confere ao ferro sinterizado diminuição do limite de escoamento. Por outro lado, sua presença promove o aumento da dureza [45, 56, 57].

Qualquer acréscimo do teor de um elemento de liga em um metal como o ferro, aumenta a dureza da liga devido às distorções no reticulado cristalino [58].

Cita-se que a liga escolhida para obtenção do núcleo do rotor foi o ferro puro sinterizado. A tensão de escoamento para o ferro sinterizado resultou em 140 MPa ($137,10 \text{ N/mm}^2$) considerando a média obtida de três ensaios em três corpos de prova diferentes. O aço 1008 apresenta tensão de escoamento média de 170 MPa [59].

A dureza média para o ferro sinterizado foi de 52,5 HB, considerando a média obtida de três ensaios em três corpos de prova diferentes. O Aço AISI 1008 possui dureza de 86 HB [59].

Portanto, com relação às propriedades mecânicas, o material ferro puro sinterizado apresenta valores próximos ao aço 1008, utilizado na construção dos núcleos das maiorias das máquinas elétricas rotativas [9, 10].

O ferro puro sinterizado foi escolhido para o núcleo, pois o mesmo apresenta boas propriedades magnéticas e mecânicas, embora apresente a menor resistividade elétrica, o que induz correntes parasitas e perdas por correntes de Foucault. Entretanto, considerando que o núcleo do rotor possui ímãs permanentes que tendem a produzir um fluxo magnético constante (ou com poucas variações), não havendo variação de fluxo ou com a redução do mesmo, as perdas por correntes induzidas ou parasitas serão mínimas. Devido ao alto custo de uma matriz para compactação do núcleo do rotor na forma final (com saliências e reentrâncias) optou-se pela compactação de bolachas e posterior usinagem para a forma do núcleo. Assim, o material não poderia ter dureza elevada, pois dificultaria a posterior usinagem. Das tabelas anteriores, observa-se que a menor dureza de todas as ligas estudadas é a de ferro puro.

4.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DA MÁQUINA

As simulações realizadas com o programa FEMM 4.2 [60] mostraram as linhas de campo expostas na Figura 49 (a) para o rotor de chapas, 49 (b) para o rotor

Fe2%P sinterizado. A Figura 49 (c) apresenta a legenda com os respectivos valores dos componentes de densidade de fluxo B (T).

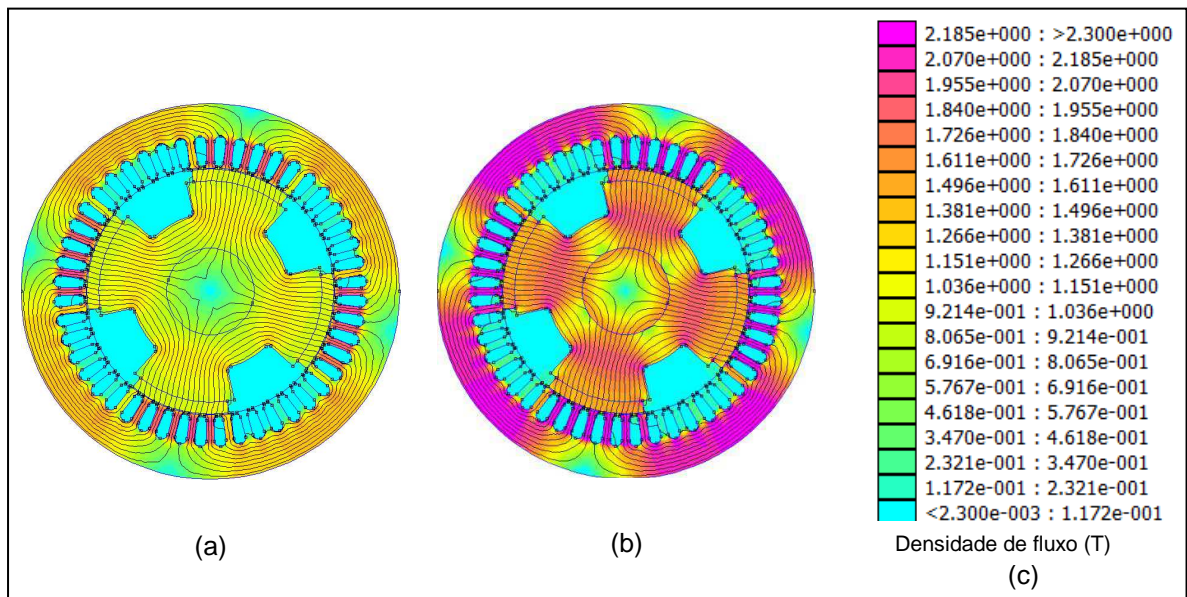


Figura 49 - Fluxo magnético no máquina simulada

A partir dos resultados de fluxo magnético na máquina, foi possível fazer uma análise da liga que possui maior densidade de fluxo magnético, conforme o gráfico da Figura 50.

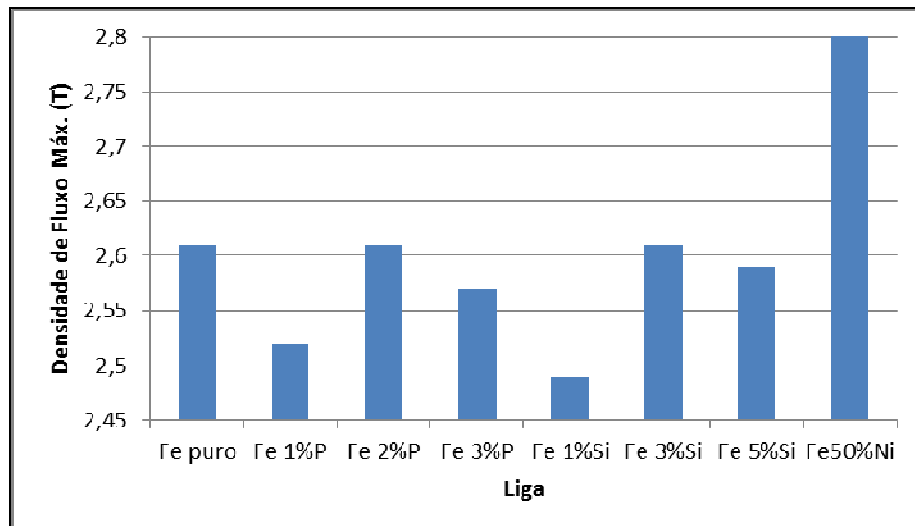
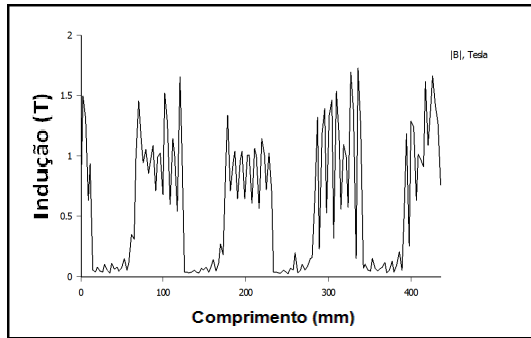
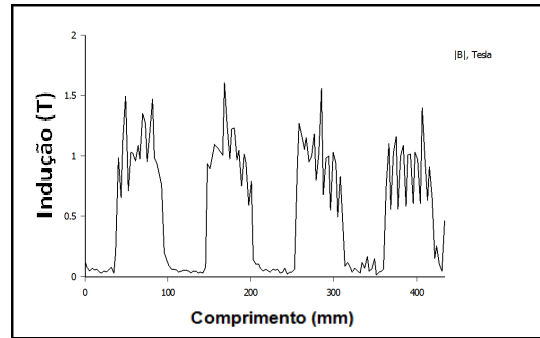


Figura 50 - Densidade de fluxo magnético no rotor, comparando ligas sinterizadas.

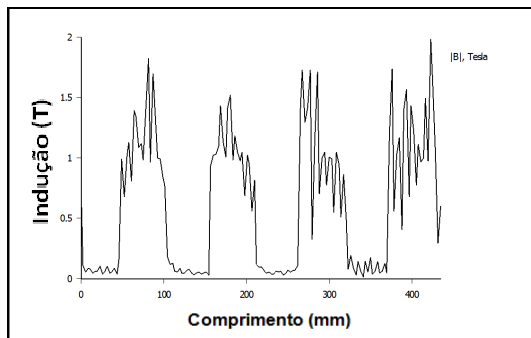
A figura 51 apresenta a distribuição espacial da densidade de fluxo magnético em módulo no entreferro, resultado das simulações com as diferentes ligas.



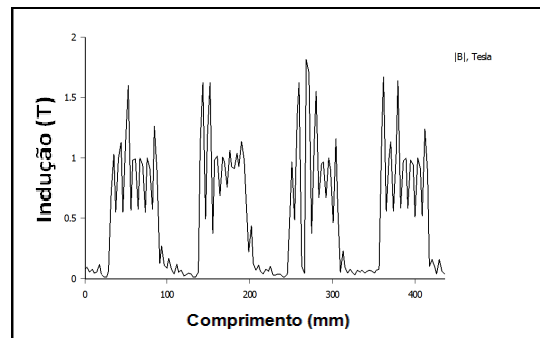
(a) Fe Puro



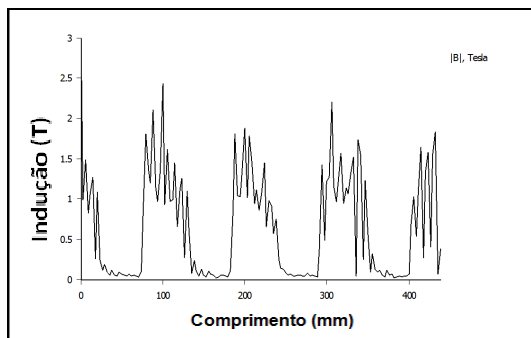
(e) Fe3%P



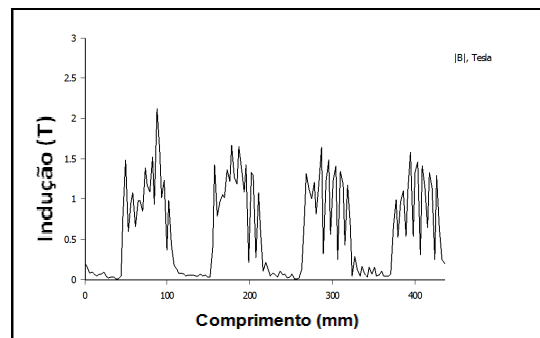
(b) Fe1%P



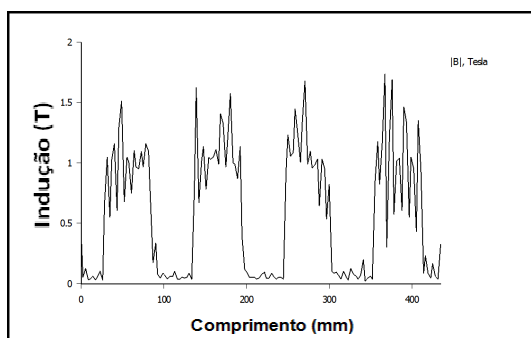
(f) Fe3%Si



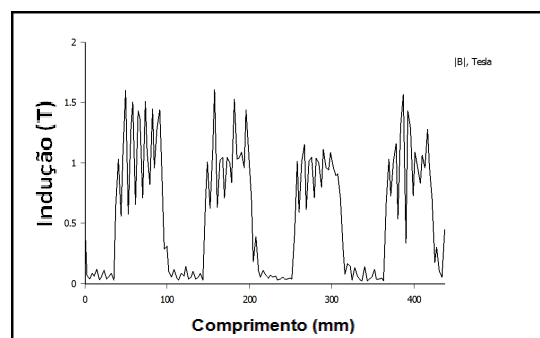
(c) Fe1%Si



(g) Fe5%Si



(d) Fe2%P



(h) Fe50Ni

Figura 51 - Magnitude de fluxo magnético das ligas

Comparação entre o torque da máquina em relação aos vários materiais simulados:

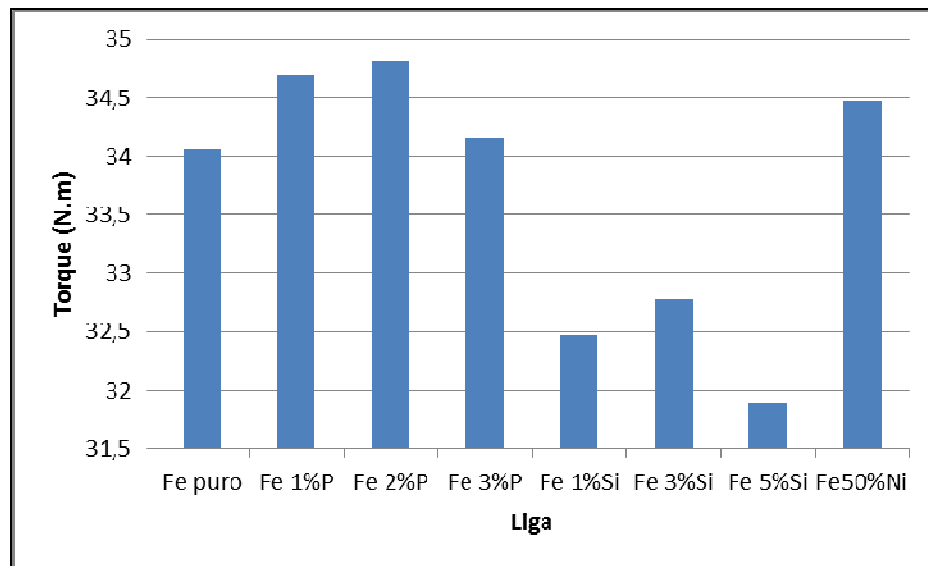


Figura 52 - Torque da máquina em relação ao material simulado

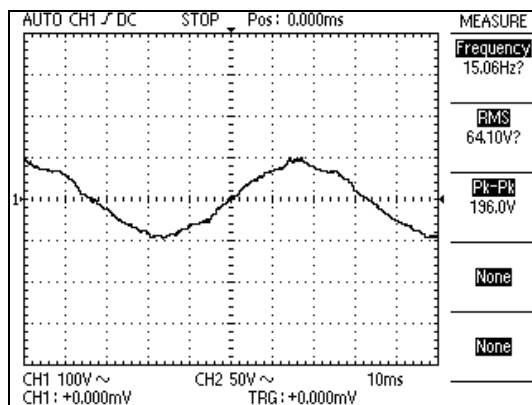
Geralmente, nas análises de fluxos, é possível prever que, quanto maior a intensidade destes, maior será a tendência de ser observado um acréscimo no valor de torque. O Quadro 12, com os dados de torque e densidade de fluxo máximo, obtidos através do programa, demonstra que não há uma relação direta entre a densidade de fluxo máximo do material sinterizado e o torque da máquina, pois, a maior densidade de fluxo não corresponde ao maior torque. Porém, isso se deve em grande parte à remanência das ligas sinterizadas.

Quadro 12 - Comparativo entre densidade de fluxo máximo e torque

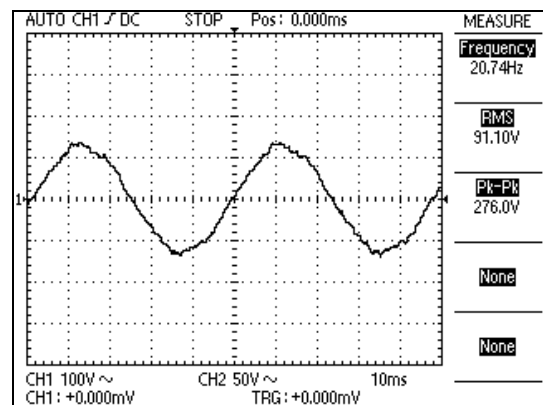
Núcleo	Torque (N.m)	Densidade de Fluxo Máximo (T)
<i>Fe (puro)</i>	34,0559	2,61
<i>Fe1%P</i>	34,6978	2,52
<i>Fe2%P</i>	34,8057	2,61
<i>Fe3%P</i>	34,1523	2,57
<i>Fe1%Si</i>	32,4700	2,49
<i>Fe3%Si</i>	32,782	2,61
<i>Fe5%Si</i>	31,8852	2,59
<i>Fe50Ni</i>	34,4769	2,80

4.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DA MÁQUINA

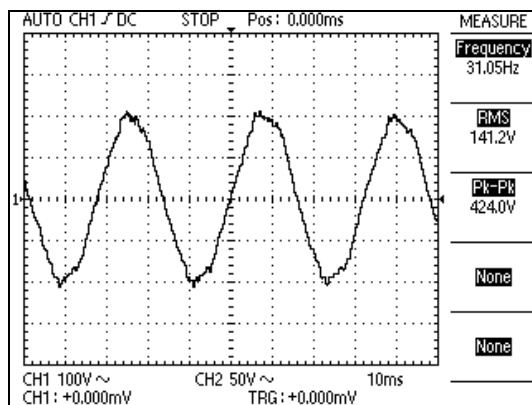
Foram analisadas as formas de onda e níveis de tensão de linha gerados pela máquina em quatro velocidades de rotações distintas, como pode ser visto na Figura 53. Por motivos de segurança, a máquina foi testada apenas até 40 Hz, pois na data dos testes, seu rotor ainda não tinha sido balanceado, fato que ocorreu após estes testes, em outra pesquisa.



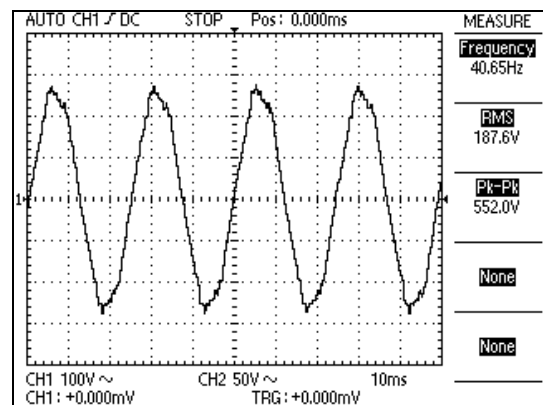
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 53 - Formas de onda geradas pela máquina construída

O Quadro 13 apresenta uma relação entre a tensão gerada, sua frequência e rotação do eixo. Sabendo-se que a máquina possui quatro polos, e com os dados de RPM retirados através do tacógrafo digital, pode-se verificar que a tensão gerada e sua frequência estão como esperado.

Quadro 13 - Comparativo entre rotação, frequência e tensão gerada

<i>Frequência (Hz)</i>	<i>Tensão RMS (V)</i>	<i>RPM aprox.</i>
15,06	64,1	451
20,74	91,1	622
31,05	141,2	931
40,65	187,6	1219

5. CONCLUSÕES

De maneira geral, levando-se em consideração a dimensão relativamente grande do projeto para o processo de fabricação através da M/P, a montagem e testes realizados com esta máquina elétrica rotativa apresentaram resultados satisfatórios, pois ela gerou energia elétrica, com tensões e frequências condizentes com a velocidade de rotação.

A escolha do ferro puro, devido às suas características magnéticas e mecânicas, facilitou na usinagem do núcleo e não comprometeu a eficiência do rotor, pois por ser o núcleo do enrolamento de campo, a variação do fluxo magnético é mínima, apresentou baixas perdas por correntes parasitas e de Foucault, não afetando assim seu rendimento.

6. SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

Seguem abaixo algumas sugestões que podem ser utilizadas em trabalhos futuros que se baseiem nesta pesquisa:

- Testar novas ligas hipersaturadas de fósforo ou silício por outras técnicas como o sinterforjamento, ou tixoforjamento de pós, aumentando assim a resistividade e conseqüentemente diminuindo as correntes parasitas;
- Testar materiais microencapsulados como Somaloy da Höganäs, os quais possuem uma isolação elétrica a base de polímero ou óxidos entre as partículas de pós de ferro, provocando efeito similar a isolação entre chapas de núcleos convencionais, diminuindo assim as correntes parasitas;
- Projetar e construir uma máquina com polos lisos multipolar e que possa ser energizada e testada em alta frequência, diminuindo as perdas por correntes parasitas e de Foucault, nos enrolamentos de armadura;
- Construir um estator com ranhuras inclinadas, para evitar variações bruscas de relutância magnética;
- Testar novas configurações de rotor e disposição dos ímãs, por exemplo, no sentido axial, permitindo assim uma maior densidade de fluxo de entreferro na superfície do rotor, possibilitando menores dimensões da máquina.

ANEXOS

A. GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS ENVOLVIDAS NO ESTUDO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

A.1. INTRODUÇÃO

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

A.2. CAMPO, INDUÇÃO E FLUXO MAGNÉTICO

Campo Magnético (H): De acordo com a lei de Ampère, uma carga elétrica em movimento ou corrente elétrica I produz, além do campo elétrico, um campo magnético H [14, 61, 62].

$$\oint \overline{H} \cdot d\overline{l} = \int J \cdot ds = I \quad (\text{A } 1)$$

H é o campo magnético [A/m], $d\overline{l}$ é o comprimento infinitesimal [m], J é a densidade de corrente [A/m²], ds é um elemento infinitesimal de superfície [m²] e I é a corrente elétrica [A]. No sistema CGS, H é expresso em Oersted [Oe] tal que [14, 62].

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

Densidade de Fluxo ou Indução Magnética (B): Um campo magnético H induz linhas de fluxo magnético ou indução magnética, B , que relacionam-se através da permeabilidade magnética do meio, μ , tal que [17, 46, 47, 49, 50]

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \mu_0 \cdot H + J_s \quad (\text{A } 3)$$

B é a indução magnética [T] ou [Wb/m²], μ é a permeabilidade magnética do meio [H/m], μ_r é a permeabilidade magnética relativa [adimensional], μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo [$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m] e J_s é a polarização de

magnetização [T]. No sistema CGS B é expresso como Gauss [G] tal que [14, 61-64].

$$1T = 10^4 G \quad (\text{A 4})$$

Para a maioria dos materiais, B e H têm mesma direção e sentido (meios isotrópicos) e μ é um escalar. Em alguns cristais, B pode não ter a mesma direção de H (meios anisotrópicos) e μ é um tensor [61]

Fluxo Magnético Total (φ): Para B uniforme e superfície plana, o fluxo magnético total φ perpendicular a superfície pode ser escrito como [14, 61, 62].

$$\varphi = B \cdot A \quad (\text{A 5})$$

onde φ é o fluxo magnético total [Wb], B é a indução magnética [T] e A a área da seção transversal às linhas de fluxo [m²]. Quando as linhas de indução magnética não são perpendiculares à área A , a equação A 5 fica [14, 61, 62].

$$\varphi = B \cdot A \cdot \cos \alpha \quad (\text{A 6})$$

α é o ângulo entre a perpendicular à área A e a direção de B . Se B não for uniforme sobre uma área, a equação A 6 se generaliza de tal forma que [14, 61, 62].

$$\varphi = \iint B \cdot \cos \alpha \cdot ds \quad (\text{A 7})$$

A.3. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA RELATIVA

A permeabilidade magnética do meio é representada como [14, 61, 62].

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (\text{A 8})$$

A tabela A1 relaciona algumas substâncias com suas respectivas permeabilidades magnéticas relativas. Deve-se salientar que a permeabilidade magnética relativa não é constante para alguns materiais, principalmente os ferromagnéticos e, neste caso, a tabela apresenta os valores máximos [61].

A partir da tabela A1 pode-se concluir o seguinte: [14, 61, 62].

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

Outros tipos de materiais são os antiferromagnéticos, ferrimagnéticos e superparamagnéticos [61].

A.4. CURVA DE HISTERESE

Se um material for colocado dentro de uma bobina na qual circula uma corrente elétrica I , um campo magnético H será gerado no interior desta bobina, e o material irá sofrer uma indução magnética B . Se o material for diamagnético ou paramagnético, poucas linhas de fluxo magnético serão induzidas e a relação $B \times H$ será aproximadamente linear. Se o material for ferromagnético, muitas linhas de fluxo serão induzidas (fenômeno de magnetização) e a relação $B \times H$ tem as características de uma curva como mostrada na figura A1. Observa-se que esta curva possui uma histerese, sendo portanto denominada de curva de histerese ou ciclo de histerese. Os materiais que possuem características magnéticas semelhantes àsquelas mostradas pela curva da figura A1 são conhecidos como materiais magnéticos. [14, 61, 62].

Quadro A1 - Permeabilidade relativa de alguns materiais

Substância	Grupo	μ_r
<i>Bismuto</i>	diamagnético	0,99983
<i>Prata</i>	diamagnético	0,99998
<i>Cobre</i>	diamagnético	0,999991
<i>Água</i>	diamagnético	0,999991
<i>Vácuo</i>	não-magnético	1,000000
<i>Ar</i>	paramagnético	1,0000004
<i>Alumínio</i>	paramagnético	1,00002
<i>Paládio</i>	paramagnético	1,0008
<i>Pó de permalloy 2-81</i>	ferromagnético	$1,3 \cdot 10^2$
<i>Cobalto</i>	ferromagnético	$2,5 \cdot 10^2$
<i>Níquel</i>	ferromagnético	$6,0 \cdot 10^2$
<i>Ferroxcube 3</i>	ferromagnético	$1,5 \cdot 10^3$
<i>Aço doce</i>	ferromagnético	$2,0 \cdot 10^3$
<i>Ferro (0,2% de impurezas)</i>	ferromagnético	$5,0 \cdot 10^3$
<i>Permalloy 78</i>	ferromagnético	$1,0 \cdot 10^5$
<i>Supermalloy</i>	ferromagnético	$1,0 \cdot 10^6$

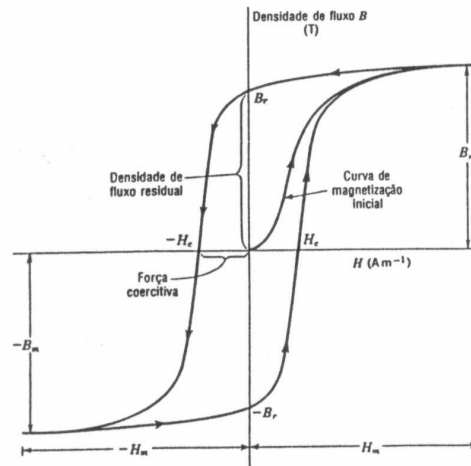


Figura A1 - Ciclo de histerese para um material magnético

O ponto em que a curva intercepta o eixo de B , no quadrante superior esquerdo, é denominado de magnetismo remanente e representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado ($H=0$). O magnetismo remanente máximo é denominado de retentividade, B_r . O ponto em que a curva intercepta o eixo de H no mesmo quadrante é denominado de força coercitiva e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o material ($B=0$). O campo desmagnetizante máximo é denominado de coercitividade, H_c . Outro fator importante na identificação de materiais magnéticos é o produto energético $B \cdot H_{max}$, cuja unidade é Mega Gauss Oersted [$MG \cdot Oe$] e está associado com a densidade de energia armazenada em um material magnético [14, 61, 62].

A figura A2 mostra dois ciclos de histerese, um largo que representa um material magnético duro também conhecido como ímã permanente (geralmente materiais ferrimagnéticos), e um estreito que representa um material magnético macio (geralmente materiais ferromagnéticos) [14, 61, 62].

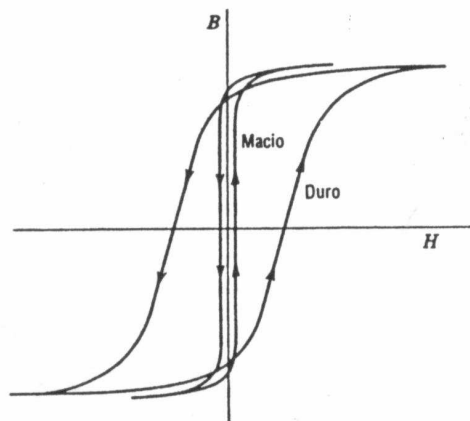


Figura A2 - Ciclo de histerese para materiais magnéticos duro e macio

A.5. MAGNETIZAÇÃO

Os campos magnéticos fazem-se presentes em torno de um condutor, quando por ele flui uma corrente. Estão presentes também em volta de objetos magnetizados como, por exemplo, um ímã. O campo de um ímã é produzido por movimentos de translação e rotação dos elétrons, sendo mais importante a rotação. Este movimento do elétron é equivalente em efeito a uma minúscula espira de corrente que atua como um ímã miniatura ou dipolo magnético. Embora o efeito de cada anel atômico seja muito pequeno, o efeito combinado de bilhões deles em um ímã resulta em um campo magnético ao redor do ímã. Em um átomo com muitos elétrons presentes, somente os *spins* dos elétrons das camadas incompletas contribuirão para o campo magnético do átomo [61].

Nos materiais ferromagnéticos, cada átomo tem um momento de dipolo relativamente grande causado principalmente por um momento eletrônico de *spin* não compensado. Forças interatômicas fazem com que estes momentos se alinhem de modo paralelo em regiões que contêm um grande número de átomos. Estas regiões são chamadas domínios magnéticos e podem ter muita variedade de formas e tamanhos desde um micrômetro até vários centímetros.

Assim, um domínio age como um ímã pequeno, mas não atômico pequeno [61]. A figura A3(a) mostra um fragmento de um material cristalino. Este fragmento divide-se em grãos, limitados pelas linhas mais grossas, que por sua vez se subdividem em domínios, limitados pelas linhas mais finas. As setas indicam a direção de magnetização dos domínios.

Um *N* representa um domínio com um polo norte dirigido para fora da página e um *S* representa um domínio com um polo sul dirigido para fora da página. A anisotropia magnetocristalina faz com que os *spins* dos elétrons dos átomos adjacentes se alinhem espontaneamente em uma determinada direção conhecida como direção de fácil magnetização, e esta região define um domínio. Portanto a nível de domínio este fragmento apresenta um magnetismo remanente. Entretanto, os domínios adjacentes apresentam polarização contrária e, macroscopicamente, este fragmento apresenta magnetização nula. Em um cristal de ferro, por exemplo, há seis direções de fácil magnetização. Isto é, há uma direção positiva e negativa ao longo de cada um dos três eixos do cristal, perpendiculares entre si [61].

Com a aplicação de um campo magnético *H* no sentido indicado pela seta, alguns domínios, com polaridades opostas ao campo aplicado ou perpendiculares a

ele, tornam-se instáveis e giram rapidamente para um outro sentido de fácil magnetização, na mesma direção do campo ou bem próximo a este. O resultado, depois que todos os domínios mudaram de direção, está mostrado na figura A3(b) [61].

Aumentando-se mais o campo aplicado, a direção de magnetização dos domínios, que ainda não estão paralelos ao campo, é girada gradualmente para a direção de H . Este aumento de magnetização é mais difícil e podem ser necessários campos muito fortes para atingir a saturação, todos os domínios são magnetizados paralelos ao campo, como indicado na figura A3(c) [61].

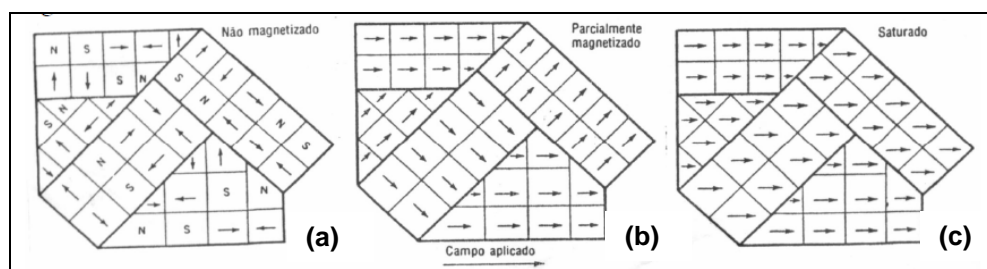


Figura A3 - Estágios sucessivos de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo

Se a maioria dos domínios mantiverem seus sentidos, depois que o campo magnético for removido, diz-se que o espécime está magnetizado permanentemente. Calor e choque mecânico tendem a fazer com que o cristal volte ao seu estado inicial de desmagnetização. Se a temperatura for aumentada suficientemente, os domínios se desmagnetizam e desaparece o ferromagnetismo. É o que se chama de temperatura Curie (cerca de 770°C para o ferro) [61].

A magnetização que aparece somente na presença de um campo aplicado pode ser chamada de magnetização induzida para diferenciar da magnetização permanente, que está presente na ausência de um campo aplicado [61].

Uma curva típica de magnetização de um material ferromagnético é mostrado pela curva sólida da figura A4(a). Para fins de comparação, a figura mostra quatro linhas tracejadas, correspondendo às permeabilidades relativas constantes μ_r de 1, 10, 100 e 1000. A permeabilidade relativa em qualquer ponto da curva de magnetização é dada por [61].

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} = 7,9 \cdot 10^5 \cdot \frac{B}{H} \quad (\text{A } 9)$$

A figura A4(b) apresenta um gráfico da permeabilidade relativa como função do campo H aplicado. A permeabilidade relativa máxima está no ponto da curva de magnetização, na qual a relação B e H é máxima, e é designada como μ_{max} [61].

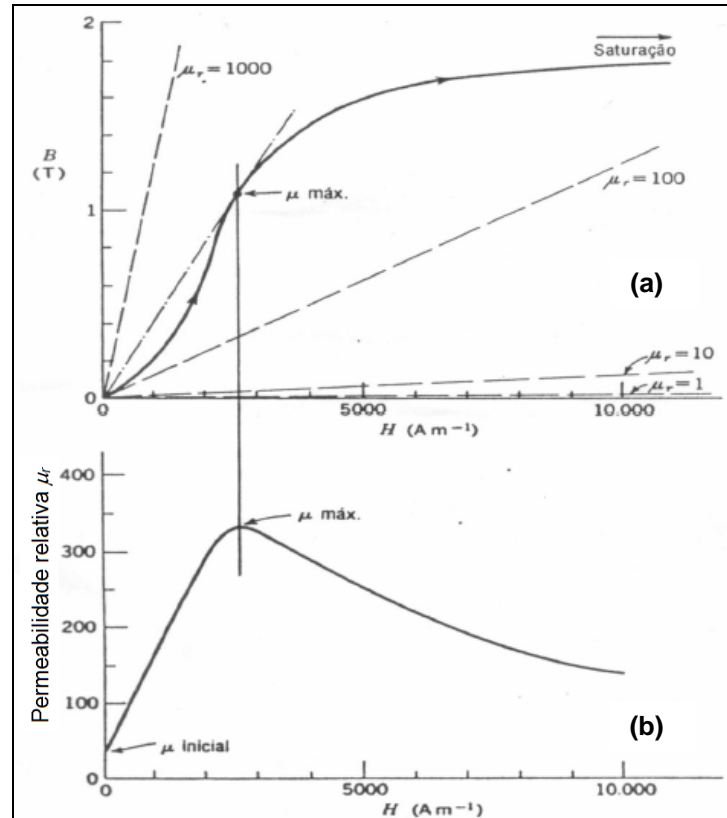


Figura A4 - (a) Curva de magnetização típica e (b) relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado H

Quando H é aumentado, o valor de B aumenta rapidamente a princípio e depois mais lentamente. Nos valores suficiente altos de H , a curva tende a ficar assintótica. Esta condição é chamada de saturação magnética. A curva de magnetização inicial pode ser dividida em duas seções. A seção íngreme corresponde à condição de fácil magnetização, enquanto a seção plana corresponde à condição de difícil magnetização [61].

A.6. RELAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE UNIDADES MKS E CGS

A relação para campo magnético H no sistema MKS e o sistema CGS é dado pela equação A10, e 1 Oe é definido como [14, 62]:

$$1 \text{ Oe} = \frac{1 \text{ max well}}{\text{cm}^2} \quad (\text{A } 10)$$

O sistema CGS utiliza a unidade eletromagnética emu (eletromagnetic unit of magnetic moment), sendo por esta razão também denominado de sistema EMU, e que possui a seguinte unidade [14, 62]:

$$emu = m \Rightarrow \frac{[erg]}{[Oersted]} \quad (\text{A 11})$$

onde m é o momento magnético e erg a unidade de energia ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ Joule}$).

A magnetização M é definida como momento magnético m , dividido pelo volume v , assim [14, 62]:

$$M = \frac{m}{v} \Rightarrow \frac{[erg]}{[Oersted \cdot cm^3]} = \frac{[emu]}{cm^3} \quad (\text{A 12})$$

Outra unidade para a magnetização, é a magnetização específica σ definida como [14, 62]:

$$\sigma = \frac{m}{m_s} = \frac{m}{v \cdot \rho_m} = \frac{M}{\rho_m} \Rightarrow \frac{[emu]}{[g]} \quad (\text{A 13})$$

onde m_s é a massa [g] e ρ_m a densidade [g/cm^3].

Os ensaios realizados sobre uma amostra para obtenção da curva de histerese podem relacionar magnetização específica emu/g em função do campo aplicado [kOe]. Para se obter a densidade de fluxo remanente, B_r , em *Gauss*, é necessário converter a unidade de magnetização M para indução B , ou seja [14, 62]:

$$B_r = 4 \cdot \pi \cdot \frac{emu}{g} \cdot \rho \quad (\text{A 14})$$

O sistema MKS se divide em outros dois sistemas os quais são a convenção Sommerfeld e a convenção Kennelly. Cada um destes sistemas ou convenções apresentam vantagens e desvantagens. O SI (sistema internacional) de unidades foi adotado no décimo primeiro Congresso Geral em Pesos e Medidas (1960). A convenção Sommerfeld foi aceita para medidas magnéticas pela União Internacional para Física Pura e Aplicada (IUPAP) e, portanto, este sistema tem sido paulatinamente adotado para medidas magnéticas. O Quadro A2 mostra as relações de unidades para as convenções mencionadas acima [14, 62].

GRANDEZA	SI(Sommerfeld)	SI(Kennelly)	EMU(Gaussiano)
<i>Campo magnético</i>	A/m	A/m	Oersted
<i>Indução</i>	Tesla	Tesla	Gauss
<i>Magnetização</i>	A/m	-	emu/cm ³
<i>Fluxo</i>	Weber	Weber	Maxwell
<i>Momento</i>	Am ²	Weber.metro	meu
<i>Força do polo</i>	A.m	Weber	emu/cm
<i>Equação do campo</i>	$B=\mu_0.(H+M)$	$B=\mu_0.(H+I)$	$B=H+4.p.M$
<i>Energia do momento</i>	$E=-\mu_0.\mu.H$	$E=-\mu.H$	$E=-m.H$
<i>Torque</i>	$\tau =\mu_0.m.H$	$\tau =m.H$	$\tau =m.H$

A.7. RELUTÂNCIA E FORÇA MAGNETOMOTRIZ

Relutância é uma “resistência” que o meio oferece à circulação do fluxo magnético, sendo uma grandeza análoga à resistência elétrica, calculada como [9, 10, 65]

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathcal{F}}{\varphi} = \frac{l}{\mu.A} \quad (\text{A 15})$$

\mathfrak{R} é a relutância magnética [H^{-1}], $\mathcal{F} = N.I = fmm$ a força magnetomotriz [$A.esp$], μ a permeabilidade magnética do meio [H/m], l comprimento [m] e A a área da seção transversal [m^2]

B. METALURGIA DO PÓ

B.1. INTRODUÇÃO

A produção de componentes magnéticos por metalurgia do pó, além de oferecer as vantagens típicas associadas à minimização de usinagem, permite obter características únicas de desempenho, como, por exemplo, a orientação magnética. Acrescenta-se a isto que pós de diferentes naturezas químicas, como as ligas Fe-Si, Fe-P e Fe-Ni, são fáceis de serem obtidos, bastando que se misturem os pós homogeneamente. Portanto, a seguir é apresentado um resumo sobre os processos da Metalurgia do Pó (M/P) convencional, bem como outros processos metalúrgicos para a obtenção de materiais magnéticos como a Modelagem de Pós por Injeção (Powder Injection Moulding).

B.2. OBTENÇÃO DOS PÓS

Para obtenção dos pós foi desenvolvido uma série de processos, em função das propriedades do material (fragilidade, ponto de fusão, comportamento químico, etc.), e das características que a aplicação pretendida requer do pó. Há processos mecânicos, como a quebra e moagem, processos de atomização (pulverização), processos físicos, processos químicos e termoquímicos. Cada processo de produção do pó leva a um pó com um conjunto de propriedades distintas, e a escolha do método de fabricação do pó depende de características como tamanho e distribuição de tamanho de partícula, superfície específica, compressibilidade, escoabilidade e densidade aparente do pó, necessárias à obtenção do sinterizado com as propriedades mais adequadas a cada aplicação específica. [27, 43, 66, 67]

As figuras B.1.(a-c) mostram algumas formas de partículas de pó. [43]

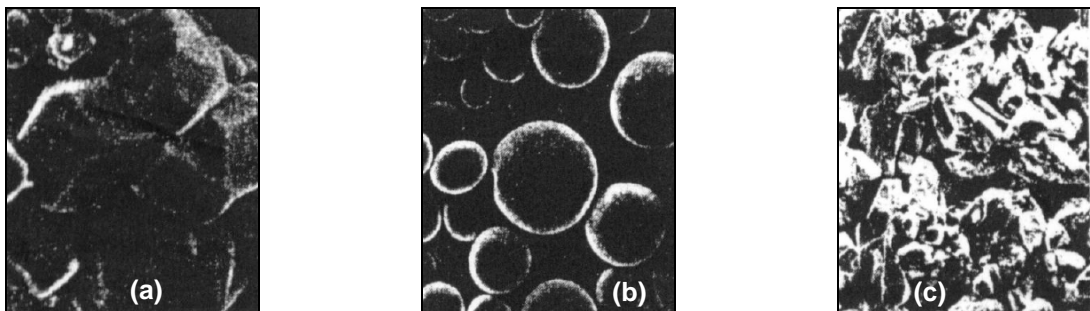


Figura B1 - Formato de algumas partículas (a) poligonal, (b) esférica e (c) angular

B.3. MISTURA DOS PÓS

Basicamente, pós de diferentes metais podem ser misturados nas proporções especificadas, podendo-se partir diretamente de pós pré-ligados ou podendo-se, ainda, misturar pós préligados a pós de metais, para se chegar à composição química desejada. [27, 43, 66-68]

Em sistemas de um só componente, como no caso da produção de peças com ferro puro, a etapa de mistura tem função de promover uma distribuição uniforme do lubrificante na liga desejada. O lubrificante é utilizado para reduzir o atrito entre as partículas de pó e a parede da matriz, bem como entre as próprias partículas. O lubrificante serve também para reduzir a força de extração da peça após a compactação, evitando danos ao compactado. [27, 43, 66-68]

O lubrificante adicionado na etapa de mistura é removido dos compactados durante a etapa de aquecimento por volatilização, ou em uma operação isolada, chamada *dewaxing*, antes da sinterização. [27, 43, 66-68]

Quando da produção de componentes ligados ou materiais compósitos, a etapa de mistura torna-se igualmente necessária para promover a distribuição homogênea das partículas dos diversos componentes na massa do pó, além do lubrificante. Se a mistura é perfeita, não ocorre a formação de aglomerados de partículas de um mesmo tamanho ou de um só tipo de metal (no caso em que se deseja a formação de uma liga). [27, 43, 66-68]

Deve-se ter muito cuidado nesta etapa do processo, pois quando se utilizam altas velocidades de mistura dos pós, cria-se uma força centrífuga maior que o peso das partículas, fazendo com que o pó misturado fique nas paredes do misturador, não sofrendo a atuação desejada. O tempo de mistura do material também é crítico, pois este deve ser controlado de forma a promover a máxima homogeneidade da mistura. Um tempo excessivo de operação pode ter como consequência uma mistura inadequada. [27, 43, 66-68]

A figura B.2 mostra algumas formas geométricas comuns de equipamentos para mistura de pós. [38]

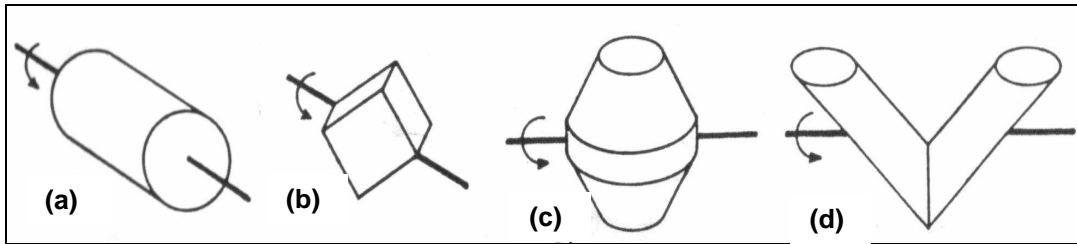


Figura B2 - Misturadores - (a) cilíndrico - (b) rotacional cúbico (c) - cone duplo - (d) dupla concha

B.4. COMPACTAÇÃO

É a operação que consiste na aplicação de pressão sobre determinada quantidade de pó, ou mistura de pós, até sua consolidação, conforme visualização simplificada da figura B.3. As dimensões da matriz são geralmente a do produto final. As pressões variam de 30 até 3000 Mpa, dependendo do tipo de pó. [27, 43, 66-68]

A compactação convencional é sempre executada em prensas mecânicas ou hidráulicas. Uma quantidade pré-determinada é colocada em uma cavidade formada pela matriz e machos, e é então compactada por uma série de deslocamentos dos punções superior e inferior, à temperatura ambiente. No caso de utilizar pressões de compactação elevadas existe um desgaste prematuro da matriz, causado por deformação plástica entre as partículas e as paredes da matriz, elevando o atrito interno e aumentando o desgaste. [27, 43, 66-68]

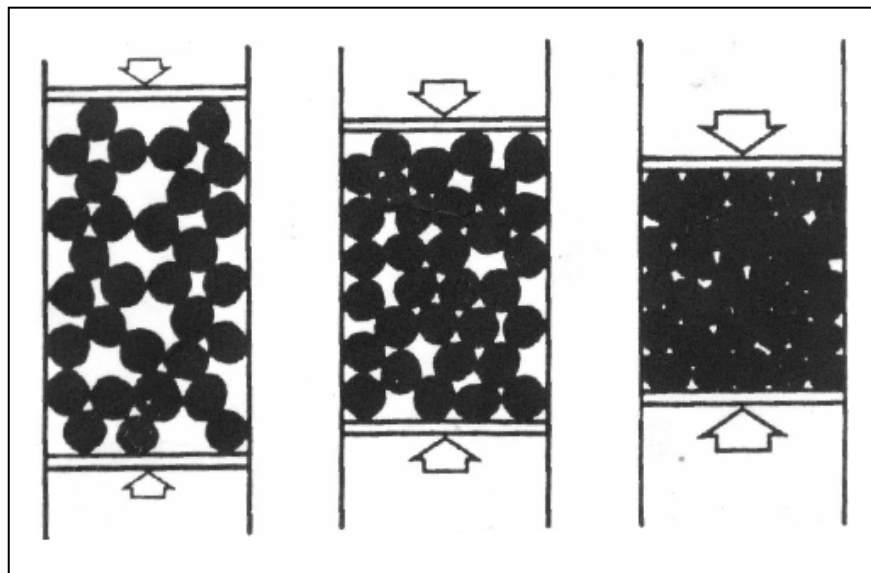


Figura B3 - Estágios de uma compactação de um pó em uma matriz

As principais funções na compactação de pós metálicos são: [27, 43, 66-68]

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

O comportamento do pó durante a etapa de compactação é de importância fundamental na metalurgia do pó, e dois mecanismos básicos ocorrem durante a compactação sob pressão: [27, 43, 66-68]

- Movimento das partículas;
- Deformação e fraturas das partículas.

O movimento de rearranjo das partículas irá resultar um empacotamento mais eficiente do pó ou densificação. Tal movimento é limitado pelas forças de atrito desenvolvidas entre as partículas vizinhas e os pontos de contato com a matriz, punções e machos. [27, 43, 66-68]

Após a compactação, as peças adquirem a forma da matriz. Contudo não, apresentam resistência mecânica, são frágeis e quebradiças. Nesta etapa, as peças são designadas como compactado verde e apresentam uma densidade verde, que é função da pressão, matéria prima, distribuição das partículas, tamanho e forma das partículas, uso ou não de lubrificantes e da geometria da matriz. [27, 43, 66-68]

Os tipos de compactação mais utilizados são: [27, 43, 66-68]

- Compactação com prensas em matrizes;
- Compactação isostática;
- Laminação de pós;
- Extrusão de pós;
- Forjamento de pré-formas sinterizadas.

O método mais usual é a compactação em matriz, representando a técnica de consolidação mais largamente utilizada, dividindo-se em: [27, 43, 66-68]

- Compactação em efeito simples;
- Compactação de duplo efeito;
- Compactação de duplo efeito com matriz flutuante;
- Compactação de múltipla movimentação com matriz flutuante.

Para compactação de materiais magnéticos, geralmente utiliza-se compactação unidirecional de dupla ação (compactação de duplo efeito), pois há uma melhora na distribuição de densidade. Os punções superior e inferior neste tipo de compactação sofrem deslocamento, conforme mostra a sequência de operação de compactação da figura B.4. Neste caso, são produzidas peças com densidade mais uniformes do que na prensagem com movimento simples.

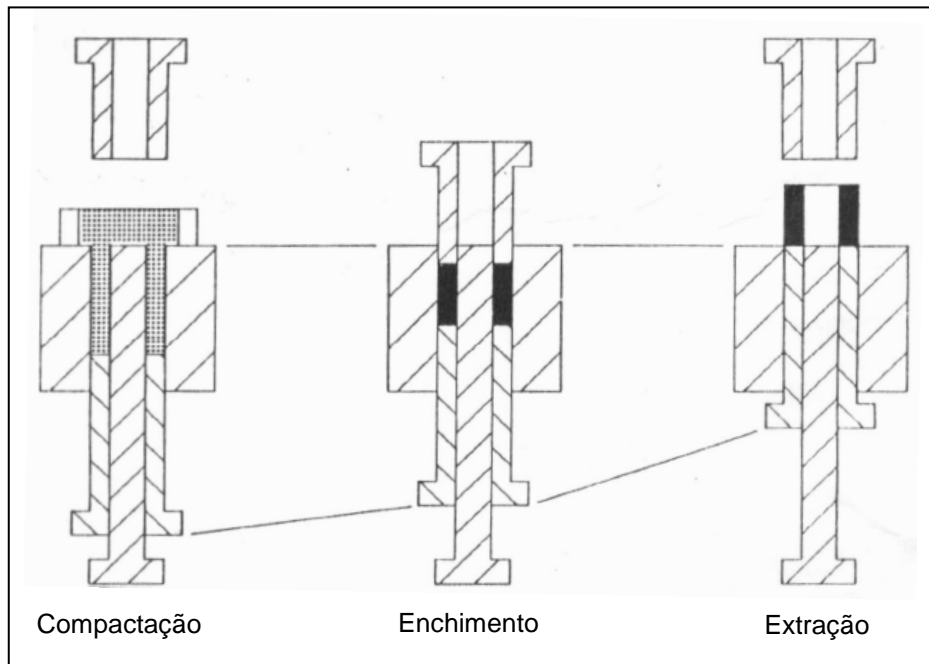


Figura B4 - Sequência de operação de compactação com duplo efeito

B.5. SINTERIZAÇÃO

É um processo termicamente ativado que consiste na consolidação, densificação (em alguns casos), recristalização e ligação obtidas por tratamento térmico de pós (durante ou após a compactação). A temperatura está abaixo da temperatura de fusão dos componentes, e envolve o transporte de matéria em escala atômica. É o passo na fabricação que consome maior parcela de energia, e por isto tem forte influência nos custos de produção. Nesta operação, obtém-se a ligação final entre as partículas do pó. O aquecimento é da ordem de $2/3$ a $4/5$ da temperatura de fusão do metal considerado. Esta operação deve ser realizada na presença de uma atmosfera protetora, para evitar fenômenos como oxidação e decarbonetação. [27, 43, 66-68]

Considere duas partículas esféricas como mostrado na figura B.2-b. Na sinterização, vínculo entre as partículas cresce, e a microestrutura varia como

mostrado na figura B.5. Pode-se observar que, durante o processo de sinterização, há a formação de poros. Por este motivo, aditivos são misturados aos pós constituintes. Estes pós apresentam temperatura de fusão inferior àquelas da liga principal, e atingem a fase líquida no processo de sinterização, e tendem a preencher os poros. Isto resulta redução da peça em relação à peça compactada. Esta contração depende do tipo de pós e aditivos utilizados e varia em torno de 1% para peças obtidas a partir de ligas de ferro. [27, 43, 66-68]

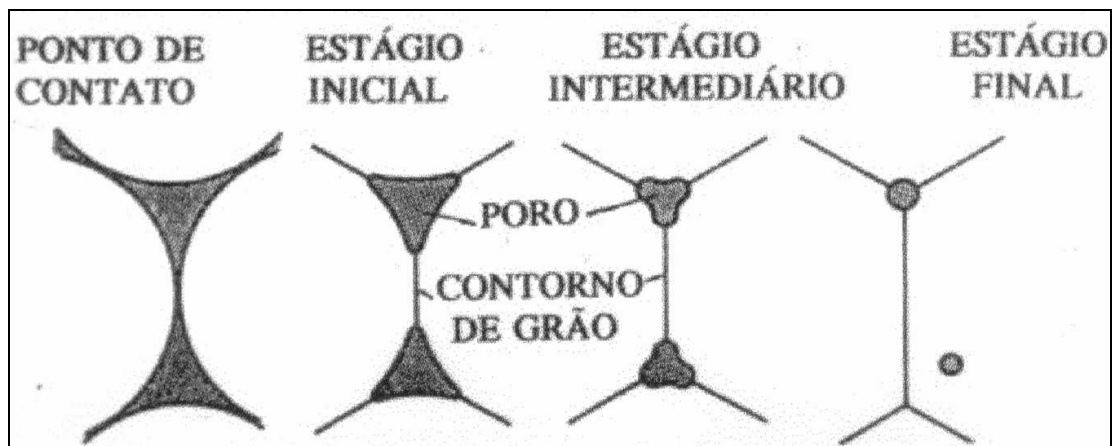


Figura B5 - Desenvolvimento do vínculo interpartícula durante a sinterização

O objetivo é o alcance do equilíbrio das fases dada pelos diagramas de equilíbrio, e a diminuição dos defeitos cristalinos. Os principais parâmetros a serem controlados nesta etapa são: [27, 43, 66-68]

- Temperatura;
- Tempo;
- Atmosfera do forno.

O cuidado com a atmosfera de sinterização é fundamental para prevenir qualquer reação química entre o compactado a verde e o ambiente. A oxidação é o fenômeno mais importante a ser evitado pela atmosfera. É também função da atmosfera de sinterização remover impurezas presentes, principalmente películas de óxidos superficiais ou contidas nos poros. [27, 43, 66-68]

Os seguintes fatores afetam o processo de sinterização: [27, 43, 66-68]

- Tamanho e forma da partícula;
- Estrutura da partícula;
- Densidade verde;
- Temperatura;

- Tempo;
- Composição da partícula.

Quanto mais rugosidade possuir a partícula de pó metálico, maior sua área superficial. Assim a sinterização será mais eficiente, devido à maior área de contato entre as partículas. O Quadro B.1 demonstra diferentes temperaturas, tempos e atmosfera de sinterização para alguns materiais. [27, 43, 66-68]

A sinterização em escala industrial é comumente processada em fornos contínuos, caracterizados em três zonas de operação, ou seja: [27, 43, 66-68]

- Pré-aquecimento;
- Zona de aquecimento;
- Resfriamento.

Quadro B1 - Temperatura, tempo e atmosfera de sinterização para alguns materiais

Material	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Atmosfera
<i>Bronze</i>	760-870	10-20	hidrogênio
<i>Cobre</i>	840-900	12-45	hidrogênio
<i>Latão</i>	840-900	10-45	hidrogênio
<i>Ferro</i>	1000-1160	8-45	gás exotérmico
<i>Níquel</i>	1000-1150	30-45	gás exotérmico
<i>Aço inox</i>	1090-1170	30-55	vácuo
<i>Metal duro</i>	1400-1490	20-30	vácuo

C. GERADORES SÍNCRONOS

C.1. FUNCIONAMENTO DE GERADORES SÍNCRONOS

Considere inicialmente uma bobina constituída por N_e espiras e imersa em campo magnético produzida por ímãs permanentes, como visto na Figura C1. Acionando-se o eixo de rotação, as espiras da bobina cortam as linhas do campo e, pela lei Fundamental da indução eletromagnética, uma força eletromotriz (f.e.m.) é induzida nos condutores. A f.e.m. (ε) é diretamente proporcional ao número de espiras da bobina N_e , indução do campo magnético B , velocidade periférica v e comprimento de cada condutor L .

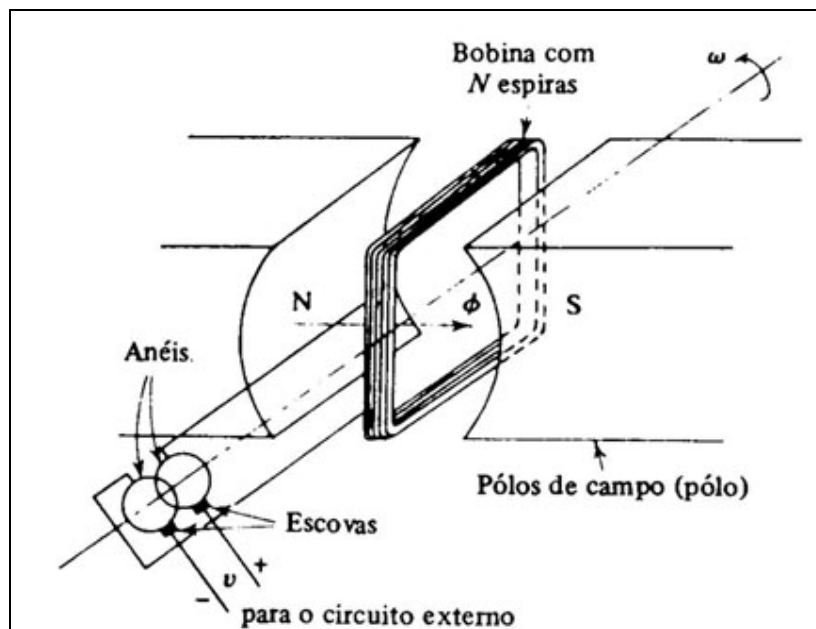


Figura C1- Gerador síncrono elementar

Matematicamente, pode-se escrever que

$$E = B \cdot L \cdot v \cdot N_e \quad (3)$$

Na Figura C2, o gerador elementar possui 2 polos fixos e uma bobina "ab" que se movimenta em relação a esses polos.

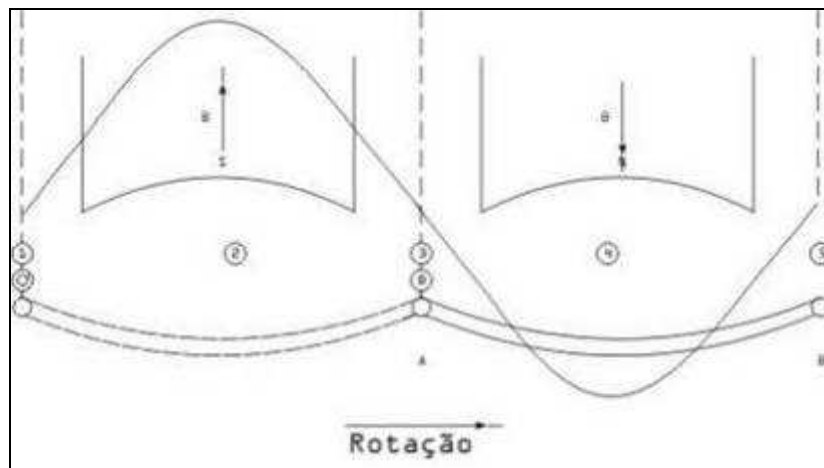


Figura C2 - Distribuição de fluxo

A indução magnética produzida pelos ímãs permanentes possui distribuição espacial que depende essencialmente da forma de superfície polar (sapata polar). Com configuração adequada da sapata, consegue-se maior concentração de induções no centro do polo e valores menores nas extremidades.

A distribuição senoidal de induções utilizada na construção de geradores são determinadas pelo desenho conveniente da sapata polar. A bobina "ab" movimentase em relação ao campo de induções senoidal, resultando uma f.e.m. induzida também senoidal, ou seja:

$$E = B_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot N_e \cdot L \cdot v = E_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (4)$$

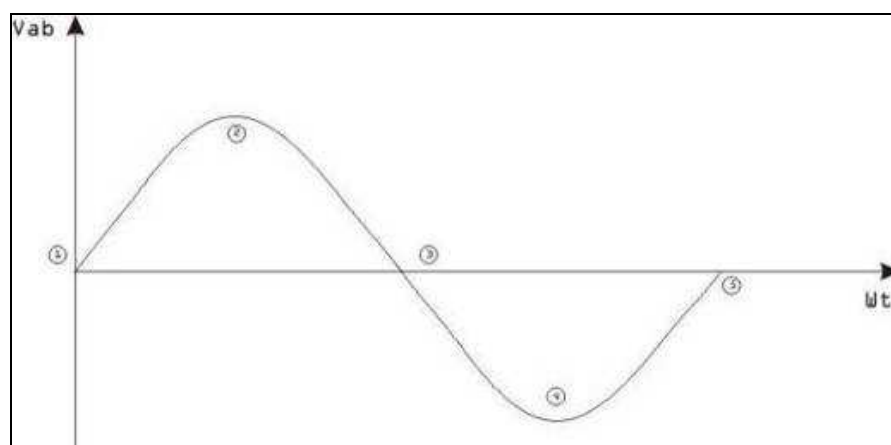


Figura C3 - Variação da f.e.m. induzida no tempo

sendo:

$$E_{\max} = B_{\max} \cdot N_e \cdot L \cdot v \quad (5)$$

Nos pontos de máxima indução, obtém-se a máxima tensão induzida. Quando as espiras "a" estão sob influência do polo norte, a polaridade de f.e.m. é contrária a das espiras "b", que se encontra sob o polo sul. Desta forma, a variação da f.e.m. acompanha em todos os pontos a distribuição de induções e possui polaridade distinta sob os polos norte e sul.

A ligação dos condutores das N_e espiras é realizada de maneira que a tensão nos condutores "a" é somada a dos condutores "b" ou seja:

$$V_{ab} = V_a + V_b \quad (6)$$

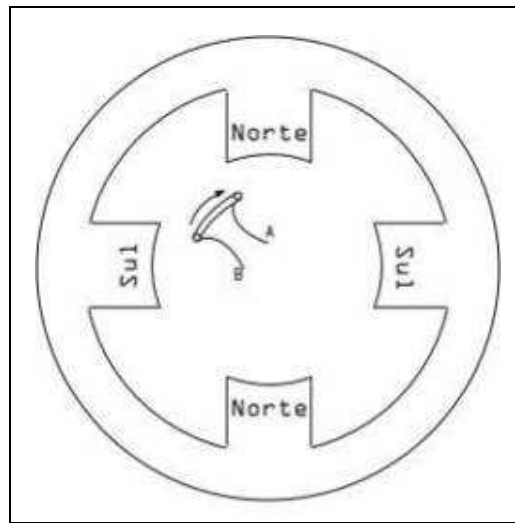


Figura C4 - Gerador síncrono elementar de 4 polos

Cada giro das espiras corresponde a um ciclo completo da tensão gerada. Para que a tensão gerada seja de 60 Hz, é necessário que a espira gire 60 vezes em 1 segundo, ou ainda, 3.600 rotações por minuto (rpm). Na Figura C4, encontra-se um gerador de quatro polos. Pode-se observar que, a cada volta completa a espira excursiona sob dois polos norte e dois polos sul, gerando dois ciclos. Portanto, para a geração de 60 Hz é necessário que a espira gire 30 vezes em 1 segundo, ou seja, 1.800rpm.

Generalizando o raciocínio, pode-se concluir que para um gerador com "P" pares de polos girando a n rotações por minuto, a frequência de f.e.m. induzida em Hertz (Hz) é determinada por:

$$f = \frac{n \cdot P}{60} \quad (7)$$

O gerador trifásico é constituído por três bobinas com o mesmo número de espiras, dispostas simetricamente no espaço, formando entre si um ângulo de 120° , conforme mostra a Figura C5.

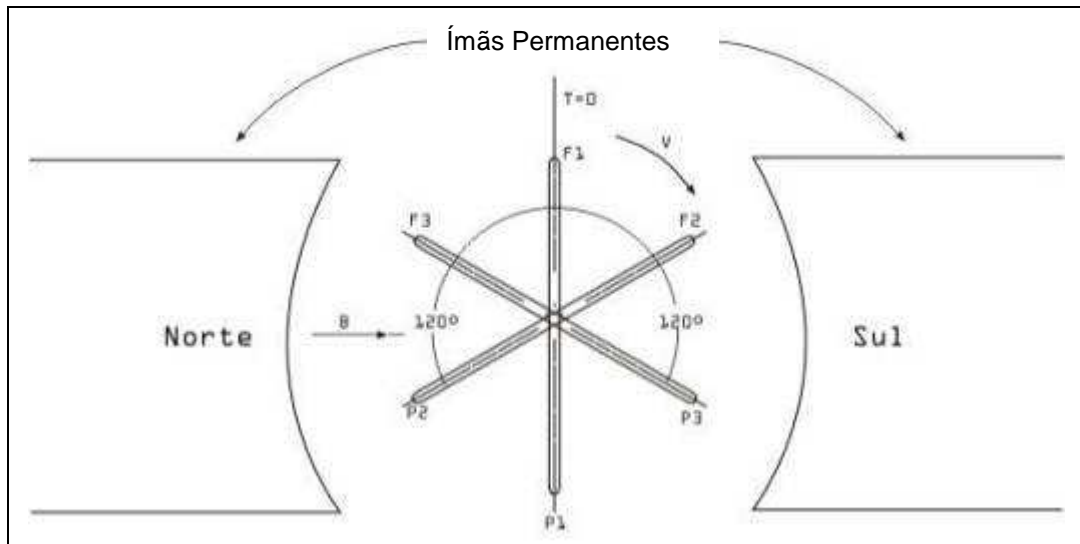


Figura C5 - Variação da f.e.m. induzida no tempo

A distribuição de campo de indução magnética, produzido pelos ímãs permanentes, é exatamente a mesma do gerador monofásico.

Nas bobinas são geradas tensões iguais, pois possuem o mesmo número de espiras, as mesmas dimensões geométricas e são submetidas a um único campo de indução, possuindo apenas uma defasagem entre si de 120° no tempo, em função da posição espacial que ocupam.

Cada bobina é uma fase e, observando-se a Figura C6, nota-se que a f.e.m. gerada nas fases é idêntica e defasada de 120° no tempo.

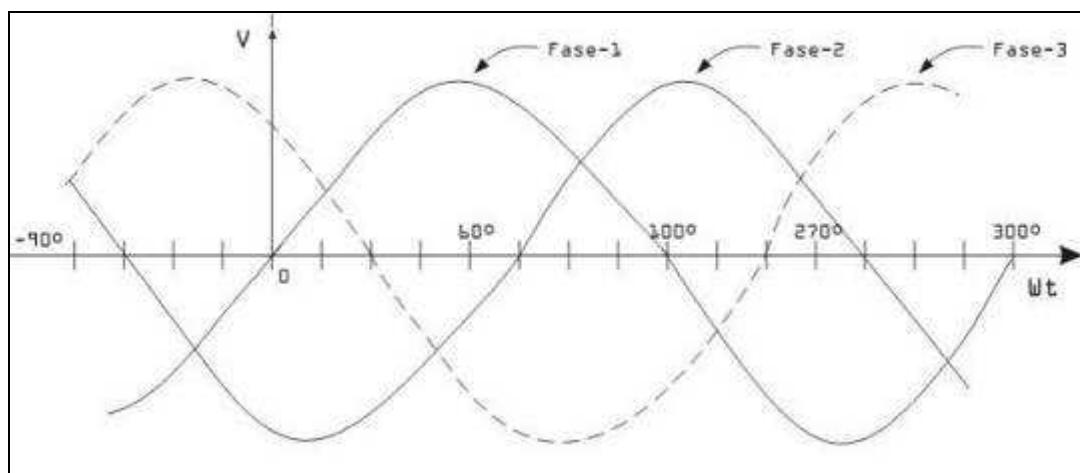


Figura C6 - Tensões geradas em sistema trifásico

C.2. TIPOS DE GERADORES SÍNCRONOS TRIFÁSICOS

As topologias de geradores síncronos trifásicos podem variar em uma série de parâmetros, tais como, o formato e quantidade de polos, posição dos enrolamentos de campo e de armadura, alimentação dos enrolamentos de campo, utilização ou não de ímãs permanentes. A seguir, serão descritos os formatos mais relevantes de suas configurações [9, 65]:

C.2.1. GERADOR SÍNCRONO COM CAMPO OU POLOS FIXOS

No gerador síncrono com polos fixos a, tensão induzida é gerada nas bobinas alojadas nas ranhuras de um núcleo de aço denominado de enrolamento de armadura, que se encontra no rotor. Os ímãs permanentes da descrição do gerador elementar são substituídos por um núcleo de aço e bobinas de excitação, ou enrolamentos de campo, que se comportam como eletroímãs, e se encontram no estator. Através de escovas e anéis coletores, a tensão gerada é fornecida.

A Figura C7 mostra o diagrama esquemático de um gerador de 2 polos fixos, indicando a nomenclatura das partes essenciais.

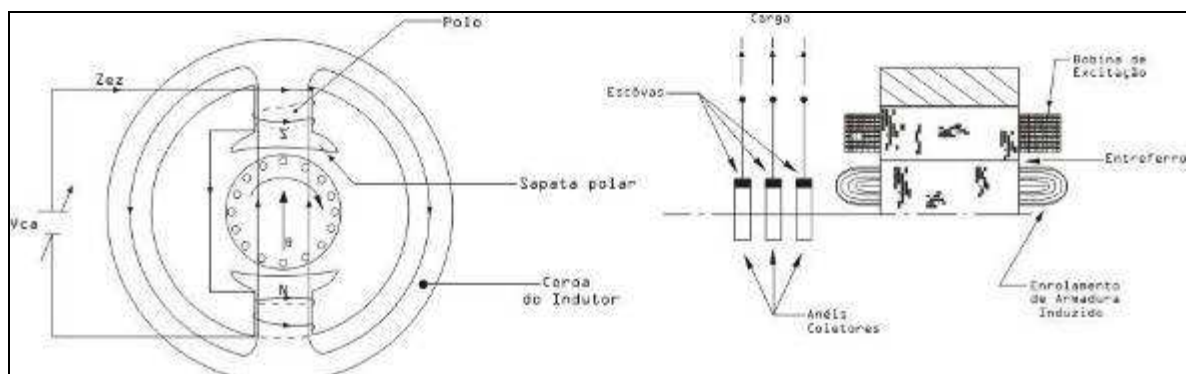


Figura C7 - Gerador síncrono de polos fixos

A alternativa de polos fixos apresenta simplicidade construtiva, porém só é utilizada em baixas potências.

C.2.2. GERADOR SÍNCRONO COM CAMPO MÓVEL OU POLOS ROTATIVOS

No gerador síncrono com polos rotativos, os enrolamentos de campo se encontram no rotor e giram no interior das bobinas fixas, localizadas no estator, gerando assim a tensão. Através de anéis coletores e escovas, as bobinas de

excitação, ou enrolamentos de campo, são alimentadas por CC. A Figura C8 mostra diagrama esquemático de um gerador síncrono com polos rotativos.

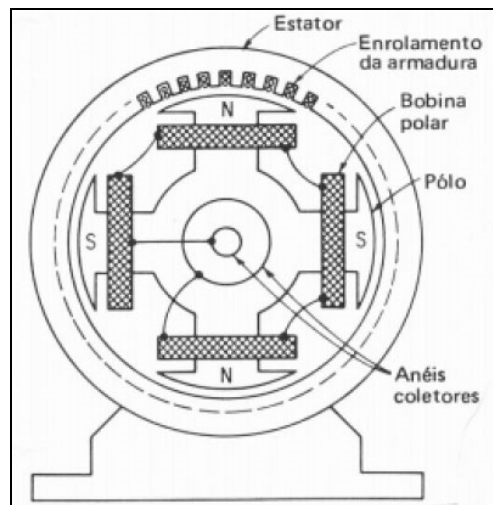


Figura C8 - Gerador síncrono de polos rotativos

Devido à baixa potência de excitação e maior facilidade de isolamento do enrolamento da armadura, a construção com polos rotativos é utilizada na maioria dos casos.

C.2.3. GERADOR SÍNCRONO DE POLOS LISOS

Rotores de polos lisos são em geral empregados em turboalternadores, o número de polos é 2 ou 4. Este emprego provém do fato que rotores com polos lisos são mais robustos, sendo assim mais aptos a trabalharem em altas rotações (3600 e 1800 rpm). O enrolamento de campo é distribuído em ranhuras, as quais em geral cobrem apenas uma parte da superfície do rotor. A Figura C9 mostra um desenho esquemático de um gerador síncrono com polos lisos.

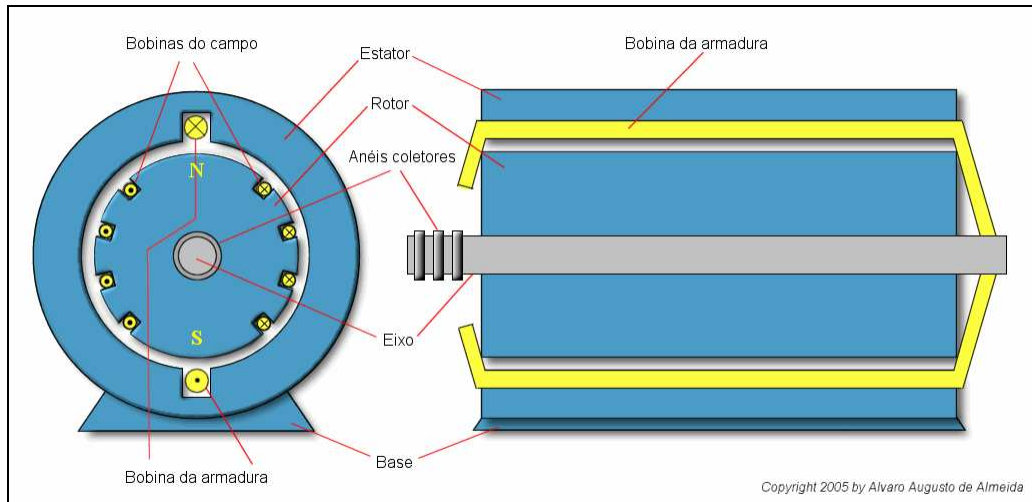


Figura C9 - Gerador síncrono de polos lisos

C.2.4. GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES

Os geradores de polos salientes são em geral empregados com número de polos igual ou superior a 4. A escolha do número de polos é dado pela rotação mais apropriada para máquina primária. Turbinas hidráulicas, por exemplo, trabalham com baixa rotação, sendo por isso necessário, geradores com alto número de polos. A velocidade de rotação da turbina hidráulica varia em função da pressão hidráulica existente e em função da altura da queda d'água, sendo que ela se situa entre 50 a 600 rpm. O enrolamento de campo é alojado no espaço interpolar. A Figura C10 mostra um desenho esquemático de um gerador síncrono com polos salientes.

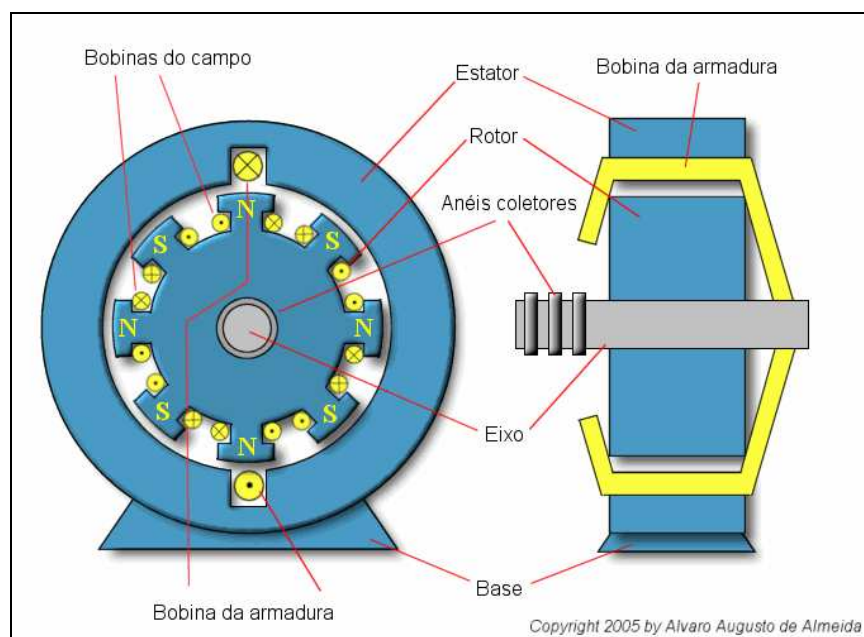


Figura C10 - Gerador síncrono de polos salientes

C.2.5. GERADOR SÍNCRONO COM ROTOR BOBINADO

Conforme visto anteriormente, quando no rotor se encontram os enrolamentos de campo, ao invés de ímãs permanentes, estes enrolamentos devem ser alimentados com CC. Esta alimentação pode ser externa ao motor, ou fornecida por sua própria geração.

C.2.5.1. GERADOR SÍNCRONO COM ROTOR BOBINADO E ALIMENTAÇÃO DE CAMPO EXTERNA

Os enrolamentos de campo são alimentados com CC através de anéis deslizantes e escovas. A tensão é fornecida um componente eletrônico denominado excitatriz. A excitatriz verifica a tensão de saída do gerador e alimenta o campo com CC necessária para manter constante a tensão nos terminais, para qualquer carga e fator de potência. No início do processo, ou escorvamento, o gerador é acionado na rotação nominal. O núcleo do gerador retém certo nível de indução remanente, mesmo quando a corrente de excitação é nula. A tensão gerada apenas pela indução remanente, normalmente, é suficiente para sensibilizar a excitatriz. Se ela verificar que a tensão de saída é baixa, ajusta a corrente de excitação necessária para que a tensão decorrente da colocação ou retirada de cargas seja corrigida automaticamente, através do fornecimento de maior ou menor potência de excitação. A Figura C11 mostra um diagrama de blocos da ligação da excitatriz no gerador síncrono.

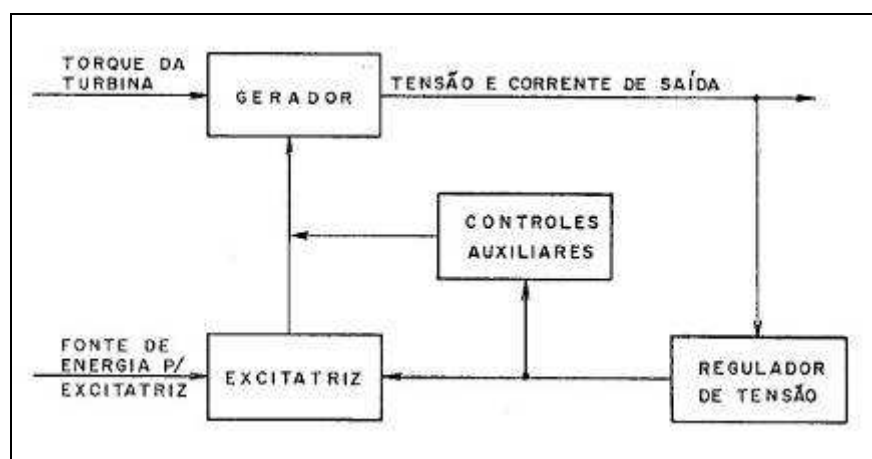


Figura C11 - Gerador síncrono com alimentação de campo externa

C.2.5.2.GERADOR SÍNCRONO COM ROTOR BOBINADO E EXCITATRIZ INTERNA

Os enrolamentos de campo são alimentados com corrente contínua a partir de um gerador interno também conhecido por excitatriz, acoplado diretamente ao eixo da máquina. Neste tipo de máquina não há escovas, reduzindo, então, as manutenções. Na Figura C12, pode-se observa os detalhes da excitatriz.



Figura C12 - Gerador síncrono com excitatriz interna

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. DIAS, M. M., SCHAEFFER, L., DIAS, A. M., CÉSAR, J. L. Novas Perspectivas das Máquinas Elétricas Trifásicas a Partir da Utilização de Materiais Magnéticos Macios Sinterizados. Novo Hamburgo: Revista Liberato, v. 6, n. 6, 2005. p. 56-65.
- [2]. JANSSON, P. Soft Magnetic Materials for A.C. Applications. Hoeganes A.B., Hoeganes Swed, Powder Metallurgy, v.35, n.1, 1992.
- [3]. 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.
- [4]. ITOH, Y., TAKEDA, Y., KUROIISHI, 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.
- [5]. JANSON P. Soft Magnetic Composites from DC to MHz with Iron Powder, PM World Congress, 1998.
- [6]. Catálogo da ABINE, Motores Elétricos, 1998.
- [7]. PEREIRA, L. A.. Aplicação de Materiais Sinterizados em Máquinas Elétricas, Trabalho de Publicação Interna, Depto Eng. Elétrica, PUCRS, 2000.
- [8]. Geradores Síncronos - Princípio de Funcionamento
<http://bagi.sites.uol.com.br/PrincipFuncGerador.htm>, Acesso em 12/02/2009
- [9]. FITZGERALD, A.E, KINGSLEY, Jr. C, UMANS, S.D. Electric Machinery. New York, McGraw-Hill Inc, 1990. 599p.
- [10]. NASAR, S.A. Handbook of Electric Machines. New York, McGraw-Hill, 1987.
- [11]. LANDGRAF, Fernando JG. Propriedades magnéticas dos aços para fins elétricos.
<http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/landgraf/nossos%20artigos%20em%20pdf/02Lan%20%20recope%20.pdf>, Acesso em 12/02/2009
- [12]. REBORA, G. La Construcción de Máquinas Eléctricas. Barcelona, Hoepli, Editorial Científico-Médica, 1969.
- [13]. RICHARDSON, D.V. Rotating Electric Machinery and Transformer Technology. Virginia-USA, Reston Publishing Company, Inc., 1982.
- [14]. CULLITY, B.D. Introduction to Magnetic Materials. Adison. Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1967, 514p.

- [15]. LENEL, F.V. Magnetic Applications. Metals Handbook, v.7, 1984.
- [16]. BAS, J. A., PUIG, J., MOLINS, C.B. Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art. Modern Developments in Powder Metallurgy, Princeton, New Jersey. Metal Powder Industries Federation, v.18, 1988.
- [17]. VLACK, L.H.V. Princípio de Ciência dos Materiais, S. Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1970.
- [18]. LALL, C; BAUM L.W. High Performance Soft Magnetic Components by Powder Metallurgy and Metal Injection Molding, Modern Developments in P/M.
- [19]. Z.P. POPOV, T.L. RATCHEV, Y.YANKOV. 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.
- [20]. LALL, C. Soft Magnetism, Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding, Princeton, New Jersey. Metal Powder Industries Federation, 1992.
- [21]. JAMES, B. A., WILLIAMS, G. Review of the Magnetic Properties of Sintered Iron. Powder Metallurgy, v.22, n.2, 1979.
- [22]. LANDGRAF, F.J.G., PLAUT, R.L. Efeito do Tamanho de Grão na Permeabilidade Magnética Máxima da Liga Ferro 47,5% Níquel, Metalurgia – ABM, v.45, n.380, 1989, p.677-681.
- [23]. Aços Elétricos – Grão não Orientado. Artigo de Circulação Interna da ACESITA, 1993.
- [24]. LALL, C. The Effect Sintering Temperature and Atmosphere on the Soft Magnetic Properties of P/M Materials, Advances in Powder Metallurgy, v.3, 1992.
- [25]. LANDGRAF, F.J.G., Materiais Magnéticos Para a Indústria Automobilística, XVI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva – SIMEA 16., 2008 São Paulo, 2008.
- [26]. NASAR, S.A. Handbook of Electric Machines. New York, McGraw-Hill, 1987.
- [27]. CHIAVERINI, V. Metalurgia do Pó. 3ª ed. Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda, São Paulo (Brasil). 1992. 352p.
- [28]. DIAS, M. M. Construção de uma máquina síncrona de relutância trifásica com rotor de material magnético macio sinterizado. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de

Materiais - PPGE3M -, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999. 62 p.

- [29]. LENEL, F. V. Magnetic Applications. Metals Handbook, v. 7, 1984. p. 638-641.
- [30]. LALL, C. Soft Magnetism, Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding. Princeton, New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 1992. 141 p.
- [31]. BAS, J. A.; PUIG, J.; MOLINS, C. B. Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art. New Jersey: Modern Developments in Powder Metallurgy, Metal Powder Industries Federation, v. 18, 1988. p. 745-756.
- [32]. COLTON, J. S. Metal Powder Processing. Georgia Institute of Technology, ME 4210: Manufacturing Processes and Engineering, 2009. 29 p.
- [33]. ASM Handbook. Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, v. 7, 1998. 1146 p.
- [34]. BONATO, M. M. Resistência à Corrosão do Aço ABNT 316L Injetado Sinterizado. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2003. 121 p.
- [35]. GUSSOW, M. Eletricidade Básica. Makron Books, 2 ed. 1997. 566 p.
- [36]. BERNARDI, L. O.; PANTANO, R. Medição da resistividade elétrica em condutores metálicos. Revista Intellectus, n. 19, 2012. p. 55-69.
- [37]. FALCONE, A. G. Eletromecânica: Transformadores e Transdutores, Conversão Eletromecânica de Energia, Máquinas Elétricas. São Paulo: Edgard Blücher, 1979. 478 p.
- [38]. JANSSON, P. Soft Magnetic Materials for A.C. Applications. Powder Metallurgy. v. 35, n.1, 1992. p. 63-66.
- [39]. LEWIS, J. A., DIAS, M. M., CERVA, L. L. Cerva; BARBOZA, J. S., SCHAEFFER, L., Estudo Comparativo de Ligas Magnéticas Através de Simulação por Elementos Finitos, 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Nov. 2008.
- [40]. SLUSAREK, B.; DLUGIEWICZ, L. Powder magnetic materials – area of application. Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium. Maio, 2006.

- [41]. LUSAREK, B.; GAWRYS, P. PRZYBYLSKI, M., New PM magnetic developments, Metal Powder Report. Volume 64, Numero 6, 2009.
- [42]. SLUSAREK, B.; DLUGIEWICZ, L., GAWRYS, P., PRZYBYLSKI, M., Magnetolectric DC Motors with powder magnetic circuits. Proceedings of Electrotechnical Institute, Issue 240, 2009.
- [43]. GERMAN, R. M. Powder Metallurgy Science. New Jersey, Metal Powder Industries Federation, 1984. 279p.
- [44]. 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), p.69-78.
- [45]. VERMA, N.; UPADHYAYA, A. Effect of Phosphorus addition as sintering activator in Sinter-Hardened alloy steels. Department of Materials and Metallurgical Eng, Indian Institute of Technology, 2007. 26 p.
- [46]. BAS, J. A.; CALERO, J. A.; DOUGAN, M. J. Sintered soft magnetic materials. Properties and applications. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 254–255, 2003. p. 391–398.
- [47]. BUSCHOW, K. H. J. Handbook of Magnetic Materials. Elsevier Science, v. 19, 2011. 464p.
- [48]. ASAZA, K., ISHIHARA, C., Technical trends in soft magnetic parts and materials, Hitachi Powdered Metals Technical Report, No. 4, 3–9, 2005.
- [49]. SILVA, M. C. A.; BOLFARINI, C.; KIMINAMI, C. S.; GUSSON, P. P. Magnetic Properties of Spray Formed Fe-3%wtSi, Fe-5%wtSi and Fe-6%wtSi Alloys. Materials Science Forum, v. 416, n. 4, 2003. p. 113-118.
- [50]. LALL, C; BAUM, L. W. High Performance Soft Magnetic Components by Powder Metallurgy and Metal Injection Molding. Modern Developments in P/M, v. 18, 1998. p. 363-389.
- [51]. NARASIMHAM, K.; HANEJKO, F.; MARUCCI, L. Growth Opportunities with Soft Magnetic Materials. Washington, D.C.: Hoeganaes Corporation, 2008. 9 p.
- [52]. HANEIJO, F. G.; PHAN, H. G. Powder metallurgy materials for AC magnetic applications. Washington, D.C.: Presented at PM TEC, 96 World Congress, June 16-21, 1996.
- [53]. 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.710-712.

- [54]. CASTRO, N. A.; RODRIGUES, D.; LANDGRAF, F. J. G.; YONAMINE, T.; HENRIQUE, M. L. Pó de ferro microencapsulado: efeito do tratamento térmico de recozimento na redução das perdas magnéticas. XV Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, 2002. 7 p.
- [55]. 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.
- [56]. DIAS, M. M.; DIAS, A. M.; MUSSKOPF, A. Desenvolvimento de Aços Sinterizados FE-NI-MO-P, Revista Liberato, v.6, n.6, 2005. p. 49-55.
- [57]. KHRAISAT, W.; NYBORG, L. Liquid phase sintering of ferrous powder by carbon and phosphorus control. Powder Metallurgy, v. 46, n. 3, 2003. p. 265-270.
- [58]. VLACK, L.H.V. Princípio de Ciência dos Materiais, S. Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1970. 427p.
- [59]. FLETCHER F.B. Carbon and Low-Alloy Steel Plate in: ASM Handbook, v.1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, Materials Park, OH, 1995.
- [60]. MEEKER, D., Finite Element Method Magnetics. User's Manual, v.4.2, 2010.
- [61]. KRAUS, J. D.; CARVER, K. R. Eletromagnetismo. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 780 p.
- [62]. JILES, D. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. London: Chapman and Hall, 1991. 440p.
- [63]. PERMANENT MAGNET MATERIALS. Special-Purpose Material. Revised by J.W.Fiepke, Crucible Magnetics, a Division ou Crucible Material Corporation. p.782-803.
- [64]. KRUPP WIDIA. Permanent Magnet Material and Components.
- [65]. KOSOW, I. L., Electrical Machinery and Transformers. New Jersey, Globo, 1987.
- [66]. KLAR, E. Metals Handbook Ninth Edition. Ohio, American Society for Metals, 1984. 897p.
- [67]. LENEL, F. V. Powder Metallurgy Principles and Applications. New Jersey, Metal Powder Industries Federation, 1980. 589p.
- [68]. BRANDBURY, S. Powder Metallurgy Equipment Manual. New Jersey, ISBN, 1986. 199p.