Universidade Feevale Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais

**GILSON GONÇALVES JACOBY** 

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA ELÉTRICA ROTATIVA TRIFÁSICA POR METALURGIA DO PÓ A SER UTILIZADA EM GERADOR EÓLICO DE 5 KW

> Novo Hamburgo 2016

Universidade Feevale Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais

**GILSON GONÇALVES JACOBY** 

# DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA ELÉTRICA ROTATIVA TRIFÁSICA POR METALURGIA DO PÓ A SER UTILIZADA EM GERADOR EÓLICO DE 5 KW

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Eng.º Moisés de Mattos Dias

Novo Hamburgo 2016

# DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

Jacoby, Gilson Gonçalves.

Desenvolvimento de uma máquina elétrica rotativa trifásica por metalúrgica do pó a ser utilizada em gerador eólico de 5kw / Gilson Gonçalves Jacoby. – 2016. 113 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia de

Materiais e Processos Industriais) – Feevale, Novo Hamburgo-RS, 2016.

Inclui bibliografia e apêndice. "Orientador: Prof. Dr. Eng.º Moisés de Mattos Dias".

1. Metalúrgica do pó. 2. Aerogeradores. I. Título.

CDU 621.762

Bibliotecária responsável: Tatiane de Oliveira Bourscheidt - CRB 10/2012

### Universidade Feevale Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais

## **GILSON GONÇALVES JACOBY**

# DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA ELÉTRICA ROTATIVA TRIFÁSICA POR METALURGIA DO PÓ A SER UTILIZADA EM GERADOR EÓLICO DE 5 KW

Dissertação de mestrado aprovada pela banca examinadora em 25 de Fevereiro de 2016, conferindo ao autor o título de Mestre em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais.

### Componentes da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup> Moisés de Mattos Dias.(Orientador) Universidade Feevale

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup> Ricardo Martins de Martins Universidade Feevale

Prof. Dr. Eng<sup>o</sup> Jose Lesina Cezar Universidade luterana do Brasil

#### RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento (projeto, construção e testes) de um gerador elétrico de alto desempenho de 5 kW, também conhecido por Máquina Elétrica Rotativa Trifásica com Ímãs Permanentes, a ser utilizado em um gerador eólico. Este gerador (ou máquina elétrica rotativa) foi construído utilizando-se os processos da Metalurgia do Pó (M/P) para construção do núcleo do rotor e ímãs permanentes de Nd-Fe-B inseridos no mesmo, porém o núcleo do estator manteve a sua construção original a partir de um pacote de chapas laminadas, utilizando-se um aço magnético de elevada resistividade elétrica, como o aço-silício. Outras partes da máquina, como eixos, rolamentos e carcaça, foram adaptadas a partir de outras máquinas de dimensões equivalentes como um motor de indução ou usinadas quando for o caso. A máquina elétrica rotativa, ou gerador elétrico, construído a partir desta topologia apresentou um rendimento estimado de aproximadamente 88%. Esta máquina rotativa foi testada em bancada como gerador assíncrono, tendo acoplado no seu eixo rotacional outra máquina rotativa primária para simulação e controle do seu funcionamento. O teste final da máquina gerou uma tensão de 326 VAC na frequência em 60 Hz (1800 RPM).

Palavras chave: Máquinas Síncronas com Ímãs Permanentes, Aerogeradores, Metalurgia do Pó.

### ABSTRACT

This project aims at the development (design, construction and testing) of an electric generator of high-performance 5 kW, also known as Electric Rotary Three-phase machine with permanent magnets to be used in a wind generator. This generator (or rotary electric machine) was constructed using the methods of powder metallurgy (M / P) to construct the core of the rotor and permanent magnets of Nd-Fe-B inserted therein, but the stator core maintained its unique construction from a laminated sheet package, using a magnetic steel high electrical resistivity such as silicon steel. Other machine parts such as shafts, bearings and housing, have been adapted from other machines of equivalent size as an induction motor or machined when necessary. The rotary electric machine or electric generator, built from this topology presented an estimated yield of about 88%. This rotary machine was tested in bench as asynchronous generator, having coupled in its rotational axis other primary rotary machine for simulation and control of its operation. The ultimate test of the machine generated a voltage of 326 VAC at a frequency of 60 Hz (1800 RPM).

**Keywords**: synchronous machines with permanent magnets, Wind Turbines, Powder Metallurgy.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Propriedades magnéticas da liga Fe-Si em função do conteúdo de silício 18
Figura 2: Variação da resistividade em função da densidade18
Figura 3: Variação da indução magnética em função da densidade para o ferro
sinterizado19
Figura 4: Micrografia da liga Fe-50%Ni sinterizada25
Figura 5: Matriz de duplo efeito para compactação de materiais magnéticos28
Figura 6: Fragmento de material ferromagnético dividido em grão e subdividido em
domínios29
Figura 7: Comparação, em 60 Hz, da perda em núcleos de materiais sinterizados e
de chapas laminadas de aço com fósforo, orientadas, de 0,63 mm e o aço M-19 de
0,61 mm
Figura 8: Perda total nos núcleos, em 60 Hz, de material sinterizado, separado em
perdas por histerese e corrente induzidas
Figura 9: Comparação das perdas totais do material sinterizado, medidas com uma
indução de 1,5 T, com chapas de aço laminadas com fósforo, orientadas, de 0,64
mm e o aço silício M-19 de 0,61mm34
Figura 10: Percentual das perdas, por correntes induzidas da perda total em núcleos
de materiais sinterizados, de chapas de aço laminadas com fósforo, orientadas, de
0,64 mm e do aço silício M-19 de 0,61 mm35
Figura 11: Ciclo de histerese – (a) para um material magnético duro; (b) comparação
entre material magnético macio e duro
Figura 12: (a) Curva de magnetização típica; (b) relação correspondente entre a
permeabilidade relativa e o campo aplicado H
Figura 13: Desenho esquemático do dispositivo para determinação da resistividade
de materiais40
Figura 14: Máquina síncrona convencional - (a) rotor polos lisos - (b) rotor polos
salientes43
Figura 15: Máquina de indução - (a) rotor tipo gaiola - (b) rotor bobinado44
Figura 16: (a) Máquina c.a. com estator trifásico e (b) força magnetomotriz45
Figura 17: (a) Enrolamento de estator trifásico, 2 polos, simplificado e (b) correntes
trifásicas instantâneas46

Figura 18: Representação do campo girante como resultante da fmm das 3 fases em
3 instantes diferentes (a), (b) e (c)47
Figura 19: Diagrama esquemático de uma máquina trifásica com ímã permanente.
As setas indicam a direção da magnetização do rotor49
Figura 20: Vista em corte de um motor síncrono trifásico com ímã permanente com o
sensor de velocidade e posição para controle do motor50
Figura 21: Partes funcionais de uma turbina eólica53
Figura 22: Esquema de ligação básico do Gerador Síncrono55
Figura 23: Aerogerador do parque eólico de Osório/RS55
Figura 24: Amostras na forma de anel – (a) Matriz – (b) Corpo de Prova Prova57
Figura 25: Amostras na forma de cilindro – (a) Matriz – (b) Corpo de Prova57
Figura 26: Amostras na forma de núcleo de transformador – (a) Matriz Núcleo E– (b)
Matriz Núcleo T – (c) Corpos de Prova58
Figura 27: Curva de sinterização59
Figura 28: Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento
secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento do primário60
Figura 29: Anel segmentado com terminais para medida da resistividade elétrica61
Figura 30: Transformadores – (a) Núcleos por M/P (esquerda) de Chapas (direita) –
(b) Bobinados e montados por M/P (direita) de Chapas (esquerda)62
Figura 31: Motor de indução trifásico de 10CV – (a) Vista lateral – (b) parcialmente
desmontado63
Figura 32: Esquema das chapas do estator da máquina64
Figura 33: Esquema do bobinamento da máquina desenvolvida64
Figura 34: Projeto do rotor – (a) Desenho dimensional – (b) vista em perspectiva65
Figura 35: Ímã de Nd-Fe-B66
Figura 36: Peças a serem utilizadas na construção do rotor da máquina - (a) Tarugo
compactado e sinterizado – (b) Ímãs de Nd-Fe-B67
Figura 37: Blocos usinados e inseridos no eixo da máquina68
Figura 38: Usinagem (eletroerosão a fio) e confecção das cavidades dos ímãs - (a)
Detalhe da cavidade – (b) tira de latão para prender os ímãs68
Figura 39: Rotor montado – (a) Detalhe da fixação das tiras de latão – (b) Detalhe de
fixação dos discos de aço inoxidável nas extremidades68
Figura 40: Detalhes da máquina na bancada – (a) Sem o rotor – (b) Com o rotor a
sua frente69

Figura 41:(a) Máquina sendo fechada com a colocação dos parafusos - (b)
Acoplamento das duas máquinas70
Figura 42: Máquinas acopladas na bancada para ensaios
Figura 43: (a) Máquina sendo fechada com a colocação dos parafusos - (b)
Acoplamento das duas máquinas71
Figura 44: Esquema Elétrico da Bancada de Ensaios concebida inicialmente72
Figura 45: Bancada de Testes do Gerador Trifásico ou Máquina desenvolvida neste
projeto – (a) Vista geral com as máquinas – (b) Detalhe da vista lateral72
Figura 46: Curvas magnéticas do ferro sinterizado – (a) Histerese – (b)
Magnetização73
Figura 47: Metodologia FEM75
Figura 48: Simulação da máquina com rotor de ímãs embutidos a partir de chapas
aço M15 - (a) Densidade de fluxo de entreferro - (b) Linhas de fluxo no plano
longitudinal da máquina76
Figura 49: Simulação da máquina com rotor de ímãs embutidos a partir da liga
sinterizada Fe - puro - (a) Densidade de fluxo de entreferro - (b) Linhas de fluxo no
plano longitudinal da máquina77
Figura 50: Ensaios do Gerador – (a) Osciloscópio – (b) Multímetro de Precisão79
Figura 51: Ensaios em 45 Hz – (a) Forma de onda de tensão – (b) lâmpadas79
Figura 52: Conevão da máquina com o gerador 81

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Propriedades físicas do ferro puro sinterizado	20
Quadro 2: Propriedades físicas das ligas sinterizadas de ferro-cobalto	21
Quadro 3: Propriedades físicas das ligas sinterizadas de ferro-fósforo	21
Quadro 4: Propriedades físicas das ligas sinterizadas de ferro-silício	22
Quadro 5: Propriedades físicas da liga sinterizada Fe-50%Ni	23
Quadro 6: Quadro comparativo das propriedades físicas das ligas	sinterizadas
magneticamente macias	25
Quadro 7: Quadro comparativo das propriedades físicas das ligas	sinterizadas
magneticamente macias	26
Quadro 8: Performance de núcleos padrões e núcleos compactados	36
Quadro 9: Força aplicada na compactação dos corpos de prova	58

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físicas do ferro sinterizado7	3
Tabela 2: Comparativo entre os materiais7	7
Tabela 3: Variações de Tensão e Corrente em função da Frequência do giro do eix	0
7	9

# LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- µmax permeabilidade magnética máxima
- $\mu_r$  permeabilidade magnética relativa
- B<sub>max</sub> Indução de saturação
- Br Retentividade
- ρe resistividade elétrica
- A área da seção transversal (m<sup>2</sup>)
- A área da superfície sob compressão (m<sup>2</sup>)
- A fase A
- B fase B
- B-indução magnética (T)
- Br indução magnética residual (retentividade magnética)
- C fase C
- C-capacitância em paralelo (F)
- CA corrente alternada
- CAD Computer Aided Designed
- CC corrente contínua

CGS - sistema de medidas adotado para expressar comprimento em centímetros,

massa, em gramas e tempo, em segundos

- CI circuito integrado (componente eletrônico contendo vários pinos)
- D1 diodo de roda livre 1
- *F* Força de compressão (kgf)
- f-frequência (Hz)
- Fe ferro
- FeP ferro fosforo
- FeSi –ferro silício
- FeNi ferro níquel
- NdFeB Neodímio Ferro Boro
- FEMM 4.2 programa de computador para projeto magnético de motores e transformadores versão 4.2
- H intensidade de campo magnético (A/m)
- H<sub>c</sub> intensidade de campo magnético coercitivo (A/m)

- I intensidade de corrente elétrica aplicada (A)
- V Tensão elétrica
- A Ampere
- rpm rotações por minuto
- k constante de proporcionalidade
- I comprimento da barra (m)
- L indutância própria da bobina (H)
- M/P Metalurgia do Pó
- MEV microscópio eletrônico de varredura
- Ni níquel
- P fósforo
- T Tesla
- MPa mega Pascal
- W velocidade angular
- T tempo (s)
- Kw fator de enrolamento
- Ns número de espiras por fase
- P número de polos
- fmm força magnetomotriz

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	MATERIAIS MAGNÉTICOS POR METALURGIA DO PÓ (M/P)	17
2.1.1	Materiais magnéticos macios	17
2.1.2	Imãs permanentes	26
2.2	APLICAÇÃO DA M/P EM NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRIC.	AS
	ROTATIVAS	31
2.3	PROPRIEDADES FÍSICAS DE INTERESSE	37
2.3.1	Introdução	37
2.3.2	Propriedades magnéticas dos materiais aplicados em máquinas elétric	as
	rotativas	37
2.3.3	Resistividade elétrica	39
2.3.4	Propriedades Mecânicas	41
2.4	MÁQUINAS SÍNCRONAS TRIFÁSICAS	41
2.4.1	Introdução	41
2.4.2	Máquinas elétricas trifásicas	42
2.4.3	Estator das Máquinas trifásicas	45
2.4.4	Rendimento das máquinas elétricas	48
2.4.5	Máquinas síncronas com imãs permanentes	49
2.5	MÁQUINAS SÍNCRONAS EM AEROGERADORES	52
3	PARTE EXPERIMENTAL	57
3.1	OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	57
3.2	PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS	59
3.3	PERDAS MAGNÉTICAS	61
3.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS	63
3.5	PROJETO DA MÁQUINA	63
3.5.1	Especificação da máquina	63
3.5.2	Projeto do rotor	64
3.6	MONTAGEM DA MÁQUINA	67

3.6.1	Introdução	67
3.6.2	Obtenção dos Núcleos do Rotor	67
3.6.3	Usinagem dos Núcleos	67
3.6.4	Montagem Final	69
3.7	BANCADA DE ENSAIOS	70
4	RESULTADOS E DISCUSÃO	73
4.1	PROPRIEDADES FÍSICAS OBTIDAS DAS LIGAS SINTERIZADAS	73
4.2	RESULTADO DAS SIMULAÇÕES	74
4.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS	78
5	CONCLUSÕES	83
REFE	RÊNCIAS	84
ANEX	(OS	
ANEX	(O A - GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS E MAGNETISMO	90
ANEX	(O B - METALURGIA DO PÓ	100
ANEX	(O C - TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA E ASPECTOS CONSTR	UTIVOS
	DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS	106

### 1 INTRODUÇÃO

Um gerador ou motor tem seu funcionamento básico igual das máquinas elétricas rotativas e possui duas partes básicas: os núcleos do estator e do rotor. Os núcleos, na sua maioria, são construídos a partir de finas lâminas metálicas (chapas de aço baixo carbono) com espessura menor que 1,0 mm, agrupadas em pacotes.

A construção do novo rotor composto de um material maciço da liga selecionada implicará no estudo detalhado do processo de metalurgia do pó, a confecção e usinagem das matrizes para este processo, bem como a análise das características mecânicas, elétricas e magnéticas dos materiais que impactam diretamente na funcionalidade da máquina.

O processo de metalurgia do pó é, geralmente mais simples e menos oneroso para a indústria, o que implica em máquinas menos complexas, leves e com um custo de produção mais baixo. A assertividade na escolha dos materiais remete, analisando as suas principais propriedades, a melhor eficiência em sua composição, melhor desempenho e melhor rendimento, sendo possível a construção do núcleo em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética e alta resistividade elétrica (JANSSON, 1992; KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997).

Contudo os motores elétricos convencionais construídos com chapas laminadas uma vez submetidos a um fluxo magnético com frequência abaixo de 400 Hz apresentam rendimento maior, quando comparado com os motores de núcleos maciços, inclusive aqueles construídos através do processo de metalurgia do pó.

O estudo proposto neste trabalho desenvolve a investigação sobre máquinas elétricas síncronas com ímãs permanentes para utilização em aerogeradores, nos quais o rotor, usualmente construído de chapas laminadas de aço baixo carbono e FeSi será substituído por outro rotor construído de ligas sinterizadas obtidas a partir dos processos da Metalurgia do Pó. Serão realizados estudos de possíveis ligas sinterizadas a serem utilizadas, como Fe puro, FeP, FeSi e FeNi, bem como a caracterização destes materiais quanto as propriedades físicas e simulações desta máquina.

Os dados das análises e simulações realizadas com a nova máquina permitirão a comparação e conclusão sobre a eficiência da mesma.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento (projeto, construção e testes) de uma máquina síncrona trifásica com imãs permanentes, cujo núcleo do rotor será produzido a partir de material sinterizado, utilizando-se do processo de metalurgia do pó, a ser utilizado em um aerogerador de pequeno porte de até 5kW, utilizando como base um motor de indução de 10 CV.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Algumas propriedades e características dos materiais e da máquina deverão ser estudadas para que se tenha embasamento nas análises a serem realizadas neste projeto:

- Estudo de máquinas síncronas trifásicas para uso em geradores para aerogeradores;
- Estudo de ligas sinterizadas possíveis de serem utilizadas em núcleos de máquinas elétricas rotativas;
- Estudo de ímãs de NdFeb e sua utilização em núcleos de máquinas síncronas;
- Estudo de propriedades físicas (magnéticas, resistividade elétrica e propriedades mecânicas) das ligas sinterizadas;
- Projeto do rotor considerando como base um motor de indução de 10 cv produzido pela VOGES;
- Montagem de uma bancada para teste da máquina.

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MATERIAIS MAGNÉTICOS POR METALURGIA DO PÓ (M/P)

A Metalurgia do Pó (M/P) é um técnica de produção que utiliza pós de um único metal, de vários metais ou de uma mistura de metais e não-metais. Consiste essencialmente na mistura mecânica de pós, compactando-os em matriz a altas pressões e aquecimento da peça compactada a uma temperatura menor do que a do ponto de fundição do ingrediente majoritário. As partículas são unidas em uma peça única forte, similar ao que seria obtido por derretimento dos mesmos ingredientes juntos.

Na construção de máquinas elétricas rotativas, os materiais magnéticos macios são utilizados na construção dos núcleos do rotor e estator, sendo usualmente construídos de chapas laminadas (neste trabalho substituído por blocos maciços de material sinterizado). Os materiais magnéticos duros são os ímãs permanentes e servem para substituição das bobinas de campo nestas máquinas.

#### 2.1.1 Materiais magnéticos macios

As propriedades físicas dos materiais obtidos por metalurgia do pó, consideradas de maior importância no desenvolvimento deste trabalho, estão relacionadas a seguir:

- Adicionadas impurezas, a resistividade de um elemento metálico aumenta, provocando distorções no reticulado cristalino, aumentando as imperfeições da rede cristalina. As maiores resistividades em metais são obtidas em ligas compostas de dois ou mais metais, nas mesmas proporções, ou próximas. Nestas condições, há uma interpenetração da rede cristalina dos materiais presentes na liga (VLACK, 1970; LUBORSKY; LIVINGSTON; CHIN, 1996);
- Há além da resistividade elétrica, também a permeabilidade magnética relativa máxima, e a redução da coercitividade, com o incremento de silício ao ferro, contudo, diminui também a indução de saturação, conforme mostra a Figura 1 (LALL; BAUM, 1998);



Figura 1: Propriedades magnéticas da liga Fe-Si em função do conteúdo de silício

ela sua resistividade elétrica sur

Caracterizam-se pela sua resistividade elétrica superior aos maciços de composição química semelhante, pela porosidade e a oxidação superficial das partículas, resulta este fato em um aumento ainda maior da 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 (POPOV; RATCHEV; YANKOV, 1991; LALL, 1992). A Figura 2 mostra a variação da resistividade em função da densidade para alguns materiais sinterizados (LALL, 1992);



Figura 2: Variação da resistividade em função da densidade

 A permeabilidade magnética diminui com incremento da porosidade, e também há uma diminuição da indução de saturação e um aumento da coercitividade (LALL, 1992; MOYER, 1980; JAMES; WILLIANS, 1979);

A Figura 3 mostra a variação da indução de saturação, para certo campo magnético, em função da densidade, para o ferro sinterizado (JAMES; WILLIANS, 1979);





- 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 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 (LANDGRAF; PLAUT, 1989; AÇOS ELÉTRICOS, 1993);
- As impurezas como carbono, nitrogênio e oxigênio também afetam as propriedades magnéticas das ligas de ferro sinterizadas. Quando o objetivo é a obtenção de materiais magnéticos de boas propriedades, é conveniente que os percentuais destas impurezas sejam mantidos nos seguintes níveis (LALL; BAUM, 1998):
- ✓ carbono: 0,01% máx;
- ✓ oxigênio: 0,02% máx;
- ✓ nitrogênio: 0,01% máx.
- O aumento da granulometria do pó aumenta a permeabilidade magnética e também a coercitividade. Além disto, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização também alteram algumas propriedades físicas (LALL, 1992). A seguir estão descritas as principais ligas que podem ser

utilizadas e suas propriedades físicas de interesse.Os materiais sinterizados mais comumente utilizados são os seguintes (LALL, 1992; LENEL, 1984; BAS; PUIG; MOLINS, 1988):

- ferro puro;
- ligas ferro-fósforo;
- ligas ferro-silício e ligas ferro-fósforo-silício;
- ligas ferro-níquel;
- ligas ferro-cobalto;
- aços inoxidáveis ferríticos.

**Ferro Puro:** Os materiais sinterizados de ferro puro são caracterizados por altas perdas e propriedades magnéticas médias. O ferro puro sinterizado de alta densidade possui saturação magnética e permeabilidade alta, e baixa coercitividade, propriedades essenciais para aplicações de corrente contínua. Um rígido controle sobre os materiais e as condições de processamento contribuem para a obtenção de ótimas propriedades, ou seja, se tensões são introduzidas ou o nível de pureza diminui, todas as propriedades são afetadas (BAS; PUIG; MOLINS, 1988). O Quadro 1 mostra as propriedades físicas de interesse do ferro puro.

		-							(continua)
Liga	ρ <sub>s</sub> [kg/m³]	B <sub>m</sub> [T]	B <sub>m</sub> [kG]	В, [T]	B <sub>r</sub> [kG]	H <sub>c</sub> [A/m]	H <sub>c</sub> [Oe]	μ <sub>r</sub> [Ad.]	ρ <sub>e</sub> [μΩ.m]
ASTM A811-87	6600	0,90	9,0	0,76	7,6	175	2,20	1.800	-
H=1194 A/m	6900	1,06	10,6	0,91	9,1	159	2,00	2.100	-
	7200	1,23	12,3	1,07	10,7	159	2,00	2.500	-
Lall & Baum	6800	1,14	11,4	0,96	9,6	131	1,65	2.900	0,14
1260 °C-AD	7200	1,36	13,6	1,10	11,0	127	1,60	3.700	0,12
45 min.	7400	1,47	14,7	1,29	12,9	119	1,49	4.700	0,11
H=1990 A/m									
McDermott	6700	1,00	10,0	0,77	7,7	146	2,05	1.988	-
1260 °C,AD	7000	1,17	11,7	0,91	9,1	146	2,05	2.317	-
30 min.	7300	1,27	12,7	1,05	10,5	146	1,95	2.651	-
H=1194 A/m									
Moyer	7000	1,14	11,4	1,10	11,0	143	1,80	2.800	-
1121 °C-H2+N2									
H=1194 A/m									

Liga	ρ <sub>s</sub> [kg/m³]	B <sub>m</sub> [T]	B <sub>m</sub> [kG]	B <sub>r</sub> [T]	B <sub>r</sub> [kG]	H <sub>c</sub> [A/m]	H <sub>c</sub> [Oe]	μ <sub>r</sub> [Ad.]	ρ <sub>e</sub> [μΩ.m]
Mossner	7000	1,00	10,0	0,89	8,9	159	2,00	2.000	-
1121 °C (1121 °C	7000	1,07	10,7	0,94	9,4	127	1,60	2.400	-

Quadro 1: Propriedades físicas do ferro puro sinterizado

Fonte: Lall (1992)

**Ligas ferro-cobalto**: Estas ligas têm como principal característica a sua alta indução máxima. Esta propriedade é interessante quando o volume e o peso dos componentes devem ser minimizados (BAS; PUIG; MOLINS, 1988). O Quadro 2 mostra as propriedades físicas de interesse da liga Ferro-Cobalto.

Quadro 2: Propriedades físicas das ligas sinterizadas de ferro-cobalto

Liga	ρ <sub>s</sub>	B <sub>m</sub>	B <sub>m</sub>	В <sub>г</sub>	B <sub>r</sub>	H <sub>c</sub>	H <sub>c</sub>	μ <sub>r</sub>	ρ <sub>e</sub>
	[kg/m³]	[T]	[kG]	[T]	[kG]	[A/m]	[Oe]	[Ad.]	[μΩ.m]
Fe-49%Co H=7960 A/m	8000	2,1	21	-	-	127	1,60	3.900	0,35

Fonte: Bas, Puig e Molins (1998)

Liga ferro-fósforo: Possui propriedade (com teor de fósforo na faixa de 0,45 a 0,80%) que mantém a vantagem econômica do ferro puro, adicionando ainda características magnéticas superiores. Basicamente, a força coercitiva é reduzida, enquanto se mantém uma alta indução máxima (BAS; PUIG; MOLINS, 1988). O Quadro 3 mostra as propriedades físicas de interesse destas ligas.

Liga	ρ <sub>s</sub> [kg/m³]	B <sub>m</sub> [T]	B <sub>m</sub> [kG]	B <sub>r</sub> [T]	B <sub>r</sub> [kG]	H <sub>c</sub> [A/m]	H <sub>c</sub> [Oe]	μ <sub>r</sub> [Ad.]	ρ <sub>e</sub> [μΩ.m]
ASTM A-839	6800	1,07	10,7	0,87	8,7	135	1,70	2.400	-
	7100	1,19	11,9	0,99	9,9	135	1,70	2.800	-
	7200	1,27	12,7	1,08	10,8	135	1,70	3.100	-
Lall & Baum	7000	1,23	12,3	0,99	9,9	96	1,21		0,23
1260 °C-AD	7200	1,34	13,4	1,12	11,2	80	1,00	4.800	0,21
45 min.	7400	1,46	14,6	1,26	12,6	60	0,75		0,20
H=1990 A/m									
McDermott	6840	1,11	11,1	0,97	9,7	139	1,75	2.831	-
1260 °C,AD	7120	1,24	12,4	1,10	11,0	139	1,75	3.286	-
30 min.	7270	1,32	13,2	1,18	11,8	163	2,05	3.701	-
H=1194 A/m									

Quadro 3: Propriedades físicas das ligas sinterizadas de ferro-fósforo

(conclusão)

(continue)

		-			J				(conclusão)
Liga	ρ <sub>s</sub> [kg/m³]	В <sub>т</sub> [Т]	B <sub>m</sub> [kG]	B <sub>r</sub> [T]	B <sub>r</sub> [kG]	H <sub>c</sub> [A/m]	H₀ [Oe]	μ <sub>r</sub> [Ad.]	ρ <sub>e</sub> [μΩ.m]
Moyer	7100	1,22	12,2	1,19	11,9	119	1,49	3.600	-
1121 °C-									
H2+N2									
Mossner	7200	1,02	10,2	0,87	8,7	143	1,80	2.250	-
1121 °C	7400	1,31	13,1	1,15	11,5	72	0,90	5.550	-
1288 °C									

Quadro 3: Propriedades físicas das ligas sinterizadas de ferro-fósforo

Fonte: Lall (1992)

Liga ferro-silício: Característica de força coercitiva similar às ligas ferrofósforo, com uma indução máxima ligeiramente maior. Porém, sua resistividade elétrica é bastante superior, diminuindo assim as perdas por correntes parasitas. Estas ligas são aplicadas em circuitos que operam em frequências médias de até 1200 Hz. O Quadro 4 resume as propriedades das ligas ferro-silício (LALL, 1992).

Liga	ρ <sub>s</sub> [kg/m³]	В <sub>т</sub> [T]	B <sub>m</sub> [kG]	B <sub>r</sub> [T]	B <sub>r</sub> [kG]	H <sub>c</sub> [A/m]	H <sub>c</sub> [Oe]	μ <sub>r</sub> [Ad.]	ρ <sub>e</sub> [μΩ.m]
Lall & Baum	6800	1,17	11,7	0,94	9,4	104	1,31	2.900	0,59
1260 °C-AD	7000	1,31	13,1	1,09	10,9	92	1,16	3.700	0,55
45 min.	7200	1,39	13,9	1,18	11,8	80	1,00	4.900	0,52
H=1990 A/m									
Lall	7200	1,28	12,8	1,17	11,7	64	0,80	7.000	-
1260 °C-									
Vácuo									
H=1990 A/m									
Moyer &	7200	1,35	13,5	1,21	12,1	72	0,90	7.500	-
Ryan	7400	1,23	12,3	0,75	7,5	48	0,60	7.000	-
1232 °C-									
Vac.1h									
1232 °C-									
Vac.1h									
Mossner	6700	0,99	9,9	0,68	8,7	143	1,80	1.750	-
1121 °C	7400	1,19	11,9	0,91	11,5	72	0,90	4.050	-
1260 °C									
H=1194 A/m									

Quadro 4: Propriedades físicas das ligas sinterizadas de ferro-silício

Fonte: Lall (1992)

Aços inoxidáveis ferríticos: Os aços inoxidáveis ferríticos são altamente utilizados devido à sua resposta magnética e moderada resistência à corrosão

(LALL, 1992). Além disso, quando sinterizados em vácuo, estes materiais podem exibir ductilidade.

Ligas ferro-níquel: A alta permeabilidade é a principal característica que distingue as ligas ferro níquel. Além disso, a indução máxima é baixa e a resistividade elétrica tem um valor intermediário, se comparada às demais (LENEL, 1980; BAS; PUIG; MOLINS, 1988). Estas propriedades aplicam-se para operar em altas frequências e com baixa excitação, nas quais o tempo de resposta é muito curto, como por exemplo em circuito atuadores de termopares. Para a obtenção de alta densidade o pó é compactado em uma pressão de 690 MPa e sinterizado em vácuo acima de 1200ºC. Com este processo, uma permeabilidade relativa máxima de 40000 H/m e uma força coercitiva de 16 A/m podem ser obtidas, que são valores comparáveis aos de ligas ferro níquel maciças (LENEL, 1980). O Quadro 5 é uma compilação de resultados obtidos por vários autores. O efeito mais significativo do aumento do teor de níquel é uma queda na retentividade e um aumento na coercitividade (LALL, 1992). Apesar de a liga Fe-50%Ni apresentar valores de coercitividade, indução residual e a indução máxima menores se comparada à liga Fe-3%Si, ela é mais indicada para aplicações em corrente alternada de alto desempenho, especialmente se for considerado que a permeabilidade máxima deste material é aproximadamente quatro vezes à da liga Fe-3%Si e quase seis vezes do que a do ferro puro (LALL, 1992).

r									(continua)
Liga	ρ <sub>s</sub> [kg/m³]	В <sub>т</sub> [Т]	B <sub>m</sub> [kG]	В, [T]	B <sub>r</sub> [kG]	H <sub>c</sub> [A/m]	H <sub>c</sub> [Oe]	μ <sub>r</sub> [Ad.]	ρ <sub>e</sub> [μΩ.m]
Lall & Baum	6800	0,93	9,3	0,71	7,1	20,7	0,26		0,78
1260 °C-AD	7100	1,09	10,9	0,80	8,0	19,9	0,25	2.100	0,69
45 min.	7500	1,27	12,7	0,94	9,4	19,1	0,24		0,60
H=1990 A/m									
Lall	7400	1,08	10,8	0,86	8,6	23,9	0,30	10.600	-
1260 °C-									
Vácuo									
H=1990 A/m									
Liga	ρs	Bm	Bm	Br	Br	Hc	Hc	μr	ρe
	[kg/m3]	[T]	[kG]	[T]	[kG]	[A/m]	[Oe]	[Ad.]	[μΩ.m]

Quadro 5: Propriedades físicas da liga sinterizada Fe-50%Ni

					J .				(conclusão)
Liga	ρ <sub>s</sub> [kg/m³]	В <sub>т</sub> [Т]	B <sub>m</sub> [kG]	В, [T]	B, [kG]	H <sub>c</sub> [A/m]	H <sub>c</sub> [Oe]	μ, [Ad.]	ρ <sub>e</sub> [μΩ.m]
Moyer &	7300	1,12	11,2	0,70	7,0	23,9	0,30		-
Ryan	7500	1,23	12,3	0,75	7,5	23,9	0,30	7.000	-
1264 oC-	7400	1,23	12,3	0,75	7,5	48,0	0,60		-
Vac.2h									
1264 oC-									
Vac.2h									
1260 oC-									
Vac.1h									
Mossner	7100	1,15	11,5	0,85	8,5	31,4	0,39	11.000	-
1121 oC	7300	1,29	12,9	0,90	9,0	23,9	0,30	16.000	-
1288 oC									

Quadro 5: Propriedades físicas da liga sinterizada Fe-50%Ni

Fonte: Lall (1992)

A Figura 4 mostra uma micrografia óptica da liga Fe-50%Ni. A matriz consiste de uma única fase austenítica com manchas de recozimento. Os poros bem arredondados e a presença destas manchas de recozimento são sinais de um produto bem sinterizado. Uma temperatura maior de sinterização, para promover a difusão, aumentará a densidade. Outra maneira de aumentar a densidade é simplesmente pela recompactação das peças após a sinterização. Este procedimento deve ser seguido por um tratamento térmico de recozimento, para eliminação das tensões internas; se não, uma resposta magnética não satisfatória será exibida (LALL, 1992).

Os Quadros 6 e 7 mostram comparações, de autores diferentes, das propriedades físicas de interesse das principais ligas magneticamente macias sinterizadas.

#### Figura 4: Micrografia da liga Fe-50%Ni sinterizada



Quadro 6: Quadro comparativo das propriedades físicas das ligas sinterizadas magneticamente macias

Liga	ρ <sub>s</sub> [kg/m³]	B <sub>m</sub> [T]	B <sub>m</sub> [kG]	В <sub>r</sub> [T]	B <sub>r</sub> [kG]	H <sub>c</sub> [A/m]	H <sub>c</sub> [Oe]	μ <sub>r</sub> [Ad.]	ρ <sub>e</sub> [μΩ.m]
ASC100.29	6800	1,1	11	0,6	6	90	1,13	2.400	0,70
+4%Si									
PASC45	6800	1,2	12	0,6	6	100	1,26	2.200	0,80
+4%sl									
ASC100.29	7300	1,4	14	0,6	6	90	1,13	3.600	0,35
+2%Si									
PASC45	7300	1,4	14	-	-	60	0,75	6.100	0,45
+2%Si									
ASC100.29	7300	1,4	14	-	-	65	0,81	5.000	0,47
+3%Si									
PASC45	7300	1,4	14	1,0	10	60	0,75	6.100	0,45
+2%Si									
ASC100.29	7200	1,3	13	1,1	11	80	1,00	4.300	0,47
+3%Si									
ABC100.30	7200	1,4	14	0,8	8	80	1,00	4.800	0,40
+0,45%P+5									
%Sn									
Fe-50Ni	7400	1,1	11	1,0	10	25	0,31	13.000	0,50
ABC100.30	7400	1,3	13			37	0,46	9.700	0,48
+0,45%+8									
%Sn									

Fonte: Jansson (1992)

Liga	ρ <sub>s</sub> [kg/m³]	В <sub>т</sub> [Т]	B <sub>m</sub> [kG]	В <sub>г</sub> [T]	B <sub>r</sub> [kG]	H <sub>c</sub> [A/m]	H <sub>c</sub> [Oe]	μ <sub>r</sub> [Ad.]	ρ <sub>e</sub> [μΩ.m]
Fe	6800	1,14	11,4	0,96	9,6	131	1,65	2.900	0,14
	7200	1,36	13,6	1,18	11,8	127	1,60	3.700	0,12
	7400	1,47	14,7	1,29	12,9	119	1,50	4.700	0,11
Fe-0,45%P	7000	1,23	12,3	0,99	9,9	96	1,20		0,23
	7200	1,34	13,4	1,12	11,2	80	1,00	4.800	0,21
	7400	1,46	14,6	1,26	12,6	60	0,75		0,20
Fe-0,8%P	7000	1,27	12,7	1,08	10,8	118	1,48		0,32
	7200	1,32	13,2	1,13	11,3	119	1,49	-	0,30
	7400	1,42	14,2	1,15	11,5	69	0,87		0,28
Fe-1,0%P	7000	1,35	13,5	1,13	11,3	67	0,84		0,40
	7200	1,38	13,8	1,15	11,5	64	0,80	-	0,38
	7400	1,47	14,7	1,25	12,5	62	0,78		0,35
Fe-3%Si	6800	1,17	11,7	0,94	9,4	104	1,30		0,59
	7000	1,31	13,1	1,09	10,9	92	1,15	4.900	0,55
	7200	1,39	13,9	1,18	11,8	80	1,00		0,52
Fe-50%Ni	6800	0,93	9,3	0,71	7,1	21	0,26		0,78
	7100	1,09	10,9	0,80	8,0	20	0,25	21.000	0,69
	7500	1,27	12,7	0,94	9,4	19	0,24		0,60
Fe-81%Ni-	7800	0,72	7,2	0,48	4,8	6	0,07	77.000	0,60
2%Mo									
Fe-50%Co-	7200	1,24	12,4	0,73	7,3	175	2,2	-	-
2%V									

Quadro 7: Quadro comparativo das propriedades físicas das ligas sinterizadas magneticamente macias

Fonte: Jansson (1992)

### 2.1.2 Imãs permanentes

A produção de materiais magnéticos por metalurgia do pó (M/P), além de oferecer as vantagens típicas associadas a este processo, permite obter características únicas de desempenho, como por exemplo, a orientação magnética, muito utilizada nos ímãs. Acrescenta-se a isto que pós de diferentes naturezas químicas como a liga ferro-silício e ferro-fósforo são fáceis de serem obtidos, bastando que misture os pós homogeneamente. Os três processos básicos da M/P são: obtenção dos pós da mistura, compactação e sinterização. Às vezes é necessária uma quarta etapa como a retificação. Na M/P, os pós, depois de serem

misturados, são compactados em matrizes onde adquirem a forma da cavidade da matriz. Após são colocados em fornos para sinterização que finalizará o processo adquirindo consistência e resistência mecânica (CHIAVERINI, 2001; BRADBURY, 1986; GERMAN, 1984).

Os principais ímãs comercializados atualmente são os cerâmicos (ferritas), as ligas de AlNiCo e os terras raras como samário-cobalto e neodímio-ferro-boro. Com exceção do AlNiCo fundido, todos são obtidos através dos processos da M/P. Assim, os imãs comercializados na atualidade compreendem quatro grandes grupos, sendo que os imãs sinterizados de ferritas compõem o maior deles. Os imãs de AlNiCo tem 9,23% da produção mundial de imãs e podem ser obtidos por sinterização ou fundição. O terceiro grupo é composto por imãs laminados como o FeCoCr, e outros. O grupo mais recente pertence a imãs de terras raras como o samário-cobalto (Sm-Co) e o neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B), também sinterizados, que detém 23,76%, e são os mais poderosos imãs produzidos atualmente. Nesses quatro grupos, os materiais mais importantes são aqueles obtidos por sinterização. (CULLITY, 1967; JILES, 1991).

Entre as tecnologias de fabricação mais utilizadas na obtenção de materiais magnéticos através de processos metalúrgicos, citam-se a fundição e a Metalurgia do Pó (M/P) (CHIAVERINI, 2001). No caso do emprego da tecnologia de fundição, a fabricação de ligas AlNiCo que também podem ser produzidas através de metalurgia do pó. Para as fabricações de ímãs do tipo terras raras como, por exemplo, o neodímio-ferro-boro e samário-cobalto, é empregada a tecnologia "Mechanical Alloying" na qual se utilizam moinhos de alta energia para a fabricação de ligas de pós, que são consolidadas através dos processos convencionais da M/P, ou seja, compactação e sinterização (CULLITY, 1967; JILES, 1991).

Para a fabricação de ímãs permanentes, além das etapas convencionais da M/P, acrescenta-se o processo de magnetização. As peças a serem magnetizadas são colocadas em circuitos magnéticos compostos por bobinas, nas quais circulam correntes elevadas, podendo atingir até milhares de Ampéres. Tais correntes são é fornecidas por fontes de tensão contínua, sendo a mais conhecida, a descarga capacitiva (CULLITY, 1967; JILES, 1991).

A Figura 5 mostra esquematicamente uma matriz para compactação de duplo efeito, utilizada para compactação de pós de materiais magnéticos (BRADBURY, 1986; GERMAN, 1984).

- 1) punção superior;
- 2) matriz;
- 3) cavidade onde o pó é colocado;
- 4) punção inferior.

Figura 5: Matriz de duplo efeito para compactação de materiais magnéticos



Fonte: elaborado pelo autor

Na obtenção de ímãs anisotrópicos, o processo de compactação ocorre sob a ação de um forte campo magnético gerado a partir de bobinas, processo este necessário para orientação das partículas do pó antes da consolidação. Ímãs compactados sem campo (compactação convencional) são denominados de ímãs isotrópicos (JILES, 1991; LANDGRAF; RODRIGUES, 1999). A magnitude deste campo magnético aplicado pode atingir até milhões de A/m, sendo, por este motivo, necessárias fontes de tensão ou corrente elétrica elevadas, da ordem de centenas de Volts e/ou Ampères.

A Figura 6 mostra que, geralmente, uma partícula de material magnético não consiste de um único cristal ou grão, mas de agregados de grãos que, por sua vez, se dividem nos domínios magnéticos. A anisotropia magnetocristalina faz com que o momento magnético de cada átomo alinhe-se, coletiva e espontaneamente, em uma direção preferencial. Esta é chamada *direção de fácil magnetização* daquela fase, e corresponde a uma família de direções. Em um monocristal ou grão, podem coexistir vários domínios magnéticos, mas no interior de cada domínio a magnetização de todos os átomos será paralela.

Os domínios se orientam de tal forma que a energia seja mínima, ou seja, os domínios adjacentes estão com polaridade contrária, o que diminui a relutância, e

em consequência a energia no campo magnético e a magnetização total é nula. Diminuindo o tamanho dos fragmentos, cada partícula pode tornar-se do tamanho de um grão ou monocristal, o que ocorre quando atinge o tamanho de alguns μm. (LANDGRAF; RODRIGUES, 1999).

Sob campo, antes e durante a compactação, as partículas tendem a girar para alinhar em suas direções de fácil magnetização paralelamente à direção do campo magnético externo aplicado, inclusive alinhando os domínios na mesma direção e sentido, fazendo com que a peça apresente propriedades magnéticas. Na sinterização, como é ultrapassada a temperatura de Curie, os domínios adjacentes se orientam em sentidos opostos, e a peça perde a magnetização, porém os domínios continuam alinhados paralelamente nas suas direções de fácil magnetização. Quando sujeitas à nova magnetização, as peças magnetizam-se novamente, os domínios que já estavam alinhados na mesma direção alinham-se agora no mesmo sentido, não sendo necessária a rotação dos domínios, resultando em um ímã com retentividade maior que o ímã isotrópico (LANDGRAF; RODRIGUES, 1999).

#### Figura 6: Fragmento de material ferromagnético dividido em grão e subdividido em domínios



Fonte: Landgraf e Plaut (1989)

Quanto menor for o tamanho médio dos fragmentos do pó, mais anisotrópico o ímã será, ou seja, apresentará uma maior retentividade. Entretanto, mesmo com diâmetro médio de partículas maiores, como algumas dezenas de µm, os ímãs apresentarão propriedades magnéticas, que serão intermediárias entre os ímãs isotrópicos e anisotrópicos. A razão disto é que uma partícula policristalina com vários grãos, embora a direção de orientação dos domínios seja paralela em um mesmo grão, tal direção será aleatória de grão para grão, e mesmo com a rotação destas partículas, nem todos os domínios ficarão orientados no sentido do campo

magnético aplicado na compactação, ou seja, na sua direção de mais fácil magnetização (LANDGRAF; RODRIGUES, 1999).

Os principais imãs utilizados em máquinas elétricas rotativas são as ferritas e o Neodimio-Ferro-Boro.

Ímãs de Ferrita: As ferritas são materiais a base de óxidos complexos e sua sinterização produz um material cerâmico que tem alta resistividade elétrica e baixa condutividade térmica. Sua fabricação ocorre a partir dos processos da M/P. Possuem uma estrutura cristalina hexagonal simples e algumas são conhecidas por Ferroxdure. A fabricação de ímãs cerâmicos sinterizados iniciou com os ímãs de ferrita, sendo que a ferrita de estrôncio vem superando gradativamente a ferrita de bário, que até meados da década de 1970 era produzida em maior quantidade. Podem ser isotrópicos ou anisotrópicos. São representadas pela composição química MO.6Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, na qual M representa bário, estrôncio, ou uma combinação de ambos. Alguns aditivos como SiO<sub>2</sub>, BiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são benéficos para aumentar a coercitividade e auxiliar na sinterização, possibilitando, por exemplo, dimininuição da temperatura de sinterização. São obtidos pela mistura de SrO ou carbonatos (ferrita de estrôncio), ou BaO (ferrita de bário), com Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A mistura é calcinada em temperatura acima de 1.095 °C para formar os compostos complexos. Posteriormente é realizada a moagem a úmido para partículas finas em torno de alguns µm, resultando na matéria-prima para obtenção do ímã. A ferrita de bário isotrópica possui, aproximadamente, os seguintes parâmetros: temperatura de Curie 450 °C, coercitividade 1,8 kOe, retentividade 2,2 kG, produto (BH)<sub>max</sub> 1 MG.Oe, densidade 4800 kg/m<sup>3</sup> e resistividade elétrica da ordem  $10^{12} \mu\Omega$ .cm.<sup>14</sup> Os parâmetros aproximados da anisotrópica são: temperatura de Curie 450 °C. coercitividade 2,2 kG, retentividade 3,8 kG, produto (BH)max 3,4 MG.Oe, densidade 5000 kg/m<sup>3</sup> e resistividade elétrica da ordem de  $10^{12} \mu\Omega$ .cm. A ferrita de estrôncio anisotrópica possui, aproximadamente, os seguintes parâmetros: temperatura de Curie 460 °C, coercitividade 3,15 kOe, retentividade 3,55 kG, produto (BH)<sub>max</sub> 3 MG.Oe, densidade 4800 kg/m<sup>3</sup> e resistividade elétrica da ordem de  $10^{12} \mu\Omega.cm$ . (CULLITY, 1967; FIEPKER, 1967).

**Neodímio-Ferro-Boro:** Introduzido em 1983, o neodímio-ferro-boro é o ímã que apresenta o maior produto energético. Uma das formas de obtenção deste material é através dos processos da metalurgia do pó. A preparação do pó ocorre

por "mechanical alloying", que é um processo realizado em moinhos de bolas de alta energia, onde os pós elementares ou pré-ligados são submetidos a uma série de impactos, sendo prensados, soldados e fraturados repetidas vezes até que a microestrutura (tamanho de partícula de grão) entre em equilíbrio. O tamanho de partículas adequado é importante porque as partículas grosseiras comprometem o alinhamento e partículas muito finas são sensíveis à oxidação. O NdFeB sinterizado possui aproximadamente os seguintes parâmetros: temperatura de Curie 310 °C, coercitividade 10,6 kOe, retentividade 10,16 kG, produto (BH)<sub>max</sub> 32 MG.Oe, densidade 7500 kg/m<sup>3</sup> e resistividade elétrica 30  $\mu\Omega$ .cm. (FIEPKER, 1967).

# 2.2 APLICAÇÃO DA M/P EM NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

Materiais sinterizados obtidos a partir de ligas de material magnético macio, com ferro e outros elementos como por exemplo Ni, Si, P e Co podem ser utilizados na construção de núcleos magnéticos de componentes de corrente alternada, bem como dos núcleos de estatores e rotores de máquinas elétricas rotativas em *blocos únicos*, e deverá conferir aos mesmos melhores características de desempenho. (ITOH; TAKEDA; KUROISHI, 1985; FRAYMAN; RYAN, D.; RYAN, J., 1998; ANISIMOVA; OLEINKOV; SERDYUK, 1991; PERSSON et al., 1995; JACK et al., 1997).

Materiais magnéticos macios para aplicações em corrente alternada (**ca**) são os materiais da família do Fe, como as ligas ferro-silício e ferro-níquel, comumente utilizada na produção de componentes elétricos. Devido à natureza isotrópica das peças magnéticas macias por M/P, fatores no projeto, como empilhamento de chapas laminadas, não são apropriados para a redução das perdas totais. O sucesso da aplicação depende da forma e das dimensões das peças e das propriedades dos materiais. Hoje a produção de peças com ligas ferro-silício e ferro-níquel por M/P é um processo industrial no qual as propriedades magnéticas são ajustadas por parâmetros do processo bem definidos como a pressão de compactação, tempo de sinterização e temperatura de sinterização. Contudo, os processos da M/P permitem o uso de elementos, ligas e sistemas além da esfera dos tradicionais materiais magnéticos macios. Um exemplo comum de material magnético macio é a liga ferro-fósforo onde, com a adição de 0,8% de fósforo resulta

em peças isotrópicas as quais, independente do ajuste da forma ou tamanho, é equivalente ao pacote de chapas laminadas de 0,65 mm. A adição de fósforo melhora não somente as propriedades magnéticas macias do ferro, mas também as propriedades das ligas ferro-silício. A extensão da faixa de materiais disponíveis por M/P inclui também ferro-silício-fósforo e ferro-fósforo-estanho, aumentando a flexibilidade de escolha das combinações das propriedades magnéticas e elétricas e custo de produção total (JANSSON, 1992).

Novos materiais magnéticos macios têm sido desenvolvidos para aplicações em motores ca (corrente alternada) e cc (corrente contínua). Os componentes do motor são construídos a partir dos processos da metalurgia do pó, em contraste ao método tradicional do empacotamento de chapas laminadas. Estes novos materiais oferecem muitas vantagens na manufatura. Também devido as suas baixas perdas por correntes parasitas, eles possuem boas propriedades magnéticas em altas frequências, onde núcleos com 90 W/kg têm sido medidos em 400 Hz com uma indução de 1,5 T. Componentes fabricados com estes novos materiais magnéticos tem demonstrado performance comparável em 60 Hz e performance superior para frequências maiores que 60 Hz quando comparados com o pacote de chapas de aço laminadas dos motores (KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997; PERSSON et al., 1995; JACK et al., 1997; JANSSON, 1992).

Todos os dispositivos eletromagnéticos que operam nas frequências de (50 ou 60 Hz) utilizam chapas de aço laminadas, as quais, para muitos dispositivos (motores, pequenos transformadores) é estampado (cortado), temperado e empilhados para a construção formando o núcleo magnético dos referidos dispositivos. Este processo de fabricação gera custos elevados, além de uma quantidade excessiva de sobras, em torno de 40%, no momento em que estes são estampados (KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997).

O mercado para motores com ímãs permanentes com velocidade variável está aumentando. Nestes motores o núcleo do rotor é construído com chapas de aço laminadas e os ímãs são fixados neste núcleo. Frequências tão altas quanto 800 Hz estão sendo utilizadas. Com o aumento destas frequências, as perdas nos núcleos de aço aumentam significativamente. Essas perdas elevadas nos núcleos não somente reduzem a eficiência dos motores como também limitam a sua faixa de operação (KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997).

Outra vantagem da M/P referente a componentes sinterizados está relacionada com a dependência da frequência das perdas do núcleo. É possível construir um componente magnético que apresente uma dependência quase linear de perda no núcleo com a frequência de magnetização, ao invés da dependência quase quadrática de perda do núcleo com a frequência, como é típico na maioria dos aços laminados. Uma vez que motores com ímãs permanente de velocidade variável operam a frequências até 800 Hz, é possível obter-se uma melhor eficiência nestes dispositivos (KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997).

Os novos materiais magnéticos sinterizados têm boas propriedades magnéticas, especialmente em frequências altas. Mesmo nas frequências padrão de 50 ou 60 Hz, as perdas são comparáveis ao pacote de chapas de aço laminadas a frio, Figura 7 (KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997).

Em 1,5 T (15 kG) e níveis de indução mais baixo, a perda no núcleo do material sinterizado é ligeiramente mais elevada que a perda no núcleo de aço de CRML. Ainda, a níveis de indução mais altos, maior que 1,6 T muitos motores operam, as perdas do núcleo são comparáveis. Níveis de indução maior do que 1,8 T, onde alguns motores também operam, o material sinterizado apresenta as perdas no núcleo menor. A Figura 8 mostra a perda total no núcleo do material sinterizado a 60 Hz, separadas em perdas por histerese e correntes parasitas. (A perda está composta de todas as perdas, a saber, a perda clássica por corrente induzida e as perdas anômalas, excluída a perda por histerese). As perdas por correntes parasitas são uma parte muito pequena das perdas totais, menor do que 10% até 1,8 T. (KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997).

Figura 7: Comparação, em 60 Hz, da perda em núcleos de materiais sinterizados e de chapas laminadas de aço com fósforo, orientadas, de 0,63 mm e o aço M-19 de 0,61 mm



Fonte: Krauze, Bularzik e Kokal (1997)



Figura 8: Perda total nos núcleos, em 60 Hz, de material sinterizado, separado em perdas por histerese e corrente induzidas

Fonte: Krauze, Bularzik e Kokal (1997)

As perdas relativamente pequenas por correntes induzidas mantêm as perdas totais baixas para frequências mais altas. A Figura 9 mostra uma comparação das perdas totais do núcleo, medida a 1,5 T, do material sinterizado para um CRML aço fósforo orientado e um aço-silício M-19 não orientado. Em ambas as comparações, a perda por histerese do material sinterizado é maior, mas as perdas por corrente parasita são menores. Em baixas frequências o material sinterizado tem as perdas do núcleos mais elevados. Em aproximadamente 60 Hz, as perdas do material sinterizado são comparáveis ao ferro-fósforo orientado CRML, sendo muito menores em frequências mais altas. O aço M-19 tem as perdas mais baixas do núcleo em frequências menores. Ainda ao redor dos 400 Hz, a perda no núcleo para o material sinterizado é comparável àquela do aço M-19. O material sinterizado possui as mais baixas perdas a frequências maiores que 400 Hz. (KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997).

Figura 9: Comparação das perdas totais do material sinterizado, medidas com uma indução de 1,5 T, com chapas de aço laminadas com fósforo, orientadas, de 0,64 mm e o aço silício M-19 de 0,61mm



Fonte: Krauze, Bularzik e Kokal (1997)

A perda total (reduzida) do núcleo, com material sinterizado é devido as correntes induzidas mais baixas. A Figura 10 mostra o percentual de perdas de correntes induzidas para cada um dos materiais a 60 e 400 Hz, respectivamente. Em ambas as frequências, o percentual de perdas totais do núcleo devido a perdas por correntes induzidas é menor para o material sinterizado. As baixas perdas por correntes induzidas para este novo material magnético o tornou um bom material para motores elétricos. Na maioria das aplicações, o nível de indução é maior que 1,5T e a forma da onda de tensão elétrica não é senoidal e tem um conteúdo harmônico elevado. As harmônicas mais altas resultam em perdas por corrente induzidas maiores (KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997).

Figura 10: Percentual das perdas, por correntes induzidas da perda total em núcleos de materiais sinterizados, de chapas de aço laminadas com fósforo, orientadas, de 0,64 mm e do aço silício M-19 de 0,61 mm



Fonte: Krauze, Bularzik e Kokal (1997)

O Quadro 8 compara as propriedades magnéticas do motor de núcleo sinterizado com aqueles de um motor de núcleo laminado padrão (0,64 mm M-19). O torque em ambos os casos de teste foi mantido constante. O núcleo sinterizado obteve performance melhor que o núcleo convencional, apresentando um consumo menor de corrente, girando a uma velocidade maior, e apresentando um aumento menor de temperatura. Basicamente, a eficiência do núcleo sinterizado foi 10% maior. O material sinterizado utilizado nestes núcleos de motores não foi divulgado. O autor cita que um posterior desenvolvimento do material resultou em mais de 10% de diminuição em sua perda no núcleo. Conclui-se que são esperados resultados até melhores com novos materiais. Foram produzidos motores universais com o material sinterizado que apresentaram desempenho semelhante e ligeiramente melhor que os núcleos de aços CRML convencionais (KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997).
Tipo Núcleo	Torque [N.m]	Corrente [A]	Velocidade [Rad/s]	Rendimento [%]	Temperatura [°C]
Padrão	0,066	7,1	1649	64,5	49,4
Compactado	0,066	6,6	1768	74,5	27,8

Quadro 8: Performance de núcleos padrões e núcleos compactados

Fonte: Krauze, Bularzik e Kokal (1997)

A partir de processos alternativos da metalurgia do pó convencional, é possível melhorar as propriedades físicas de interesse dos materiais utilizados na construção de núcleos de motores (PERSSON et al., 1995; JACK et al., 1997). Como exemplo, cita-se a mistura adequada de pó de ligas de ferro com polímeros.

Os núcleos magnéticos também podem ser construídos a partir de compósitos baseados em pó de ferro aglomerado com uma matriz orgânica. Usualmente, sua composição química varia dentro de uma faixa de 97 a 99,5% de pó de ferro, e os restantes são aglomerantes orgânicos, tais como termofixos ou termoplásticos. Os compósitos são obtidos pelos processos da Metalurgia do Pó e são utilizados como substitutos de núcleos magnéticos clássicos de chapas de aço laminadas ou pó de ferro sinterizado, como ferro-silício e ferro-níquel. O uso dos compósitos de pó de ferro-aglomerado em núcleos de rotores e estatores de máquinas elétricas cc e ca e núcleos de transformadores oferece certas vantagens como formas variadas, dimensões precisas, perdas reduzidas, alta produtividade e custo vantajoso.

A matéria-prima, na forma de pó, é misturada com estearato de zinco em um percentual entre 0,5 a 1%, compactada a seco em uma pressão de 200 a 800 MPa e polimerizada em condições ambientais ou atmosfera controlada, em temperaturas de 120 a 170 °C em tempos que variam de 15 a 60 minutos. Os valores mínimos das principais características obtidas por estes materiais são densidade de 6,0 kg/m<sup>3</sup>, indução de saturação 0,6 T, retentividade 0,1 T, força coercitiva 3 A/m e permeabilidade magnética 100 ((ENESCU et al. 2014).

Assim, pode-se destacar que algumas pesquisas estão sendo realizadas com objetivo de substituir o tradicional pacote de chapas laminadas por blocos maciços sinterizados. Salienta-se também que para baixas frequências (60 Hz), as perdas ainda são maiores nos materiais sinterizados, contudo para frequência maiores que 400 Hz, os materiais sinterizados apresentam um desempenho melhor que as chapas laminadas.

# 2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DE INTERESSE

#### 2.3.1 Introdução

As propriedades físicas para uso de um determinado material e processo em núcleos de máquinas elétricas rotativas estão relacionadas a seguir:

- propriedades magnéticas;
- resistividade elétrica;
- propriedades mecânicas dureza e ductilidade.

No presente trabalho, as propriedades físicas de interesse são: as magnéticas, em que há interesse no comportamento da magnetização do material; as elétricas, principalmente a resistividade elétrica; e as mecânicas, de forma a conhecer se a peça suportará as solicitações mecânicas durante o funcionamento da máquina.

# 2.3.2 Propriedades magnéticas dos materiais aplicados em máquinas elétricas rotativas

As propriedades magnéticas são obtidas a partir da curva de histerese, que relaciona campo magnético H aplicado a um material magnético, com a indução magnética B resultante. Para os materiais magnéticos duros ou ímãs permanentes, a curva característica BxH tem as características mostradas na Figura 11. Os materiais magnéticos macios, como os aços magnéticos, possuem um ciclo de histerese com baixa coercitividade. A Figura 11 mostra gráficos comparativos.



Figura 11: Ciclo de histerese - (a) para um material magnético duro; (b) comparação entre

Fonte: Kraus e Carver (1978)

A permeabilidade magnética do material ferromagnético corresponde à tangente da curva BxH, ou seja, está relacionada com a declividade da curva de histerese. Para o seu valor é considerado o trecho de maior declividade, sendo expressa pela seguinte relação (KRAUS; CARVER, 1978).

$$\mu = \frac{B}{H}$$
(1)

Uma curva típica de um material magnético é mostrada pela curva sólida da Figura 12. Para fins de comparação, a Figura 12 mostra quatro linhas tracejadas, correspondendo às permeabilidades relativas constantes  $\mu_r$  de 1, 10, 100 e 1000. A Figura 12 mostra, também, um gráfico de permeabilidade relativa como função do campo **H** aplicado. Na Figura 12b, a permeabilidade relativa máxima está no ponto da curva de magnetização onde a característica BxH é máxima, designada por  $\mu_{max}$ , (KRAUS; CARVER, 1978).



Figura 12: (a) Curva de magnetização típica; (b) relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado H

Fonte: Kraus e Carver (1978)

# 2.3.3 Resistividade elétrica

A resistividade de materiais (corpos de prova) pode ser determinada a partir do cálculo da resistência elétrica. Para medição de materiais com resistência elétrica muito baixa ou materiais cujo comportamento resistivo é desconhecido, utiliza-se um artifício: aplica-se uma corrente elétrica e mede-se a tensão. Portanto, o corpo de prova para determinação da resistividade deve ter a forma de uma barra fina e comprida. A lei de Ohm estabelece que (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2009).

$$R = \frac{V}{I} \Longrightarrow \rho = R \frac{A}{l} = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{l}$$
(2)

Sendo:

R: resistência elétrica ( $\Omega$ );

V: tensão elétrica aplicada (V);

I: corrente elétrica aplicada (A);

- $\rho$  resistividade elétrica ( $\Omega$ .m);
- A: área da seção transversal da barra (m<sup>2</sup>);
- *l*: comprimento da barra (m).

A Figura 13 mostra o desenho esquemático do dispositivo para determinação da resistividade. Uma fonte de tensão contínua **V** fornece uma corrente contínua **I**, e um voltímetro de precisão indica a tensão sobre a barra. Observa-se neste desenho a existência de contatos de cobre e garras, tornando possível a aplicação de uma pressão sobre os contatos de cobre, diminuindo a resistência de contato.

Figura 13: Desenho esquemático do dispositivo para determinação da resistividade de materiais



Fonte: Mesquita (2013)

Com relação à resistividade elétrica, esta deve possuir o maior valor possível para minimizar o efeito das correntes parasitas. Sempre que há a incidência de um fluxo alternado sobre um núcleo magnético, haverá também correntes induzidas (correntes parasitas ou de Foucault) sobre este núcleo. Tanto o estator como o rotor são construídos com chapas laminadas e isoladas, uma vez que esta isolação entre chapas restringe as correntes induzidas a uma menor área de circulação. As perdas por correntes parasitas em um núcleo maciço são consideravelmente maiores que as perdas em núcleos obtidos a partir de chapas isoladas eletricamente. Quanto menores as espessuras das chapas, menores são as correntes induzidas também pode ser obtida a partir do aumento da resistência elétrica do corpo, ou a partir do aumento da resistividade elétrica do material, uma vez que resistência ou resistividade e corrente elétrica são grandezas físicas inversamente proporcionais. Por este motivo, motores elétricos de alto rendimento são construídos com chapas

de aço silício, que possui resistividade elétrica maior que o aço baixo carbono (NASAR, 1987; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 1990).

#### 2.3.4 Propriedades Mecânicas

Com relação às propriedades mecânicas, materiais possíveis de serem utilizados em núcleos de máquinas elétricas devem suportar os esforços causados pelo torque resistivo da carga e vibrações, entre outros. Assim, devem ser realizados ensaios de dureza ou ductilidade, curva de compressão *versus* deformação ou curva de escoamento e avaliação de microestrutura.

Em resumo, o material utilizado na construção dos núcleos do estator e do rotor deve apresentar as seguintes propriedades:

- Elevada Permeabilidade Magnética Relativa;
- Baixa Coercitividade Magnética;
- Elevada Resistividade Elétrica;
- Elevada Indução de Saturação;
- Dureza ou Ductilidade compatíveis com as vibrações as quais a máquina é submetida.

# 2.4 MÁQUINAS SÍNCRONAS TRIFÁSICAS

#### 2.4.1 Introdução

As máquinas elétricas rotativas com alimentação trifásica, assim como a maioria das máquinas elétricas rotativas, podem funcionar como *motor* ou *gerador*. Como motor, converte uma potência elétrica, a partir de uma fonte, em uma potência mecânica, que aciona uma carga acoplada ao eixo. Como gerador, processa-se o contrário (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984). Por este motivo, os motores elétricos podem ser denominados de máquinas elétricas rotativas ou simplesmente de máquinas elétricas.

As máquinas rotativas trifásicas podem ser síncronas e assíncronas. Nos motores síncronos, a velocidade angular do eixo é constante e independe da carga acoplada ao mesmo, isto até determinados valores de potência, tendo como limite

de uso a potência nominal da máquina. Nos motores assíncronos, há uma queda da velocidade angular quando é acoplada carga ao eixo (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984).

Com relação ao aspecto construtivo, as máquinas trifásicas são constituídas fundamentalmente de duas partes (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984):

- Estator: Parte fixa da máquina construída de chapas de aço laminadas nas quais são colocados os *enrolamentos de armadura* com alimentação trifásica, defasadas de 120°. Os enrolamentos são dispostos espacialmente de tal forma que as correntes de todas as fases contribuem positivamente na geração de uma onda de fluxo magnético girante ou campo girante.
- Rotor: Parte girante da máquina também construída de chapas de aço laminadas na qual são colocados os *enrolamentos de campo*.

O estator e o rotor são construídos de chapas de aço laminadas, isoladas eletricamente e justapostas no sentido longitudinal da máquina. Com isto diminuem consideravelmente as perdas por correntes parasitas, aumentando o rendimento da máquina (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984).

# 2.4.2 Máquinas elétricas trifásicas

A diferença fundamental entre as diversas máquinas trifásicas está na concepção do rotor. A seguir estão relacionadas as principais máquinas trifásicas, e suas peculiaridades de maior interesse:

 Máquina síncrona convencional com alimentação de campo externa: Os enrolamentos de campo são alimentados com corrente contínua levada até eles através de anéis deslizantes e escovas. O inconveniente neste tipo de máquina é que esta necessita de uma fonte de tensão externa contínua ajustável. Com relação à forma dso rotores, estes podem ser polos lisos ou salientes, como mostra a Figura 14 (NASAR, 1984; GRAY, 1989).



Figura 14: Máquina síncrona convencional - (a) rotor polos lisos - (b) rotor polos salientes

Fonte: Nasar (1984)

- Máquina síncrona convencional com excitatriz interna: Os enrolamentos de campo são alimentados com corrente contínua a partir de um gerador interno, também conhecido por excitatriz, acoplado diretamente ao eixo da máquina. Neste tipo de máquina, não há escovas, reduzindo então as manutenções. O rotor pode ser de polos lisos ou polos salientes (NASAR, 1984; GRAY, 1989).
- Máquina síncrona com ímã permanente: Não há enrolamentos de campo, que são substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético. Não possui 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 embutidos no mesmo (NASAR, 1987; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 1990; GRAY, 1989). Alguns possuem uma configuração híbrida.
- Máquina de indução com rotor tipo gaiola: Não há enrolamentos de campo, contudo há barras de alumínio colocadas de forma longitudinal nas ranhuras da superfície do rotor e curto-circuitadas através de anéis nas extremidades do rotor (Figura 15). As correntes nas barras são *induzidas* pelo campo girante, sendo também esta a causa do nome da máquina. Não há um acesso externo a estas correntes nas barras. A velocidade de rotação varia levemente com a carga acoplada ao eixo, derivando desta característica a sua classificação como máquina assíncrona (FITZGERALD, KINGSLEY, UMANS, 1990; NASAR, 1984).

Máquina de indução com rotor bobinado: Há enrolamentos de campo, e as correntes nestes enrolamentos também são induzidas pelo campo girante. Entretanto, esta máquina possui conexões externas para os enrolamentos de campo (Figura 15). Por este motivo, podem-se colocar em série com estes enrolamentos resistências elétricas (reostatos), que alteram a impedância destes enrolamentos, alterando também o conjugado eletromagnético desenvolvido pela máquina. Assim, pode-se variar a velocidade desta máquina, variando-se as resistências do reostato (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 1990; NASAR, 1984).



Figura 15: Máquina de indução - (a) rotor tipo gaiola - (b) rotor bobinado



• Máquina síncrona de relutância: Neste tipo de máquina, não há enrolamentos de campo. O rotor é construído com saliências (polos salientes) que, devido ao efeito da mínima relutância, giram em sincronismo com o campo girante do estator. Esta máquina não possui, enrolamentos de campo ou ímãs permanentes, escovas ou fonte de tensão contínua, reduzindo com isto manutenções. Como desvantagem, possui menor relação torque/volume, se comparada às outras máquinas trifásicas (KOSOW, 1986).

Uma observação importante quanto aos motores síncronos é que estes não possuem torque de partida e uma das alternativas deve ser realizada (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; GRAY, 1989):

 Construção de uma gaiola envolvendo o rotor, ou seja, a colocação de barras no sentido longitudinal da máquina, curto-circuitadas nas extremidades por anéis. Nesta configuração, na partida, correntes elevadas são induzidas nestas barras em função da baixa impedância, aumentando consideravelmente o fluxo magnético, fazendo com que o motor parta. Quando o rotor da máquina está girando em regime permanente, à velocidade síncrona com o campo girante, nenhuma tensão é induzida nestas barras e elas simplesmente não agem;

- Dispositivo de partida externa, ou seja, outro motor acoplado ao eixo, fornece o torque suficiente para a partida do motor síncrono;
- Utilizando um conversor com frequência ajustável, tem-se então um campo girante com velocidade angular variável. Nesta circunstância, inicialmente regula-se o conversor para geração de um campo girante com uma frequência baixa, de tal forma que o rotor comece a girar. A seguir, aumentase a frequência do campo girante até a velocidade síncrona.

## 2.4.3 Estator das Máquinas trifásicas

A Figura 16 mostra o estator de uma máquina trifásica com 2 polos, com 4 ranhuras por polo por fase, e dois condutores por ranhura. A Figura 16 mostra também, a força magnetomotriz (**fmm**) constituída por uma série de degraus. Sua componente espacial fundamental é mostrada pela senóide (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973).



Figura 16: (a) Máquina c.a. com estator trifásico e (b) força magnetomotriz

Fonte: Fitzgerald, Kingsley e Kusko (1973)

Por sua vez a Figura 17 mostra o estator de uma máquina trifásica com 2 polos, 3 fases e uma espira por fase, alimentadas por corrente alternada trifásica defasadas de 120°, indicadas pelas equações a seguir.

$$i_a(t) = I_{max} \cos(wt) \tag{3}$$

$$i_b(t) = I_{max} \cos(wt - 120^\circ)$$
 (4)

$$i_{c}(t) = I_{max} \cos(wt - 240^{\circ})$$
 (5)

Nas quais  $I_{max}$  é a amplitude da onda de corrente, **w** a velocidade angular da onda [rad/s] e **t** o tempo [s] (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973).

Figura 17: (a) Enrolamento de estator trifásico, 2 polos, simplificado e (b) correntes trifásicas instantâneas



Fonte: Fitzgerald, Kingsley e Kusko (1973)

As correntes por fase indicadas são responsáveis pelo surgimento de 3 fmm 3 representadas em 3 tempos instantâneos diferentes na Figura 18 e indicadas pelas equações a seguir:

$$\mathfrak{I}_{a}(t) = \mathfrak{I}_{a(max.)}\cos(wt) \tag{6}$$

$$\mathfrak{I}_{b}(t) = \mathfrak{I}_{b(max.)}\cos(wt - 120^{\circ}) \tag{7}$$

$$\mathfrak{I}_{c}(t) = \mathfrak{I}_{c(max_{o})} \cos(wt - 240^{\circ}) \tag{8}$$

A amplitude da onda  $\mathfrak{T}_{max}$  é dada por

$$\mathfrak{T}_{max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_s}{p} I_{max} \tag{9}$$

 $K_w$  é o fator de enrolamento,  $N_s$  é o número de espiras por fase e **p** o número de polos (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973).

Pode-se observar da Figura 18 que, em função da distribuição espacial das três fases na periferia do estator, todas as fmm contribuem positivamente para uma fmm resultante.

$$\mathfrak{I}(\theta, t) = \mathfrak{I}_a + \mathfrak{I}_b + \mathfrak{I}_c = \frac{3}{2}\mathfrak{I}_{max}\cos(\theta - wt)$$
(10)

onde a fmm resultante apresenta uma amplitude constante 50% maior que a amplitude da fmm de qualquer das fases constituintes (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973).

Figura 18: Representação do campo girante como resultante da fmm das 3 fases em 3 instantes diferentes (a), (b) e (c)



Fonte: Fitzgerald, Kingsley e Kusko (1973)

Esta fmm nada mais é do que uma *onda de fluxo magnético que gira* no interior do estator também conhecida como *campo girante*. A velocidade do campo girante, também conhecida como *velocidade síncrona*, é calculada como:

$$n_s = \frac{120f}{p} \tag{11}$$

**n**<sub>s</sub> é a velocidade síncrona dada em [rpm] e **f** é a frequência das correntes de alimentação [Hz] (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973).

#### 2.4.4 Rendimento das máquinas elétricas

As perdas nas máquinas elétricas podem ser avaliadas a partir dos princípios da conversão eletromecânica de energia, a energia elétrica é transformada em energia mecânica. As potências envolvidas em uma máquina elétrica relacionam-se como (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984):

$$\mathbf{P}_{i} = \mathbf{P}_{o} + \mathbf{P}_{R} + \mathbf{P}_{mag} + \mathbf{P}_{M} + \mathbf{P}_{d}$$
(12)

todos os fatores representados na Eq. 12 são potências dadas em [Watt], e representam (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984):

- $P_i \implies$  potência elétrica de entrada, fornecida pela fonte de tensão elétrica;
- P₀ ⇒ potência mecânica de saída, fornecida à carga acoplada ao eixo do motor;
- P<sub>Ra</sub> ⇒ potência dissipada nos enrolamentos de armadura, que representam as perdas nos enrolamentos do estator da máquina (perdas elétricas);
- P<sub>mag</sub> ⇒ potência representando as perdas magnéticas por ciclo de histerese e correntes de Foucault (perdas magnéticas);
- P<sub>M</sub> ⇒ potência representando as perdas mecânicas para ventilação da máquina e atrito entre o eixo e os mancais (perdas mecânicas);
- $P_d \Rightarrow$  potência representando outras perdas diversas.

Uma perda não relacionada encontra-se nos enrolamentos de campo (rotor) que se enquadra nas perdas elétricas. Uma vez que as perdas nos enrolamentos de armadura (estator) são consideravelmente maiores que as perdas nos enrolamentos de campo (rotor), em muitas análises elétricas, as perdas elétricas do rotor são desprezadas. Entretanto, as máquinas elétricas síncronas com ímãs permanentesnão possuem enrolamentos de campo, o que minimiza as perdas elétricas no rotor que, mesmo sendo pequenas, contribuem para o aumento do rendimento da máquina.

O desempenho de uma máquina pode ser medido a partir de seu rendimento  $\eta$ , (Equação 13), que considera as perdas na máquina relacionando a potência de

entrada (Pi) e a potência de saída (Po) (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984):

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \tag{13}$$

#### 2.4.5 Máquinas síncronas com imãs permanentes

Motores **ca** (corrente alternada) com ímã permanentes são máquinas elétricas síncronas polifásicas com ímã permanentes no rotor, muito semelhantes às máquinas síncronas convencionais, os enrolamentos de campos são substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético. A Figura 19 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 das máquinas síncronas convencionais, simplesmente considerando que a máquina é excitada por uma corrente de campo de valor constante, fazendo-se as devidas correções (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 1990).

# Figura 19: Diagrama esquemático de uma máquina trifásica com ímã permanente. As setas indicam a direção da magnetização do rotor



A Figura 20 mostra uma vista em corte de um motor síncrono trifásico típico com ímã permanente. Esta configuração de motor possui um sensor de velocidade e de posição montado no eixo do rotor. Várias técnicas podem ser usadas para sensoriar a posição do eixo, incluindo dispositivos de efeito Hall, LEDs e fototransistores (encoder óptico), e variação de indutância (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 1990).

Figura 20: Vista em corte de um motor síncrono trifásico com ímã permanente com o sensor de velocidade e posição para controle do motor



Fonte: Fitzgerald, Kingsley e Kusko (1973)

A partir de informações do sensor de posição do eixo, os enrolamentos por fase do motor são sequencialmente excitados de tal modo a produzir o torque e velocidade desejados. A velocidade do motor é determinada pela frequência da rede de alimentação. A posição angular entre o eixo magnético do rotor e uma determinada fase determina o torque desenvolvido pelo motor (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 1990).

Em função da capacidade para medição de velocidade e posição do rotor a partir de sensores, bem como a possibilidade de aplicação de frequência e amplitude de excitação de corrente variável, a partir dos conversores, os motores síncronos trifásicos com ímã permanente, conforme ilustrado na Figura 20, são controláveis. Como resultado, estes motores são atualmente encontrados em muitas aplicações que anteriormente eram quase que exclusivamente do domínio de motores **cc** (corrente contínua). Motores síncronos trifásicos com ímã permanente são frequentemente chamados de motores *brushless* (sem escovas) ou motores cc sem escovas (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 1990).

O uso de imãs 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 imãs 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 dos super ímãs em novas configurações resultou em 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 diminui sensivelmente os riscos de desmagnetização dos ímãs, uma vez que este ímãs possuem elevada coercitividade (campo desmagnetizante), além de desenvolvimento de máquinas com uma possibilitar o elevada relação torque/volume. Os imãs permanentes são disponíveis em uma larga faixa de características magnéticas e permitem uma considerável gama de possibilidades na escolha do imã mais adequado (NASAR, 1987).

A 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 elas não têm nenhuma perda de excitação de campo, uma vez que não possuem enrolamentos no rotor, exceção feita às máquinas que, além dos ímãs, possuem uma gaiola (NASAR, 1987).

Os imãs ocupam menos espaço que campos com enrolamentos e para tamanhos de armadura pequenos esta vantagem é significativa. O custo reduzido, particularmente quando imãs cerâmicos (ferritas) são usados, tende a fazer estes motores com custo bastante competitivo (NASAR, 1987).

Alguns projetos apresentam geometrias relativamente precárias que desperdiçam o material de imã, que no caso de imãs de terra raros é caro. O uso de imãs de entreferro em máquinas síncronas é um exemplo disto; a densidade da forma do *gap* é inevitavelmente menor que no imã, grosseiramente na razão do arco do polo para a inclinação do polo. Esta limitação é bastante desnecessária para muitas aplicações (NASAR, 1987).

#### 2.5 MÁQUINAS SÍNCRONAS EM AEROGERADORES

Os aerogeradores de pequeno porte disponíveis apresentavam muitos defeitos, tais como desempenho aquém do esperado, problemas de resistência e vibração, pás e torres quebradas ou sujeitas a rupturas Com o intuito de melhorar a qualidade, a International Electrotechnical Commission – IEF definiu a norma **IEC-NORM 61400-2:2006** – *Design Requirement for Small Turbines* para geradores de pequeno porte.

Conforme norma anteriormente citada, geradores de pequeno porte são definidos como os que têm rotores com até 200m<sup>2</sup>. Considerando uma média de 350W/m<sup>2</sup>, isto significa uma potência máxima de 70kW. Nesse caso, a torre não pode ser mais alta que 20m. (IEC-NORM 61400-2:2006).

Os aerogeradores com rotores de eixo horizontal são os mais comuns e grande parte da experiência mundial está voltada para a sua utilização. São movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação e forças de arrasto. Um corpo que obstrui o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento, chamadas de forças de sustentação e de forças que atuam na direção do escoamento, forças de arrasto. Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. As forças de sustentação também dependem da geometria do corpo e do ângulo formado entre a velocidade relativa do vento e o eixo do corpo, conhecido por ângulo de ataque (VOGT, 2010). Os rotores que giram predominantemente pelo efeito de forças de sustentação permitem liberar muito mais potência do que aqueles que giram por efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade de vento.

Os rotores de eixo horizontal (Figura 21) ao longo do vento são predominantemente movidos por forças de sustentação e devem possuir mecanismos capazes de permitir que o disco varrido pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Tais rotores podem ser constituídos de uma pá e contrapeso, duas pás, três pás ou múltiplas pás. Construtivamente, as pás podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais. Em geral, utilizam-se pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada.

Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice e normalmente compostos de três pás ou em alguns casos uma ou duas pás onde exista a disponibilidade de ventos com velocidades médias muito altas e também exista a possibilidade de geração de ruído acústico mais elevado sem que tal seja um incômodo. A Figura 21 mostra um aerogerador de pequeno porte e as partes que o constituem (WEGLEY et al., 1980).

1 – Cubo: O conjunto de pás é fixado ao cubo formando o rotor e a principal função deste é a transmissão da energia mecânica de rotação, obtida através da força dos ventos que incidem nas pás ao eixo do rotor.



Figura 21: Partes funcionais de uma turbina eólica

2 – Nacele: Também conhecida como carenagem, possui base rotativa, em torno de um eixo horizontal instalada no topo da torre para permitir o ajuste da direção do rotor conforme direção do vento. A nacele também serve como base para a instalação do rotor com cubo e pás, o ajuste angular das pás, o leme, a engrenagem e transmissão mecânica, os circuitos eletrônicos e o gerador. Dependendo do projeto, o aerogerador de pequeno porte pode não apresentar alguns destes componentes.

3 – Pás: O conjunto das pás forma o rotor. Devido à necessidade de redução de peso, na maioria das vezes, as pás são confeccionadas em compósitos de fibra de vidro com epóxi ou poliéster (WEGLEY et al., 1980), podendo também ser de alumínio. As pás dos aerogeradores têm perfis aerodinâmicos variados de forma a aumentar a sua eficiência na retirada da energia em determinada faixa de velocidade do vento. Elas podem ser constituídas de um único ou uma combinação de vários perfis [3].

Fonte: Wegley (1980)

4 – Torre: Serve de suporte para todo o conjunto do aerogerador. Além de sustentar o conjunto aerodinâmico, tem a função de elevar o mecanismo para uma altura, para aproveitar as correntes mais favoráveis dos ventos em que a velocidade do vento é maior e fica menos perturbada pelos efeitos do atrito viscoso e turbulência que ocorrem junto ao solo. A altura da torre é limitada pela relação entre o seu custo e pelo acréscimo da energia obtido com a elevação do rotor. As torres normalmente são construídas em aço e podem ser tubulares ou treliçadas. A técnica de estaiamento reduz o material utilizado na construção da torre, porém exige uma maior área disponível para a instalação do aerogerador e os critérios para a escolha entre as torres tubulares ou treliçadas, geralmente, ficam limitados ao custo ou ao impacto visual. A opção pelas torres de concreto está direcionada para os grandes aerogeradores e é definida por seu menor custo e a possibilidade de construção no local da instalação. A altura é fundamental para os projetos eólicos, pois a velocidade do vento aumenta com a altura. Pequenos acréscimos podem representar um grande aumento da potência extraída. Torres altas geralmente são necessárias para evitarem-se os efeitos de obstáculos em torno do equipamento.

5 – Leme: O leme tem a função de manter o plano do rotor sempre perpendicular à direção do vento de modo a maximizar o aproveitamento desta energia. A maioria dos pequenos aerogeradores utiliza apenas o leme para essa função.

Uma máquina síncrona pode ser utilizada perfeitamente como gerador eólico, tendo em vista que pode funcionar como motor ou gerador. Os principais elementos envolvidos no projeto e fabricação de turbinas eólicas são: o gerador eólico, ou a máquina síncrona objeto deste estudo, conversor CA/CC e os inversores de tensão.

O equacionamento de uma turbina eólica depende da relação entre a potência gerada e a velocidade do vento. A potência gerada por sua vez depende do coeficiente de desempenho da turbina (Cp), da velocidade na ponta da pá e do ângulo de inclinação na ponta da pá (X SEPOPE, 2006).

A máquina síncrona utilizada como gerador poderá operar em frequências diferentes da rede CA uma vez que os conversores CA/CC realizarão o acoplamento da mesma.

A Figura 22 demonstra alguns tipos básicos de conexões de máquinas síncronas em aerogeradores e a Figura 23 é um exemplo real de um aerogeradores instalados no parque eólico na cidade de Osório/RS.



Figura 22: Esquema de ligação básico do Gerador Síncrono

Fonte: X SEPOPE (2006)

Figura 23: Aerogerador do parque eólico de Osório/RS



Fonte: elaborado pelo autor

No projeto convencional de uma turbina eólica, a caixa de transmissão mecânica é inserida entre o rotor e o gerador para adaptar a baixa velocidade do rotor à necessidade de velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais (SPERA, 1994).

A velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa de 20 a 150 rpm, devido às restrições de velocidade na ponta da pá, conhecido por *tip speed*. Entretanto, geradores trabalham em rotações muito mais elevadas, em geral, entre 1.200 a 1.800 rpm, tornando necessária a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos.

Mais recentemente, alguns fabricantes desenvolveram com sucesso aerogeradores sem a caixa multiplicadora e abandonaram a forma tradicional de construí-los. Assim, ao invés de utilizar a caixa de engrenagens com alta relação de transmissão, necessária para alcançar a elevada rotação dos geradores, utilizam-se geradores multipolos de baixa velocidade e grandes dimensões.

# **3 PARTE EXPERIMENTAL**

## 3.1 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram obtidos no LdTM / UFRGS (Laboratorio de Transformação Mecânica da UFRGS) e no LMPMM / Feevale (Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos da Oficina Tecnológica da Feevale).

A definição da liga a ser utilizada nos estudos dos núcleos do rotor da máquina foi realizada a partir do estudo das propriedades físicas de algumas ligas sinterizadas como Fe puro,FeP, FeSi e FeNi, e suas variações. Para análise das propriedades magnéticas e resistividade elétrica, utilizou-se a matriz da Figura 24, para a qual foram obtidos corpos de prova na forma de anéis.

#### Figura 24: Amostras na forma de anel – (a) Matriz – (b) Corpo de Prova Prova



Fonte: Arquivos (a) LMPMM/FEEVALE, (b) LdTM / UFRGS

Para análise da dureza e tensão de escoamento das ligas estudadas, utilizouse a matriz da Figura 25, obtendo-se corpos de prova na forma de cilindros. Para análise das perdas em frequência, foram utilizadas as matrizes mostradas na Figura 26, tendo sido obtidos corpos de prova na forma de núcleos de transformadores.

#### Figura 25: Amostras na forma de cilindro – (a) Matriz – (b) Corpo de Prova



(a) (b) Fonte: Arquivos (a) LMPMM/FEEVALE, (b) LdTM / UFRGS

# Figura 26: Amostras na forma de núcleo de transformador – (a) Matriz Núcleo E– (b) Matriz Núcleo T – (c) Corpos de Prova



Fonte: Arquivos (a) LMPMM/FEEVALE, (b) LdTM / UFRGS

Os pós de ferro misturados a fósforo, silício e níquel foram adquiridos junto à Höganas Brasil Ltda. Conforme certificado do fabricante, o pó de ferro utilizado foi o ASC100.29, com 99,4% da granulometria entre 45 µm e 150 µm. O pó Fe3P (84% de Fe, 16% de P) apresentou 90% de sua dimensão abaixo de 14,58 µm. Por sua vez, a análise granulométrica do pó FeSi 45 (55% de Fe e 45% de Si) indicou 87% de seu conteúdo entre 45 µm e 250 µm e o pó de níquel apresentou granulometria mínima de 3 µm e máxima de 7 µm. O pó de ferro foi misturado com fósforo (1, 2, 3%), silício (1, 3, 5%) e níquel (50%) em um misturador duplo cone, com rotação de 60 rpm durante 20 minutos, para homogeneização dos constituintes. Também foi adicionado às misturas 1% de lubrificante sólido à base de estearato de zinco.

No que tange à pressão de compactação, os corpos de prova foram submetidos a uma pressão média de 600 MPa, seguindo-se orientação de dados da literatura. Nas compactações realizadas, utilizou-se a técnica de duplo efeito (BRADBURY, 1986; GERMAN, 1984).

As forças aplicadas na compactação dos corpos de prova estão relacionadas no Quadro 9.

Forma	Área [m²]	Força [N]
Cilindro	0,000142	83581,2
Anel	0,000581	341976,6
Transformador T	0,000458	269578,8
Transformador E	0,000847	498544,2

Quadro 9: Força aplicada na compactação dos corpos de prova

Fonte: Arquivos LMPMM / Feevale

A sinterização dos corpos de prova foi realizada em forno tubular tipo mufla, com atmosfera controlada (pressão atmosférica) e gás verde (5% de hidrogênio e o

restante de nitrogênio). Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto, até a temperatura de 500 °C, permanecendo as peças nesta temperatura durante 30 minutos para retirada do lubrificante sólido (estearato de zinco). A seguir, a temperatura foi elevada para 1.150 °C, ocorrendo a sinterização, com um novo patamar isotérmico nesta temperatura por 60 minutos, patamares segundo dados bibliográficos (BRADBURY, 1986; GERMAN, 1984). Após, as peças permaneceram no forno para resfriamento lento até a temperatura ambiente. A Figura 27 mostra a curva de sinterização.



Figura 27: Curva de sinterização

Fonte: Arquivos LdTM / UFRGS

# 3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS

As propriedades magnéticas foram obtidas a partir das curvas magnéticas (laço de histerese e curva de magnetização) que relacionam campo magnético **H** aplicado a um material com a indução magnética **B** resultante. A partir do laço de histerese, foram obtidas a retentividade (magnetismo remanente) e a coercitividade (campo desmagnetizante). Através da análise da curva de magnetização, obtiveram-se a permeabilidade magnética e a indução de saturação ou indução máxima (que também pode ser visualizada a partir do laço de histerese) (JILES, 1991). A determinação das propriedades magnéticas básicas dos materiais na forma de anel (toróide) segue a norma ASTM A773 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND

MATERIALS, 2009). As curvas magnéticas foram obtidas a partir de um dispositivo traçador de curva de magnetização modelo *TLMP-TCH-14*.

Para aplicação deste método de análise, é necessária a preparação de amostras, que consiste na bobinagem (enrolamento de fios de cobre) de espiras primárias e secundárias no anel, conhecidas como Anel de Rowland. O procedimento consiste em isolar o anel com filme plástico para evitar descascamento do fio esmaltado, realizar os enrolamentos de espiras secundárias, e novo isolamento como mostra a Figura 28, seguido do enrolamento das espiras primárias.

# Figura 28: Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento do primário



A resistividade do material (corpos de prova) das ligas foi determinada a partir do cálculo da resistência elétrica. Para medição desta, utiliza-se um dispositivo denominado de multímetro ou multiteste, que mede diretamente a resistência elétrica do corpo. Entretanto, para medição de resistência elétrica muito baixa, aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. Portanto, o corpo de prova para determinação da resistividade deve ter a forma de uma barra fina e comprida. Um artifício é a utilização de um anel, cortando-se um segmento do mesmo, fazendo que este tenha a forma de uma barra curvada, ou seja, de grande comprimento e pequena área de seção transversal.A Figura 29 mostra um segmento de um anel com fios de cobre ou terminais soldados para medida da resistividade elétrica.



Figura 29: Anel segmentado com terminais para medida da resistividade elétrica

Fonte: Arquivos Laboratório de Eletrônica / Feevale

Para avaliação da resistência à vibração de um material a ser utilizado em uma máquina elétrica rotativa, realizaram-se ensaios mecânicos nos corpos de prova. Os ensaios de dureza (Brinel – HB) foram realizados em um durômetro *Precision-England* com carga de 1875 N, segundo a norma ASTM E10. (ASTM E10) os ensaios de compressão utilizou-se de uma máquina de ensaios universal EMIC DL20000, com velocidades de 2,0 mm/min, de acordo com a norma ASTM E9 (MEEKER, 2010).

# 3.3 PERDAS MAGNÉTICAS

As perdas magnéticas nos materiais estudados foram determinadas a partir de corpos de prova na forma de núcleos E e T idênticos a núcleos de transformadores de tensão elétrica convencionais de mesmas dimensões e mesmos enrolamentos. Assim, as perdas magnéticas foram determinadas de forma similar a perdas em um transformador convencional com núcleo de chapas laminadas. (NASAR, 1987; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 1990).

Os núcleos nas geometrias E e T foram submetidos a processos de retificação, de tal maneira a ficarem com as mesmas dimensões de um núcleo de um transformador elétrico convencional. A seguir, os núcleos foram bobinados na forma típica de transformadores de tensão elétrica, com bobinas do enrolamento primário e secundário. A Figura 30 mostra os transformadores montados, obtidos a partir da M/P (Figura 30a) e a partir de chapas convencionais (Figura 30b).

# Figura 30: Transformadores – (a) Núcleos por M/P (esquerda) de Chapas (direita) – (b) Bobinados e montados por M/P (direita) de Chapas (esquerda)



Fonte: Arquivos LdTM / UFRGS.

Salienta-se que este estudo baseou-se em um transformador comercial convencional, de baixa tensão e potência. Para o estudo comparativo, optou-se pela construção de núcleos dos transformadores com geometria e dimensões as mais próximas possíveis do convencional. Assim, os enrolamentos utilizados nos transformadores desenvolvidos foram os mesmos enrolamentos do transformador convencional, tendo sido este desmontado e retirado o carretel onde se encontravam as bobinas. Este procedimento foi utilizado para que fosse possível uma análise comparativa do transformador convencional e os desenvolvidos.

O enrolamento no lado de alta tensão foi dimensionado para operar com tensão de 127 V<sub>RMS</sub>, enquanto que o de baixa tensão, apenas 12 V<sub>RMS</sub> de tensão, considerando-se o núcleo de chapas convencionais. Os ensaios foram realizados, utilizando-se uma fonte de tensão elétrica alternada com variação de amplitude e frequência. Foi empregada uma faixa de frequência de 50 Hz a 1 000 Hz. Os enrolamentos do lado de baixa tensão foram alimentados com uma tensão próxima dos 6 V<sub>RMS</sub> (metade da tensão nominal do enrolamento), mantendo-se o enrolamento do lado de alta tensão em aberto, mas variando-se a amplitude do lado de baixa tensão até o lado de alta tensão atingir 75 V<sub>RMS</sub>. Desta forma, garantiu-se que a tensão induzida no secundário (lado de alta tensão) permaneceu constante para os núcleos estudados. Após, mediu-se a potência fornecida pela fonte e descontou-se as perdas no enrolamento. A potência resultante está relacionada diretamente com as perdas nos núcleos por correntes parasitas e ciclo de histerese. Devido à analogia intrínseca entre o funcionamento de máquinas elétricas rotativas e transformadores, os mesmos ensaios podem ser estendidos a núcleos de motores elétricos (NASAR, 1987; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 1990).

# 3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os ensaios mecânicos também foram realizados nos corpos de prova para avaliação da resistência à vibração do material utilizado, tendo em vista que a sua utilização será em uma máquina elétrica rotativa. Os ensaios de dureza (Brinel – HB) foram realizados em um durômetro *Precision-England* com indentador de esferas de 2,5 mm e carga de 187,5 kgf, segundo a norma (ASTM E10).

# 3.5 **PROJETO DA MÁQUINA**

## 3.5.1 Especificação da máquina

A máquina síncrona com ímãs permanentes desenvolvida neste trabalho foi projetada a partir de um motor de indução trifásico de alto rendimento com quatro polos e 10 CV (Figura 31), produzido por Voges Motores de Caxias do Sul. Assim, o núcleo do estator, eixo, carcaça, tampas e rolamentos foram deste motor de indução, contudo o núcleo do rotor foi reconstruído a partir de material sinterizado e ímãs permanentes. Os dados da máquina e chapas do estator encontram-se na Figura 32.



Figura 31: Motor de indução trifásico de 10CV – (a) Vista lateral – (b) parcialmente desmontado

Fonte: Arquivos LdTM/UFRGS e LMMPM/ Fevale adaptados da Voges Motores



Figura 32: Esquema das chapas do estator da máquina

Carcaça de motor para 10CV 220v 60Hz Número de polos: 4 Diâmetro externo do disco: 210 mm Diâmetro interno do disco: 138 mm Número de ranhuras: 48 Diâmetro Interno : 138 mm Pacote de chapas: 148 mm Número de chapas: 320

Fonte: Arquivos LdTM/UFRGS e LMMPM/ Fevale adaptados da Voges Motores

O motor da Figura 31 originalmente possui um bobinamento em série, sendo 12 espiras por ranhura do estator com fio 12AWG, e 192 condutores em série por fase. A corrente nominal utilizada é de 14,2A, para uma tensão de 380 V ligação Y. A Figura 33 demostra as ligações do bobinamento da máquina desenvolvida;



Figura 33: Esquema do bobinamento da máquina desenvolvida

Fonte: Arquivos LdTM/UFRGS e LMMPM/ Fevale adaptados da Voges Motores

#### 3.5.2 Projeto do rotor

O rotor proposto neste projeto tem sua origem em uma adaptação de uma máquina elétrica comercial da Voges motores, conforme descritivo do item 3.5.1, motivo pelo qual algumas medidas e informações não puderam ser divulgadas neste trabalho. O Núcleo do rotor foi projetado a partir de ferro puro sinterizado e imãs de NdFeB, mantendo-se todas as outras partes da máquina, como carcaça, eixo e

tampas. Utilizando esta composição na reconstrução da máquina, é possível transformar um motor de indução em uma máquina elétrica síncrona trifásica ou mais precisamente um gerador trifásico de alto rendimento. A Figura 34 mostra o esboço do projeto do núcleo do rotor e a vista em perspectiva.



Figura 34: Projeto do rotor - (a) Desenho dimensional - (b) vista em perspectiva

Fonte: elaborado pelo autor

Os ímãs definidos para utilização na construção do novo rotor foram adquiridos no mercado dentro de características já existentes, conforme as dimensões da Figura 34a, pois as especificações desenvolvidas para este projeto foram inviáveis de serem produzidos em função da quantidade a ser adquirida. Não foi encontrado no mercado um fabricante para as peças de imãs originalmente imaginadas para este projeto.

A empresa Supergaus foi à fornecedora dos imãs que possui um alto poder energético e é produzido a partir da combinação de Neodímio, Ferro e Boro Nd2Fe14B. Possuem um enorme fluxo magnético, mas são mecanicamente frágeis e perdem seu magnetismo de modo irreversível em temperaturas acima de 120°C. São fornecidos com valores magnéticos entre N35 a N52, dependendo da sua aplicação, e em formatos diversos. São bastante utilizados em motores elétricos.

As peças de Nd-Fe-B foram dimensionadas em blocos retangulares de dimensões 50,8x50,8x12,7 mm com orientação magnética radial, conforme projeto da Figura 34.

A Figura 35 ilustra as peças de ímãs adquiridas para montagem do projeto.

Figura 35: Ímã de Nd-Fe-B



Fonte: elaborado pelo autor

#### 3.6 MONTAGEM DA MÁQUINA

#### 3.6.1 Introdução

Nesta etapa, inicia-se a remontagem da máquina proposta utilizada como padrão, aproveitando a carcaça original da mesma, mas inserindo o novo rotor construído conforme o projeto descrito no item 3.5.2.

#### 3.6.2 Obtenção dos Núcleos do Rotor

A solução mais viável para a construção do rotor foi compactar e sinterizar tarugos maciços, conforme se pode observar na Figura 36. Esta mostra também os ímãs de Nd-Fe-B utilizados. Contudo, salienta-se que tal matriz foi desenvolvida por uma empresa contratada e especializada em processos metalúrgicos voltados para a metalurgia do pó, portanto todo o processo de produção dos tarugos foi realizado nesta empresa, tanto a compactação como a sinterização da peça.

Figura 36: Peças a serem utilizadas na construção do rotor da máquina - (a) Tarugo compactado e sinterizado – (b) Ímãs de Nd-Fe-B



Fonte: elaborado pelo autor

#### 3.6.3 Usinagem dos Núcleos

Foram compactados e sinterizados quatro blocos cilíndricos conforme mostra a Figura 36, usinados e inseridos no eixo da máquina, conforme se pode observar na Figura 37. Posteriormente, através de eletroerosão a fio, foram feitas as cavidades no núcleo do rotor da máquina para colocação dos ímãs de Nd-Fe-B (Figura 38a), bem como tiras de latão para prender os ímãs no interior das cavidades (Figura 38b).



Figura 37: Blocos usinados e inseridos no eixo da máquina

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 38: Usinagem (eletroerosão a fio) e confecção das cavidades dos ímãs – (a) Detalhe da cavidade – (b) tira de latão para prender os ímãs



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 39 mostra o rotor montado com as tiras de latão fixas, contudo, mais dois discos de aço inoxidável foram inseridos nas extremidades do núcleo do rotor, uma vez que as elevadas forças de atração e repulsão dos ímãs poderiam fazê-los soltarem-se do interior do núcleo, o que seria algo até mesmo perigoso.

Figura 39: Rotor montado – (a) Detalhe da fixação das tiras de latão – (b) Detalhe de fixação dos discos de aço inoxidável nas extremidades



Fonte: elaborado pelo autor

### 3.6.4 Montagem Final

A Figura 40 mostra a carcaça, estator e o eixo da máquina a ser montada, já na bancada de ensaios também pode ser visualizado o outro motor que irá funcionar como máquina primária, e também ao lado as mesmas máquinas e a bancada com o rotor remontado à frente.

Figura 40: Detalhes da máquina na bancada – (a) Sem o rotor – (b) Com o rotor a sua frente



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 41 mostra o detalhe dos parafusos sendo colocados e a máquina sendo fechada com o rotor em seu interior, e o acoplamento entre as duas máquinas, ou seja, a máquina desenvolvida neste projeto e o motor de indução para acionamento da mesma como máquina primária. Como a carcaça das máquinas é a mesma, externamente as duas possuem um visual idêntico, contudo o interior difere completamente, tendo vista que os rotores possuem forma construtiva e topologia diferenciadas.

A Figura 42 mostra as duas máquinas já posicionadas na bancada para os testes de desempenho da máquina desenvolvida neste projeto.

Figura 41:(a) Máquina sendo fechada com a colocação dos parafusos – (b) Acoplamento das duas máquinas



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 42: Máquinas acopladas na bancada para ensaios



Fonte: elaborado pelo autor

#### 3.7 BANCADA DE ENSAIOS

Para os ensaios da máquina como gerador, possível de ser utilizado em um aerogerador de 5 kW, foi desenvolvida uma bancada (Figura 45a), composta inicialmente pelos seguintes dispositivos:

- Motor de Indução funcionando como máquina primária no lugar da turbina eólica;
- Inversor para acionamento do motor de indução;

- Gerador ou a máquina síncrona trifásica desenvolvida neste projeto (máquina secundária);
- Voltímetros, amperímetros e wattímetros para leitura de tensão, torrente e potência, tanto da máquina primária, quanto da máquina secundária;
- Lâmpadas e resistências elétricas funcionando como cargas para o gerador.

Na Figura 43 é demostrado o detalhamento da carcaça da máquina de indução original e também o acoplamento entre a máquina elétrica e o gerador a ser testado.

# Figura 43: (a) Máquina sendo fechada com a colocação dos parafusos – (b) Acoplamento das duas máquinas



Fonte: elaborado pelo autor

Também foi colocado na bancada um segundo inversor idêntico ao primeiro, de tal maneira a regular e estabilizar a tensão gerada na saída do gerador. Quando em operação, também são colocadas na bancada multímetros portáteis e osciloscópio para visualização de formas de ondas de tensão geradas, conforme o esquema elétrico da figura 44.


Figura 44: Esquema Elétrico da Bancada de Ensaios concebida inicialmente

Fonte: elaborado pelo autor

Conforme pode ser visualizado na Figura 45a e Figura 45b, o descritivo dos equipamentos instalados na bancada de teste são:

- Inversor WEG CFW 08 de para 10 CV (acionamento do motor de indução ou máquina primária)
- Voltímetro, amperímetro e wattímetro (medições da máquina primária)
- Voltímetros, amperímetro e lâmpadas na saída do gerador (para medições e carga de sinalização)
- Resistências elétricas (carga para o Gerador)
- Segundo inversor WEG (artifício estudado para regulação da tensão de saída do gerador para variações de amplitude e frequência)

Figura 45: Bancada de Testes do Gerador Trifásico ou Máquina desenvolvida neste projeto – (a) Vista geral com as máquinas – (b) Detalhe da vista lateral



(b)

Fonte: elaborado pelo autor

A partir da bancada mostrada na Figura 45, é possível medir as potências, direta ou indiretamente, na entrada e saída das máquinas, possibilitando assim a avaliação do desempenho e rendimento da máquina desenvolvida neste projeto.

### 4 RESULTADOS E DISCUSÃO

### 4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS OBTIDAS DAS LIGAS SINTERIZADAS

Com relação aos corpos de prova de ferro puro sinterizado, foram obtidas propriedades magnéticas a partir das curvas BxH (histerese – Figura 46a e magnetização – Figura 46b), resistividade elétrica e propriedades mecânicas.

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 (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 1990; NASAR, 1987; KOSOW, 1986). A Tabela 1 mostra os resultados da densidade, resistividade elétrica, das propriedades magnéticas e mecânicas observadas na forma de anel e cilindro, a partir dos valores médios de três corpos de prova para cada material estudado:



Figura 46: Curvas magnéticas do ferro sinterizado – (a) Histerese – (b) Magnetização

Fonte: Arquivos LdTM/UFRGS e LMMPM adaptado pelo autor

Material	ρ <sub>m</sub> [g/cm³]	ρ <sub>e</sub> [μΩ.m]	B <sub>r</sub> [T]	H <sub>c</sub> [A/m]	B <sub>max</sub> [T]	μ <sub>r</sub>	HB	σ <sub>e</sub> [kgf/mm²]
Ferro Puro	6,632	0,157	0,90	448,2	1,19	1.852,6	52,1	13,99

 Tabela 1: Propriedades físicas do ferro sinterizado

Fonte: Arquivos LdTM/UFRGS e LMMPM adaptado pelo autor

Na qual  $\rho_m$  é a densidade,  $\rho_e$  a resistividade elétrica,  $B_r$  a retentididade,  $H_c$  a coercitividade,  $B_{max}$  a indução de saturação (observada para campo de 6 kA/m),  $\mu_r$  a permeabilidade magnética relativa, HB a dureza na escala Brinell,  $\sigma_e$  a tensão de escoamento.

Os valores obtidos na tabela diferem um pouco das referências bibliográficas (JANSSON, 1992). Tal fato ocorreu devido às muitas variantes nos processos da M/P, na qual fatores como tamanho e forma de partícula, pressão de compactação, patamares de sinterização e atmosfera influenciam na densidade desejada (BRADBURY, 1986; GERMAN, 1984). Ademais, algumas referências não indicam as pressões de compactação utilizadas para materiais magnéticos macios por M/P, sendo que em alguns estudos utilizam-se pressões de até 800 MPa para materiais compósitos por M/P(ENESCU et al. 2014), e tal pressão tende a aumentar a densidade do material.

O Ferro sinterizado apresentou tensão de escoamento de 139,0 MPa (13,99 kgf/mm<sup>2</sup>). O aço 1008 utilizado na maioria de núcleos de máquinas elétricas rotativas (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 1990; NASAR, 1987) possui tensão de escoamento média de 170 MPa. O Aço AISI 1008 possui dureza de 86 HB (FLETCHER, 1995). A dureza do Ferro sinterizado foi de 52,5 HB. Assim, com relação às propriedades mecânicas, o Ferro sinterizado apresenta parâmetros aceitáveis para sua utilização na construção de núcleos da maioria das máquinas elétricas rotativas (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 1990; NASAR, 1987).

### 4.2 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

Foram realizadas simulações com núcleo do rotor e estator com chapas laminadas e com núcleo do estator de chapas e rotor com ferro puro sinterizado. Os resultados das iterações eletromagnéticas foram obtidos através de simulações em *software* 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 (MEEKER, 2010). A ideia principal é dividir o problema em um grande número de regiões, cada um com uma geometria simples (e.g. triângulo).

Com a finalidade de tornar a resolução das análises matemáticas mais fáceis utiliza-se o processo de dividir a área inicial em pequenos elementos a partir de uma área conhecida, este processo denomina-se de discretização, onde é gerado um problema de álgebra linear com milhares de variáveis. O processamento destas informações e a execução destes cálculos só são possíveis com o auxílio de processadores potentes e utilizando-se de algoritmos capazes de resolver o problema em pouco tempo. A Figura 47 mostra um diagrama esquemático sobre a Metodologia FEMM.

O software de simulação de materiais magnéticos FEMM 4.2 é uma ferramenta que discretiza o domínio de entrada em pequenos triângulos. Em cada elemento, a solução é aproximada através de uma interpolação dos valores de cada vértice do triângulo. O FEMM 4.2 é um conjunto de programas para resolver problemas de baixa frequência eletromagnética em planos bidimensionais com simetria axial. O *software* é dividido em três partes (MEEKER, 2010):

- Interactive Shell: Múltipla interface com pré e pós-processamento para os vários tipos de problema. Contém uma interface CAD (Computer Aided Designed) para definição das propriedades do material e as condições de limite.
- Triangle.exe: Modifica a região a ser solucionada em um número grande de triângulos, operação fundamental para a aplicação da metodologia de elementos finitos.
- Solvers: Algorítimo para solução de problemas magnéticos e eletrostáticos.
   Cada solver utiliza os dados configurados que descrevem o problema para resolver as equações diferenciais de Maxwell obtendo-se os valores de campo desejado.



Figura 47: Metodologia FEM

Projetar uma máquina sem as devidas análises preliminares e simulações pode levar ao ciclo de tentativas e erros, portanto a utilização de um *software* de simulação por elementos finitos auxilia muito na determinação das propriedades magnéticas da máquina a ser projetada. Através do FEMM 4.2, é possível verificar

dados importantes tais como o torque momentâneo da máquina elétrica, o fluxo concatenado em cada bobina e as perdas por corrente de Focault. Estes resultados preliminares obtidos nas simulações embasam o projetista nas propriedades que devem ser trabalhadas para atingir o máximo desempenho possível.

A realização da simulação através do FEMM 4.2. inicia-se com a inserção de diversas informações já mencionadas, mas também é preciso lançar o desenho de um corte transversal da máquina elétrica, que pode ser realizado no *Solid Works*. Também é possível definir os materiais que compõem cada parte do motor e suas propriedades eletromagnéticas. No caso da inserção dos materiais magnéticos que compõem os núcleos, esta ocorre a partir das curvas de magnetização.

A Figura 48 mostra, à esquerda, a amplitude, em módulo, da indução de entreferro, e a direita, as linhas de fluxo magnético geradas no plano longitudinal da máquina para a configuração com ímãs inseridos no rotor e chapas de aço M15, e a Figura 49 mostra os mesmos dados para rotor com liga sinterizada Fe- puro.

Figura 48: Simulação da máquina com rotor de ímãs embutidos a partir de chapas aço M15 – (a) Densidade de fluxo de entreferro – (b) Linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 49: Simulação da máquina com rotor de ímãs embutidos a partir da liga sinterizada Fepuro – (a) Densidade de fluxo de entreferro – (b) Linhas de fluxo no plano longitudinal da



Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 2 mostra os valores máximos de densidade de fluxo de entreferro e torque desenvolvido na ponta de eixo, considerando a máquina funcionando como motor.

Tipo de Rotor	Torque [N.m] M15	Torque [N.m] Fe-puro	Densidade de Fluxo [T] M15	Densidade de Fluxo [T] Fe-puro
Ímãs Embutidos	15,68	16,91	2,17	2,72

#### Tabela 2: Comparativo entre os materiais

Fonte: elaborado pelo autor

Nas simulações realizadas estaticamente, o torque instantâneo e o fluxo magnético no núcleo de Fe-puro resultaram valores próximos em relação aos das tradicionais chapas de aço laminadas. O núcleo de Fe-puro apresentou um torque instantâneo de 16,91 N.m e fluxo magnético de 2,72 com o rotor com imãs embutidos. A equivalência entre os resultados obtidos ocorre em razão dos valores elevados de permeabilidade magnética, indução de saturação e resistividade elétrica, assim como a baixa coercitividade apresentada nos ensaios magnéticos e elétricos.

O torque na ponta do eixo, em uma máquina elétrica rotativa, está relacionado ao fluxo magnético do entreferro (indução máxima) e a inclinação das linhas de fluxo magnético no entreferro, ou ângulo de carga para o caso das máquinas elétricas síncronas rotativas, independente da sua aplicação como motor ou gerador. Uma máquina elétrica rotativa funciona transformando a energia elétrica em mecânica que será entregue à carga na ponta do eixo, quando utilizada como um motor, e comporta-se exatamente ao contrário quando utilizada como um gerador, ou seja, a força mecânica aplicada pela carga na ponta do eixo converte-se em energia elétrica nos enrolamentos de armadura. Em ambos os casos, a conversão de energia elétrica para mecânica e vice-versa ocorre a partir do campo magnético, e o fluxo magnético de entreferro (ou indução máxima) é o fator determinante. Em razão disso, através da simulação, consideram-se como melhores resultados as máquinas que operam com maior fluxo magnético de entreferro e os maiores torques finais (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2008; NASAR, 1984; KOSOW, 1986).

### 4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS

A máquina síncrona com ímãs permanentes ou mais especificamente o gerador trifásico desenvolvido neste projeto foi testado em bancada. A partir do inversor da máquina primária (motor de indução acoplada a direita da máquina), foi possível variar a velocidade angular do mesmo, fazendo com que o eixo do gerador também variasse na mesma velocidade. Assim, iniciaram-se os testes com baixas velocidades, aumentando lentamente até 60 Hz, que é a frequência padrão da rede elétrica de abastecimento, ou 1800 RPM do eixo de rotação das máquinas (4 polos), observando inicialmente as formas de onda (Figura 50-a) e a tensão gerada na saída do gerador (Figura 50-b), além dos componentes que compõe a bancada.

A seguir, foram ligadas as lâmpadas em uma ligação triângulo na saída do gerador, variando-se a velocidade de rotação do eixo, medindo tensão e corrente, tanto na entrada no motor de indução trifásico (máquina primária) quanto na saída do gerador, observando-se também as formas de onda para estas frequências. A Tabela 3 mostra os valores medidos, para frequências de 15, 30, 45 e 60 Hz da corrente, equivalente a velocidades angular de giro do rotor de 450, 900, 1350 e 1800 RPM. A Figura 51-a mostra a forma de onda gerada para uma das fases do gerador e a figura 51-b mostra as lâmpadas alimentadas a partir do gerador para uma frequência de 45 Hz de tensão e corrente (1350 RPM).



Figura 50: Ensaios do Gerador - (a) Osciloscópio - (b) Multímetro de Precisão

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 51: Ensaios em 45 Hz - (a) Forma de onda de tensão - (b) lâmpadas



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 1. Variações de Tensão e Corrente em Tunção da Frequencia do giro do el	Tabela 1: Vari	ações de Ten	são e Corrente	em função da	Frequência do	giro do eixo
--	----------------	--------------	----------------	--------------	---------------	--------------

Rotação [RPM]	Tensão Vi [V]	Corrente li [A]	Tensão Vo [V]	Corrente lo [A]
450(15 Hz)	101	0,44	80	0,03
900 (30 Hz)	197	0,72	162	0,18
1.350 (45 Hz)	294	1,02	245	0,25
1.800 (60 Hz)	390	1,41	326	0,30

Vi e li é a tensão e a corrente na entrada da máquina primária, e Vo e lo a tensão e a corrente na saída do gerador, ou seja, nas lâmpadas.

#### Fonte: Autor, 2015

Da Tabela 3 observa-se que a 1800 RPM a tensão na saída do gerador ficou em 326 V para uma ligação em estrela, e esta deveria ser de 380 V, ou seja, ficando um pouco abaixo do valor padrão. Contudo, houve pequenas diferenças na execução do projeto, comparado com as simulações, devido a problemas construtivos. Tal ajuste é relativamente simples, bastando rebobinar o estator da máquina, aumentando proporcionalmente o número de espiras por enrolamento por fase. Com relação aos picos observados na senoide mostrada no osciloscópio, isto se deve ao fato de que as chapas do estator não estão inclinadas com relação à direção dos ímãs do rotor. Tal ajuste também é relativamente simples, bastando que haja uma inclinação de uma ranhura na altura do pacote de chapas do estator. Assim, a partir destas duas correções bem simples, a máquina irá gerar uma senoide de tensão com poucos harmônicos e tensão da rede mais apropriada, ou seja, 60 Hz, 220 / 380 V.

Devido a estas distorções, não foi possível determinar com precisão a rendimento da máquina desenvolvida. Contudo, como a base nas informações do fabricante da máquina original sobre a qual a mesma foi montada, ou seja, a carcaça e o estator de um motor de indução da Voges foi possível estimar o rendimento da mesma. Assim, a partir das potências observadas na entrada da máquina primária e na saída do gerador e conhecendo-se as perdas e rendimento da máquina utilizada como base, estima-se um rendimento de aproximadamente 88% para esta máquina.

Ao medir a tensão e a corrente na entrada, máquina primária, sem carga e comparar com os dados fornecidos pela fabricante, as diferenças serão as perdas em vazio.

Toda máquina com baixa carga terá o seu rendimento muito inferior ao qual a mesma foi projetada quando em plena carga.

Utilizando os dados levantados na Tabela 3 :

Dados da máquina primária:

N = 91% Vi = 380 Vac li = 14,5 A

Calculo da potência total de uma máquina trifásica é calculada pela equação:  $PT = UL \times IL \times \sqrt{3}$  PT = potência total UL = tensão de linhaIL = corrente de linha  $\sqrt{3}$  = máquina trifásica

Potência na entrada em 60 Hz padrão (91%) =  $380 \times 14,5 \times \sqrt{3} = 9543,60W$ 

Potência medida na entrada da máquina primária =  $390 \times 1,41 \times \sqrt{3} =$  952,45*W* com as cargas disponíveis na bancada de testes (lâmpadas).

Para esta configuração de carga, a máquina primária esta trabalhando com aproximadamente 10% de rendimento.

Potência medida na saída do gerador =  $326 \times 0,30 \times \sqrt{3} = 169,4W$ , quando todo o sistema motor e gerador (máquina primária e secundária), estão conectadas a bancada de teste.

Então:

$$n = Po \div Pi = 169,45 \div 952,45 = 17\%$$
 Total do sistema

Se a máquina primária esta trabalhando com 10% de rendimento e o rendimento total do sistema foi de 17%, observa-se que o gerador esta inserindo no sistema um rendimento de 7%.

Portanto existe uma diferença de 3% de rendimento entre a máquina primária e o gerador, então extrapolando esta leitura para uma situação de plena carga no gerador, estima-se um rendimento de 88% (91%-3%).

A Figura 52 demostra esquematicamente a conexão da máquina primária com o gerador.





Salienta-se que, apesar das distorções e da menor tensão induzida, citadas anteriormente, tal máquina não possui enrolamentos no rotor, portanto não haverá perdas ôhmicas nestes enrolamentos, e também não existe escorregamento, o que

Fonte: elaborado pelo autor

limita as variações de fluxo no rotor diminuindo no mesmo as perdas magnéticas (por correntes parasitas e ciclo de histerese).

Finalmente, convém ressaltar que, com as modificações propostas tal máquina terá um rendimento estimado entre 92% a 96%, ficando dentro dos parâmetros de rendimento deste tipo de máquina. Esta estimativa foi realizada segundo informações de engenheiros projetistas de máquinas elétricas síncronas com imãs permanentes do departamento de P&D Produto, Motores da WEG equipamentos elétricos S/A.

#### 5 CONCLUSÕES

Com relação ao ferro puro sinterizado utilizado na construção do núcleo do rotor da máquina síncrona, constatou-se que o mesmo apresentou bom desempenho, e suas propriedades físicas são bastante similares ao aço baixo carbono utilizado na maioria dos núcleos das máquinas elétricas rotativas. Salienta-se que devido ao fato de não haver grande variação de fluxo no núcleo do rotor, as perdas por correntes parasitas serão mínimas, não havendo então a necessidade de se construir tal núcleo com chapas laminadas.

O rotor da máquina proposta foi construído de ferro puro sinterizado, e sendo o ferro um dos materiais com maior corrosão, salienta-se a importância de estudos futuros do impacto da ação corrosiva deste material no funcionamento da máquina proposta, bem como a utilização de rezinas impermeabilizantes que possam diminuir este efeito, principalmente quando a máquina estiver em ambientes altamente corrosivos.

Para uma análise mais eficaz do rendimento das máquinas, o adequado seria trabalhar com a carga plena para o sistema, tendo como base o projeto da máquina primária da Voges, para tanto a bancada deveria conter um banco de cargas apropriado, um sensor de torque e um tacômetro.

Com relação ao desempenho da máquina, apesar de não ter sido possível observar diretamente o rendimento da mesma, estimou-se este, através de medições indiretas, em aproximadamente 88%, o que está bem próximo das máquinas síncronas com imãs permanentes convencionais. Contudo, fazendo-se as modificações indicadas como rebobinamento do estator e inclinação das ranhuras do núcleo do estator, estima-se que tal máquina terá rendimento maior, ou seja, na faixa das máquinas síncronas trifásicas comerciais, o que valida a tese inicial que é possível a construção de um rotor maciço com imãs embutidos e sem enrolamentos, através do processo de metalurgia do pó, sendo possível selecionar os materiais (pós) através das características desejadas da peça a ser construída, obtendo assim a eficiência esperada da máquina, e ainda reforçando que o processo produtivo poderá ser menos oneroso, que os processos fabris hoje utilizados.

# REFERÊNCIAS

AÇOS ELÉTRICOS – **Grão não Orientado**. Artigo de Circulação Interna da ACESITA, 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for DC Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with DC Electronic Hysteresigraphs..West Conshohocken: ASTM, 2009.

ANISIMOVA, E. A.; OLEINIKOV, A. M.; SERDYUK, G. G. **Powder Materials with Specified Electrical and Magnetic Properties for Heavy and Two-Layer Rotors of Asynchronous Motors**. Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics (English translation of Poroshkovaya Metallurgiya), v.29, n.9, Feb 1991. p. 741-744.

BAS, J. A.; PUIG, J.; MOLINS, C. B. **Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art.** Modern Developments in Powder Metallurgy. Princeton, New Jersey. Metal Powder Industries Federation, v. 18, 1988. p. 745-756.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Electronic Devices and Circuit Theory**. New Jersey, Prentice Hall, 894p, 2009.

BRADBURY, S. *Powder Metallurgy Equipament Manual.* New Jersey, USA, MPIF, 1986. 199p.

Catálogos de Motores da Eberle Motores. 2013.

Catálogos de Motores da WEG Motores. 2013.

CHIAVERINI, V. Metalurgia do Pó. 4. ed. São Paulo: ABM, 2001. 330 p.

CULLITY, B. D. Introduction to Magnetic Materials. Adison. Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1967. 514 p.

DIAS, M. M. **Construção de uma Máquina Síncrona de Relutância Trifásica com Rotor de Material Magnético Sinterizado**. 1999. Tese (Doutorado em Programa de Pós-Graduação em Eng. Metalúrgica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999. 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. 2014.

FIEPKER, J. W. **Special-Purpose Material**. Revised by, Crucible Magnetics, a Division ou Crucible Material Corporation. 1967. p.782-803.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr. C.; KUSKO, A. **Máquinas Elétricas**. S. Paulo, McGraw Hill do Brasil, 1973. 621p.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Jr. Charles; UMANS, Stephen D. **Electric Machinery**. New York, McGraw-Hill Inc, 1990. 599p.

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.

STEPHEN D. Máquinas Elétricas. 6 ed. São Paulo: Bookman, 2008.

FRAYMAN, L. L.; RYAN, D. R.; RYAN, J. B. **Modified P/M Soft Magnetic Materials for Automotive Applications**, The International Journal of Powder Metallurgy, v. 34, n.7, 1998. p.31-39.

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

GRAY, C. B. Electric Machines and Drive Systems. Longman Scientific & Technical. New York. 1989. 446 p.

ITOH, Y.; TAKEDA, Y.; KUROISHI, N. **AC Magnetic Properties of New Fe—Si Sintered Alloy**. Modern Developments in Powder Metallurgy. v. 17. Special Materials, Toronto, Canada, 17-22 June 1984. Metal Powder Industries Federation, 105 College Rd. East, Princeton, New Jersey 08540, USA, 1985. p.641-655.

JACK, A. G., MECROW, B.C., MADDISON, C.P., WAHAB, N.A. **Claw Pole Armature Permanent Magnet Machines Exploiting Soft Iron**. IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, IEMDC,1997. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 97TH8282. p.MA1 5.1-5.3

JAMES, B. A.; WILLIANS, G. **Review of the Magnetic Properties of Sintered Iron.** Powder Metallurgy, v. 22, n. 2, 1979. p. 75-85. JANSSON, P. **Soft Magnetic Materials for AC Applications.** Hoeganes A. B. Hoeganes Swed, Powder Metallurgy, v. 35, n. 1, 1992, p. 63-66.

JILES, D. Introduction to Magnetismo and Magnetic Materials. London, Chapman and Hall, 1991. 440p.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. R. Janeiro, Editora Globo, 1986. 667p.

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

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.

KRUPP WIDIA. Permanent Magnet Material and Components. 1989.

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

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.

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.

LANDGRAF, F.J.G. & RODRIGUES D. Materiais Magnéticos Produzidos por M/P.- IPT. S.Paulo.1999.

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

LENEL, F. V. **Powder Metallurgy**: Principles and Aplications. Ed. Metal Powder Industries Federations, 1980.

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

MEEKER, D. Finite Element Method Magnetics. User's Manual, v. 4.2, 2010.

MESQUITA, R. F. Construção de um mini motor com núcleos do rotor e estator a partir da metalurgia do pó. Novo Hamburgo: Feevale, Dissertação de Mestrado, 2013. 70 p

MORO, N.; AURAS, A. P. **Metalurgia do Pó e o Futuro da Indústria.** Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Curso Técnico de Mecânica Industrial, 2007, 28 p. Disponível em: <<u>http://www.norbertocefetsc.pro.br/metalurgiadopo.pdf</u>>. Acesso em: 15 mar. 2014.

MOYER, K. H. **The Effect of Proposity on the Properties of Iron Compacts**. Riverton, N.J. Hoeganes Corporation, 1980.

NASAR, A. S. Máquinas Elétricas. São Paulo: Makron Boks do Brasil, 1984.

\_\_\_\_\_. Handbook of Electric Machines. New York, McGraw-Hill, 1987.

PERMANENT MAGNET MATERIALS. Special-Purpose Material. Revised by J.W.Fiepke, Crucible Magnetics, a Division ou Crucible Material Corporation. 1992,p.782-803.

PERSSON, M. et al. **Soft Magnetic Composite Materials - Use for Electrical Machines**. IEE Conference, Publication n.412, 1995. IEE, Stevenage, Engl. p. 242-246.

POPOV, Z. P.; RATCHEV, T. L.; YANKOV, Y. The influence of Boron Additives on the Magnetic and Electrical Properties of PM Fe-Si-Cr-P Soft Magnetic Material, Advances in Powder Metallurgy, v. 5, 1991. p. 189-193.

REBORA, G. La Construcción de Máquinas Eléctricas. Barcelona, Hoepli - Editorial Científico-Medica, 1969. 999p.

RICHARDSON, D. V. Rotating Electric Machinery and Tranformer Tecnology. Virginia-USA, Reston Publishing Company, Inc., 1982. 636p.

SPERA, David A. **Wind turbine technology:** fundamental concepts of wind turbine engineering. New York, NY: ASME, 1994. 638 p.

VLACK, L. H. V. **Princípio de Ciência dos Materiais**, S. Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1970.

VOGT, Hans H. **Análise estrutural de pás de gerador eólico de pequeno porte feitas de fibra vegetal brasileira.** 2010, 128 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2010.

WEGLEY, H. L. et al. A Siting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems, US-DOE, 1980.

X SEPOPE. X Simpósio de especialistas em planejamento da operação e expansão elétrica. Florianópolis. 21 a 25 de maio de 2006.

ANEXOS

### ANEXO A: GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS E MAGNETISMO

### 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 (CULLITY, 1967; KRAUS, 1978; JILES, 1991).

$$\oint \overline{H}d\overline{l} = \int Jds = I \qquad [A.1]$$

**H** é o campo magnético [A/m], *I* é o comprimento infinitesimal [m], **J** é a densidade de corrente [A/m<sup>2</sup>], **S** é um elemento infinitesimal de superfície [m<sup>2</sup>] e I é a corrente elétrica [A]. No sistema CGS **H** é expresso em Oersted [Oe] tal que (CULLITY, 1967; JILES, 1991).

$$0,01256 \ Oe = 1 \ A/m$$
 [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 (PERMANENT MAGNET MATERIALS,1992; CULLITY,1967; KRAUS,1978; JILES,1991; KRUPP WIDIA, 1989).

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{\mu}\boldsymbol{H} = \boldsymbol{\mu}_{o}\boldsymbol{\mu}_{r}\boldsymbol{H} = \boldsymbol{\mu}_{o}\boldsymbol{H} + \boldsymbol{J}_{s} \qquad [A.3]$$

**B** é a indução magnética [T] ou [Wb/m<sup>2</sup>],  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio [H/m],  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética relativa [adimensional],  $\mu_o$  é a permeabilidade magnética do vácuo [4 $\pi$  x 10<sup>-7</sup> H/m] e **J**<sub>s</sub> é a polarização de

magnetização [T]. No sistema CGS, **B** é expresso como Gauss [G] tal que (PERMANENT MAGNET MATERIALS, 1992; CULLITY, 1967; KRAUS, 1978; JILES, 1991; KRUPP WIDIA, 1989).

$$1 T = 10^4 G$$
 [A.4]

Para a maioria dos materiais, **B** e **H** têm mesma direção e sentido (meios isotrópicos) e  $\mu$  é um escalar. Em alguns cristais, **B** pode não ter a mesma direção de **H** (meios anisotrópicos) e  $\mu$  é um tensor (KRAUS, 1978).

**Fluxo Magnético Total (\varphi):** Para **B** uniforme e superfície plana o fluxo magnético total  $\varphi$  perpendicular a superfície pode ser escrito como (CULLITY, 1967; KRAUS, 1978; JILES, 1991).

#### $\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{B} \boldsymbol{A} \qquad [A.5]$

Na qual  $\varphi$  é o fluxo magnético total [Wb], **B** é a indução magnética [T] e **A** a área da seção, transversal às linhas de fluxo [m<sup>2</sup>]. Quando as linhas de indução magnética não são perpendicular a área **A**, a equação A.5 fica (CULLITY, 1967; KRAUS, 1978; JILES, 1991).

$$\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{B} \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{\cos} \boldsymbol{\alpha} \qquad [A.6]$$

α é o ângulo entre a perpendicular a 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 (CULLITY, 1967; KRAUS, 1978; JILES, 1991).

$$\varphi = \iint B.\cos\alpha.ds \qquad [A.7]$$

- -

### A.3. PERMEABILIDADE MAGNÉTICA RELATIVA

A permeabilidade magnética do meio é representada como (CULLITY, 1967; KRAUS, 1978; JILES, 1991).

$$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}_r \boldsymbol{\mu}_o \qquad [A.8]$$

A Tabela A.1 relaciona algumas substâncias com suas respectivas permeabilidades magnéticas relativa. 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 (KRAUS, 1978).

A partir da Tabela A.1 pode-se concluir o seguinte (CULLITY, 1967; KRAUS, 1978; JILES, 1991).

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

Outros tipos de materiais são os *antiferromagnético*, *ferrimagnético* e *superparamagnético* (KRAUS,1978).

### 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 BxH será aproximadamente linear. Se o material for ferromagnético, muitas linhas de fluxo serão induzidas (fenômeno de magnetização) e a relação BxH tem as características de uma curva como mostrada na Figura A.1. 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 àquelas mostradas pela curva da Figura A.1 são conhecidos como *materiais magnéticos*. (CULLITY, 1967; KRAUS, 1978; JILES, 1991).

		(Continua)
SUBSTÂNCIA	GRUPO	μ <sub>r</sub>
Bismuto	diamagnético	0,99983
Prata	diamagnético	0,99998
Cobre	diamagnético	0,999991
Água	diamagnético	0,999991

Tabela A.1 ·	- Permeabilidade	relativa	de alguns	materiais
--------------	------------------	----------	-----------	-----------

		(Conclusão)
SUBSTÂNCIA	GRUPO	μ <sub>r</sub>
Vácuo	não-magnético	1
Ar	paramagnético	1,0000004
Alumínio	paramagnético	1,00002
Paládio	paramagnético	1,0008
Pó de permalloy 2-81	ferromagnético	1,3 x 10 <sup>2</sup>
Cobalto	ferromagnético	2,5 x 10 <sup>2</sup>
Níquel	ferromagnético	6,0 x 10 <sup>2</sup>
Ferroxcube 3	ferromagnético	1,5 x 10 <sup>3</sup>
Aço doce	ferromagnético	2,0 x 10 <sup>3</sup>
Ferro (0,2% de impurezas)	ferromagnético	5,0 x 10 <sup>3</sup>
Permalloy 78	ferromagnético	1,0 x 10⁵
Supermalloy	ferromagnético	1,0 x 10 <sup>6</sup>
Fonte: Kraus (1978)		

Tabela A.1 - Permeabilidade relativa de alguns materiais





Fonte: Kraus (1978)

O ponto em que a curva corta 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**<sub>r</sub>. O ponto em que a curva corta o eixo de **H** no mesmo quadrante é denominado de *força coercitiva* e representa o

campo magnético necessário para desmagnetizar o material ( $\mathbf{B} = 0$ ). O campo desmagnetizante máximo é denominado de *coercitividade*  $\mathbf{H}_c$ . Outro fator importante na identificação dos materiais magnéticos é o produto energético  $\mathbf{BH}_{max}$ , cuja unidade é Mega Gauss Oersted [MG.Oe] e está associado com a densidade de energia armazenada em um determinado material magnético (CULLITY, 1967; KRAUS, 1978; JILES, 1991).

A Figura A.2 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) (CULLITY, 1967; KRAUS, 1978; JILES, 1991).

Figura A.2 - Ciclo de histerese para materiais magnéticos duro e macio



Fonte: Kraus (1978)

#### 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 num ímã resulta num campo magnético ao redor do ímã. Em um átomo com muitos elétrons presentes, somente os spins dos elétrons da camadas incompletas contribuirão para o campo magnético do átomo (KRAUS, 1978).

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 contém um grande número de átomos. Estas regiões são chamadas *domínios magnéticos* e podem ter muita variedade de formas e tamanhos desde um mícron até vários centímetros. Assim, um domínio age como um imã pequeno, mas não atomicamente pequeno (KRAUS, 1978).

A Fgura A.3-a mostra um fragmento de um material cristalino. Este fragmento divide-se em grãos, limitadas 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 expontaneamente em uma determinada direção conhecida como direção de mais fácil magnetização e esta região define um domínio. Portanto, no 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.43

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 A.3-b (KRAUS, 1978).

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, onde todos os domínios são magnetizados paralelos ao campo, como indicado na Figura A.3-c (KRAUS, 1978).



Figura A.3 - Estágios sucessivos de magnetização de uma amostra policristalina com o

Fonte: Kraus (1978)

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) (KRAUS, 1978).

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 (KRAUS, 1978).

Uma curva típica de magnetização de um material ferromagnético é mostrado pela curva sólida da Figura A.4-a. Para fins de comparação, a figura mostra quatro linhas tracejadas, correspondendo às permeabilidades relativas constantes  $\mu_r$  de 1, 10, 100 e 1000. A permeabilidade relativa em qualquer ponto da curva de magnetização é dada por (KRAUS, 1978).

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_o H} = 7,9.10^5 \frac{B}{H}$$
 [A.9]

A Figura A.4-b apresenta um gráfico da permeabilidade relativa como função do campo **H** aplicado. A permeabilidade relativa máxima está no ponto da curva de magnetização onde a relação **B** e **H** é máxima, e é designada como  $\mu_{max}$  (KRAUS, 1978).



Figura A.4 - (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* (KRAUS, 1978).

## 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 A.2, e 1 Oe é definido como (CULLITY, 1967; JILES, 1991).

$$1 \ Oe = \frac{1 \ maxwell}{cm^2} \qquad [A.10]$$

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 (CULLITY, 1967; JILES, 1991).

$$emu = m \Rightarrow \frac{[erg]}{[Oersted]}$$
 [A.11]

**m** é o momento magnético e **erg** a unidade de energia (1 erg =  $10^{-7}$  joule).

A magnetização **M** é definida como momento magnético, **m**, dividido pelo volume **v**, assim (CULLITY, 1967; JILES, 1991).

$$M = \frac{m}{v} \Rightarrow \frac{[ergs]}{[Oersted. cm^3]} = \frac{[emu]}{[cm^3]}$$
 [A.12]

Outra unidade para a magnetização é a *magnetização específica*  $\sigma$  definida como (CULLITY, 1967; JILES, 1991).

$$\sigma = \frac{m}{m_s} = \frac{m}{v\rho_m} = \frac{M}{\rho_m} \Rightarrow \frac{[emu]}{[g]} \qquad [A.13]$$

 $m_s$  é a massa [g] e  $\rho_m$  a densidade [g/cm<sup>3</sup>].

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**<sub>r</sub> em Gauss, é necessário converter a unidade de magnetização **M** para indução **B**, ou seja (CULLITY, 1967; JILES, 1991).

$$B_r = 4\pi \frac{emu}{g} \rho \qquad [A.14]$$

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. A Tabela A.2 mostra as relações de unidades para as convenções mencionadas anteriormente (JILES, 1991).

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

Tabela A.2 - Principais sistemas de unidades utilizadas em magnetismo (JILES, 1991).

Fonte: Jiles (1991)

### 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 (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 1990).

$$\Re = \frac{\Im}{\varphi} = \frac{l}{\mu A} \qquad [A.15]$$

 $\Re$  é a relutância magnética [H<sup>-1</sup>],  $\Im$  = **NI** = **fmm** a força magnetomotriz [A.esp],  $\mu$  a permeabilidade magnética do meio [H/m], *I* = comprimento [m] e **A** a área da seção transversal [m<sup>2</sup>].

#### ANEXO B: METALURGIA DO PÓ

#### B.1. INTRODUÇÃO

A metalurgia do pó M/P, é um processo de transformação de materiais produzido através da metalurgia, onde a composição ou mistura de materiais em forma de pó produzem novas peças com características diferenciadas. As composições dos materiais utilizados podem ser a mistura de um metal puro ou a mistura de pós-metálicos ou ainda de polímeros e metais. As etapas básicas da M/P são: obtenção do(s) pó(s) através da mistura, compactação, sinterização, usinagem (quando necessário). (BRADBURY, 1986).

De acordo com Chiaverini (2001), Moro e Auras (2007) a metalurgia do pó é o processo metalúrgico de fabricação de peças metálicas que possuem algumas diferenças em relação aos processos convencionais, tendo como principais características:

✓ Utilização de pós-metálicos e não metálicos como matéria-prima;

✓ Ausência da fase liquida do processo;

✓ Formas definidas e na sua maioria sem a necessidade de usinagem;

✓ Propriedades estruturais e físicas exclusivas deste processo;

✓ Produção em quantidade maior;

Sinterização é a etapa do processo que produz a característica de resistência mecânica esperada da peça.

Ainda conforme os autores as principais vantagens deste processo são: a possibilidade de produzir peças não convencionais ao processo metalúrgico normal; a aquisição de propriedades especificas dos materiais empregados, a associação de materiais metálicos e não metálicos; melhor acabamento da peça; menos sobra de material na produção.

Contudo existem algumas limitações neste processo que devem ser levadas em consideração tais como a quantidade de peças a ser produzia e as dimensões das mesmas. A figura abaixo demonstra as etapas da técnica de metalurgia do pó.



Figura 1- - Etapas da Técnica de Metalurgia do Pó

Fonte: Chiaverini (2001, p. 6)

### **B.2. OBTENÇÃO DOS PÓS**

As matérias primas utilizadas na M/P são os pós-metálicos ou as suas combinações, entender e dominar as suas propriedades e o seu processo de fabricação é de suma importância para obtenção de uma peça com as características pretendidas. A pureza e a composição química do pó são relevantes para as condições de compactação e sinterização, pois podem afetar a dureza e a solidez da peça (CHIAVERINI, 2001; MORO; AURAS, 2007).

A etapa de mistura e homogeneização aumenta o contato entre as partículas e provoca a mistura uniforme dos pós utilizados. Existem vários tipos de equipamentos e técnicas para execução desta etapa, porém o resultado dependerá do tamanho das partículas utilizadas na mistura, neste momento não há a necessidade de uma rotação acelerada do misturador e sim uma consistência nesta rotação para que a mistura efetiva fique o mais equilibrada possível tornando o material mais resistente à compactação e a sinterização. Não existe uma definição padrão para o tempo e para a rotação necessários nesta etapa, sendo ideal atingir a igualdade da densidade aparente em todas as cargas. Este tempo de mistura pode variar entre 5 a 30 minutos. (CHIAVERINI, 2001).

Em princípio admite-se três mecanismos que operam num equipamento de mistura: - transferência de grupos de partículas adjacentes de um local a outro; - este mecanismo é denominado 'mistura convectiva'; - movimento ou distribuição de partículas sobre uma superfície recém-desenvolvida (ou camada superficial); esse mecanismo é denominado 'mistura difusiva' - formação de planos de escorregamento no interior da massa de pó; esse mecanismo é denominado 'mistura de po; esse mecanismo é denominado 'mistura de 0,014 m<sup>3</sup>(tipo laboratório) até cerca de 57m<sup>3</sup>. Utilizam-se ainda tambores cilíndricos rotativos, horizontais ou inclinados (CHIAVERINI, 2001, p.47).

A inserção de agentes lubrificantes na mistura auxilia na diminuição do atrito da liga com as paredes das matrizes utilizadas na compactação, o tipo e a qualidade de lubrificante utilizado dependerão da composição dos pós utilizados, das ferramentas utilizadas no processo, da densidade e complexidade da peça. (GERMAN, 1984; CHIAVERINI, 2001).

Conforme Chiaverini (2001) os principais objetivos da etapa de compactação são:

- ✓ Conformar o pós na forma projetada;
- ✓ Conferir as dimensões finais da peça;
- ✓ Conferir a densidade;
- ✓ Conferir resistência Mecânica;
- ✓ Proporcionar contato apropriado entre as partículas do pó;

### **B.3. COMPACTAÇÃO**

A compactação é realizada na maioria das vezes aplicando-se uma pressão a matrizes onde são depositados os pós com os materiais devidamente misturados, com as dimensões e forma da peça a ser produzida.

German (1984) e Chiaverini (2001) afirmam que os pós possuem alguns comportamentos característicos quando submetidos à compressão: no primeiro

estágio as partículas são rearranjadas para eliminação dos vazios existentes entre os grãos ainda persistentes da mistura; o segundo estágio é a deformação plástica das partículas, esta deformação dependerá da ductilidade do pó e da sua porosidade; no terceiro estágio ocorre a fragmentação em "pedaços" menores que ficaram mais frágeis devido ao encruamento nos estágios anteriores.

O Quadro 1 demostra a recomendação de pressão a aplicada em alguns pós metálicos.

MATERIAL	Pressão de compactação tf/cm <sup>2</sup>	Relação de compressão
Alumínio	0,7 a 2,8	1,5 a 1,9:1
Latão	4,2 a 7,0	2,4 a 2,ó:1
Bronze	2,1 a 2,8	2,5 a 2,7:1
Escovas Cu-grafite	3,5 a 4,2	2,0 a 3,0:1
Carbonetos	1,4 a 4,2	2,0 a 3,0:1
Ferrites	1,1 a 1,7	3,0 a 1
Buchas de ferro	2,1 a 3,5	2,2 a 1
Peças de ferro:		
baixa densidade	3,5 a 4,2	2,0 a 2,4:1
média densidade	4,2 a 5,6	2,1 a 2,5:1
alta densidade	4,9 a 8,5	2,4 a 2,8:1
Núcleos de pó de ferro	1,4 a 7,0	1,5 a 3,5:1
Tungstênio	0,7 a 1,4	2,5:1
Tântalo	0,7 a 1,4	2,5:1

#### Fonte: Chiaverini (2001, p. 58)

Destaca-se que um dos sistemas mais utilizados para este processo é o sistema de compactação simples, onde basicamente as matrizes são cheias com o pós, já devidamente misturado, e é aplicada uma pressão uniforme na matriz, a figura 2 exemplifica este modelo de compactação (DIAS, 1999; CHIAVERINI, 2001).





Fonte: Chiaverini (2001, p. 61)

### **B.4. SINTERIZAÇÃO**

Segundo Chiaverini (2001) a sinterização é a operação fundamental da técnica de metalurgia do pó, porque ela constitui a fase final do ciclo de consolidação da liga utilizada, iniciado com a compactação. Esta etapa do processo consiste em aquecer a peça ou material a uma temperatura elevada, mas um pouco abaixo do ponto de fusão do material, em condições controladas de tempo, temperatura e meio ambiente. A temperatura utilizada na sinterização geralmente esta em torno de 2/3 a <sup>3</sup>/<sub>4</sub> da temperatura da liga utilizada.

É importante que o ambiente aonde será realizada esta etapa do processo esteja isolado e controlado para evitar a contaminação da liga e o aparecimento de irregularidades na peça final, o que pode acarretar em perda parcial das propriedades esperadas, por exemplo: a oxidação do material, algumas impurezas podem se ligar com os pós metálicos (CHIAVERINI, 2001; MORO; AURAS, 2007).

A figura 3 apresenta alguns materiais e os seus respectivos tempo e temperatura na fase de sinterização.

Material	Temperatura, °C	Tempo min.
Bronze	760-860	10-20
Cobre	845-900	12-45
Latão	845-900	10-45
Ferro, ferro-grafita, etc.	1010-1150	8-45
Níquel	1010-1150	30-45
Aço inoxidável	1095-1290	30-60
Imas Alnico	1205-1300	120-150
Ferrites	1205-1480	10-600
90W-6Ni-4Cu	1345-1595	10-120
Carboneto de tungstênio	1425-1480	20-30
Molibdênio	2055	120 aprox
Tungstênio	2345	480 aprox
Tântalo	2400 aprox.	480 aprox.

Figura 3 - Materiais, Tempo e Temperatura

#### Fonte: Chiaverini (2001, p. 98)

O processo prático da sinterização é relativamente simples, mas pode sofrer alterações de diversas variáveis, se não for realizado com os equipamentos apropriados em ambientes controlados, tais como: a natureza do pó, a porosidade da peça, a densidade da peça e a resistência da mesma. Nesta etapa é extremamente importante o conhecimento do ponto de fusão dos materiais utilizados, pois a temperatura de sinterização deverá sempre ser um pouco inferior ao menor ponto de fusão. Os principais fatores que influenciam no processo de sinterização são: o tamanho da partícula, a forma e a topografia da partícula, a estrutura da partícula, a composição da partícula, a densidade, a temperatura e o tempo do processo. (DIAS, 1999; CHIAVERINI, 2001).

# ANEXO C: TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA E ASPECTOS CONSTRUTIVOS DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

### C.1. INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas podem funcionar como motor ou como gerador. Como gerador convertem energia mecânica em energia elétrica e como motor, processa-se o contrário. Esta transformação de energia se realiza através do campo magnético concentrado no entreferro da máquina. Entretanto, nem toda a energia entregue a máquina é transformada, havendo alguma perda na forma de calor. Neste capítulo, estão descritas as perdas nas máquinas elétricas, além de uma descrição geral sobre as máquinas elétricas rotativas e principais partes constituintes.

### C.2. TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA E PERDAS

Numa máquina elétrica rotativa ideal, no funcionamento como gerador ou motor, a potência mecânica no eixo é calculada como (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984; KOSOW, 1986).

$$\boldsymbol{P}_{mec} = \boldsymbol{\tau}_{ext} \cdot \boldsymbol{w} \qquad [C.1]$$

onde  $\mathbf{P}_{mec}$  é a potência mecânica [W],  $\tau_{ext}$  o torque desenvolvido no eixo [N.m] e **w** a velocidade angular [rad/seg].

A potência elétrica elétrica é calculada como (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984; KOSOW, 1986).

$$P_{ele} = VI \qquad [C.2]$$

onde Pele é a potência elétrica [W], V a tensão elétrica [V] e I a corrente elétrica [A].

Para uma máquina ideal, sem perdas, o princípio da conservação de energia estabelece que a potência mecânica (**P**<sub>mec</sub>) deve ser idêntica a potência elétrica (**P**<sub>ele</sub>), assim (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984; KOSOW, 1986).

$$P_{mec} = P_{ele} \Longrightarrow \tau w = VI \qquad [C.3]$$

Entretanto, para as máquinas elétricas rotativas ideais, no funcionamento como motor, nem toda energia elétrica entregue a máquina é convertida em energia mecânica. O mesmo raciocínio análogo, pode ser feito para o funcionamento como gerador. Isto ocorre pois existem perdas nas máquinas elétricas. Estas perdas podem ser avaliadas a partir dos princípios da conversão eletromecânica de energia, onde energia elétrica é transformada em energia mecânica, como mostrado na equação C.3. No funcionamento como motor de uma máquina elétrica rotativa, a equação C.3 pode ser reescrita como (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984; KOSOW, 1986).

$$\boldsymbol{P}_i = \boldsymbol{P}_o + \boldsymbol{P}_{Ra} + \boldsymbol{P}_{mag} + \boldsymbol{P}_M + \boldsymbol{P}_d \qquad [C.4]$$

onde todos os fatores representados na equação C.4 são potências dadas em [Watts], e representam (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984; KOSOW, 1986).

- $P_i \implies$  potência elétrica de entrada, fornecida pela fonte de tensão elétrica;
- P₀ ⇒ potência mecânica de saída , fornecida à carga acoplada ao eixo do motor;
- P<sub>Ra</sub> ⇒ potência dissipada nos enrolamentos de armadura, que representam as perdas nos enrolamentos da máquina;
- P<sub>mag</sub> ⇒ potência representando as perdas magnéticas por ciclo de histerese e correntes de Foucault;
- P<sub>M</sub> ⇒ potência representando as perdas mecânicas para ventilação da máquina e atrito entre o eixo e os mancais;
- **P**<sub>d</sub>  $\Rightarrow$  potência representando outras perdas diversas.

O mesmo raciocínio análogo, pode-se fazer para o funcionamento como gerador.

O desempenho de uma máquina pode ser medido a partir de seu rendimento η, que considera as perdas na máquina relacionando a potência de entrada e a potência de saída, ou seja (FITZGERALD; KINGSLEY; KUSKO, 1973; NASAR, 1984; KOSOW, 1986):

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \qquad [C.5]$$
Um fator importante no desempenho das máquinas elétricas rotativas são as perdas magnéticas. Fatores como aumento da resistidade elétrica e diminuição da coercitividade magnética dos núcleos do estator e do rotor diminuem estas perdas aumentando o rendimento da máquina.

## C.3. CLASSIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

Com raras excessões, as máquinas elétricas rotativas podem funcionar como motor ou gerador. Entretanto, algumas são usadas preferencialmente como motor, outras como gerador, e algumas como ambas. A figura C.1 mostra uma diagrama com os principais tipos geradores de corrente contínua (**cc**) e corrente alternada (**ca**). A figura C.2 mostra um diagrama com os principais tipos de motores cc e ca.<sup>53,54</sup> O motor síncrono de relutância, abordado neste trabalho, está incluído nos motores síncronos de pólos salientes que, no caso do motor de relutância síncrono trifásico, não possui alimentação nem enrolamentos de campo (ver capítulo 2).

## C.4. PARTES BÁSICAS DE UMA MÁQUINA ELÉTRICA

As partes de um máquina elétrica rotativa, podem diferir em razão da alimentação (c.c. ou c.a.), e no caso de alimentação ca, diferem com relação ao tipo de alimentação, se esta é monofásica ou trifásica. A figura C.3 mostra o desenho explodido de uma máquina síncrona trifásica. A seguir estão relacionas as principais partes das máquinas elétricas rotativas (REBORA, 1969; RICHARDSON, 1982; Catálogos de Motores da WEG Motores, 2013; Catálogos de Motores da Eberle Motores, 2013).



TIPOS DE GERADORES:



Fonte: Catálogos de Motores da WEG Motores, 2013 e Catálogos de Motores da Eberle Motores ,2013



Figura C.2 - Classificação dos tipos de motores

Fonte: Catálogos de Motores da WEG Motores, (2013) e Catálogos de Motores da Eberle Motores (2013)



Figura C.3 - Desenho explodido de uma máquina elétrica síncrona trifásica

Fonte: Catálogos de Motores da WEG Motores, (2013)

**Carcaça:** É a parte mais externa do motor onde estão dispostos os contatos externos, servindo como proteção do operador e da máquina, protegendo as partes que se movimentam contra pó, sujeira e água. Ali também está presente a caixa de ligação, de fácil acesso e que simplifica a instalação dos cabos e dutos elétricos,

através de placas de bornes compostas de barras de latão com base de baquelite, podendo ser de cobre quando há necessidade de grande condutividade, sendo isolada da carcaça por blocos isolantes com resina de poliéster e fibra de vidro, de grande rigidez dielétrica e elevada resistência à corrosão. Também existem orifícios permitindo que a circulação do ar resfrie o motor. Alguns motores possuem carcaça constituída em ferro fundido cinzento, recebendo envelhecimento térmico e banho de prímer a base de alquídica, deixando-o com elevada resistência à corrosão. Outros possuem caraças injetadas sob pressão em liga de alumínio, deixando-os leves, compactos e de elevada resistência mecânica.

**Mancais:** Os mancais sustentam o rotor e produzem rotação de alta velocidade, com suavidade e mínimo atrito. Os mancais de alguns motores são feitos com dispositivo de lubrificação permanente que dura a vida do motor. Em outros motores, de alguma maneira é feita a lubrificação periódica dos mancais. Geralmente graxa ou pequeno reservatório de óleo são colocados na armação extrema com esse objetivo.

Estator: O estator é a parte fixa do motor, constituído por um núcleo encaixado sob pressão na parte interna da carcaça. Nos motores assíncronos o núcleo do estator é formado por chapas de aço magnético tratadas térmicamente para reduzir ao mínimo as perdas no ferro. No caso das máquinas síncronas o estator pode consistir de uma armação de ferro fundido ou aço soldado que sustenta um anel com fendas de aço mole laminado. Os estatores bobinados são duplamente impregnados com verniz isolante, sendo os enrolamentos polimerizados dando-lhe elevada resistência mecânica e rigidez dielétrica, melhor transmição de calor, proteção à abrasão e resistência a vibrações. Após a polimerização as cabeceiras de bobinas recebem aplicação de uma resina como o gliptal para proteção contra umidade, vapores de óleos, e agentes nocivos, resistência à intempéries e a ambientes salinos.

Rotor: O termo rotor é aplicados à parte do motor que gira. Nas máquinas trifásicas, o rotor, semelhantemente ao estator, é construído de chapas de aço laminadas. Em alguns motores assíncronos bobinados o rotor é constituído de chapas magnéticas de baixa perda. Nas máquinas trifásicas, alguns rotores possuem enrolamentos, outros não possuem. As vezes os enrolamentos são substituídos por barras condutoras, também conhecido por gaiola. Estas podem ser de liga leve de alumínio fundido, cobre ou latão. Após a montagem do rotor no eixo,

estes são submetidos a um processo de tratamento térmico para alívio de tensões e estabilizações. Os rotores são balanceados dinamicamente, assegurando o mínimo de vibrações e ruídos.

**Eixo:** Geralmente são de aço baixo carbono, que são tratados termicamente com objetivo de aliviar tensões internas, evitar empenamentos e aumentar a resistência à fadiga provocadas pelos esforços de torção e flexão.

**Escovas:** Parte da máquina onde ocorre a transmissão de corrente elétrica entre a parte fixa e a parte giratória da máquina elétrica, ou seja o rotor. O conjunto de porta-escovas/escovas é rigidamente fixo ao suporte e molas cuja isolação é feita a base de micanite. As escovas são de material de carbono mole contendo grande quantidade de grafite, devidamente dimensionadas para o regime de serviço especificado, de longa vida útil. Esse material também é suficientemente maleável para causar o mínimo de desgaste para o comutador, e suficientemente duro para não ser desgastado rapidamente.

Anéis coletores: São anéis fixados no eixo e, em conjunto com as escovas, são responsáveis pela transmissão de corrente elétrica para o rotor. Os anéis coletores são fabricados em bronze ou aço, conforme a necessidade e dimensionados de acordo com a corrente rotórica e a capacidade de dissipação térmica.

**Bobinamento:** Termo usado para todos os conjuntos de fios internos da máquina. São constituídos de fio de cobre nu, esmaltado com verniz termofixo, possuindo alta rigidez dielétrica e excelente resistência mecânica. São colocados nas ranhuras ou enrolados nas saliências dos pólos tanto dos estatores como dos rotores, conforme o tipo da máquina. As classes de isolação estão relacionadas também com a temperatura de operação da máquina.

**Discos (Chapas):** A quase totalidade dos núcleos dos estatores e rotores dos motores elétricos, são compostas por discos também conhecidas por pacote de chapas de aço laminadas. Estas são estampados em prensas progressivas de alta precisão, assegurando corte preciso e perfeita concentricidade. Os motores mais comuns são construídos com pacotes de chapas de aço baixo carbono, que após o empilhamento, são colocados em fornos para oxidação das superfícies das chapas, criando uma isolação elétrica entre as chapas adjacentes. Motores de maior rendimento são construídos com chapas de aço-silício.

**Ventilador:** Os motores mais robustos, de maior potência e que trabalham durante muito tempo contém ventiladores em suas carcaças para sua refrigeração e ventilação. Estes ventiladores podem ser de termo-plástico ou em alumínio, apresentando baixa inércia e produzindo grande volume de ar com baixo nível de ruído.

**Isolamento:** O alto grau de isolamento dos materias e processo de impregnação, faz com que as máquinas apresentem bom nível de proteção contra umidade, poeira e gases químicos que são levados ao interior da máquina pelo ar de refrigeração.

**Rolamentos:** Fixados no eixo e mancais, podem ser na forma de esferas ou cilíndricos, e são dimensionados de forma a assegurar longa vida ao motor nos serviços mais pesados. O sistema de lubrificação inclui um dreno que permite expurgar o excesso de graxa.