

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO COM NÚCLEO PRODUZIDO VIA METALURGIA DO PÓ.

Philippe Pauletti

Dissertação para a obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO COM NÚCLEO PRODUZIDO VIA METALURGIA DO PÓ.

PHILIPPE PAULETTI
Engenheiro Eletricista

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

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. –Ing Lírío Schaffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS-RS
Prof. Dr. Moises de Mattos Dias, ICET / FEEVALE-RS
Prof. Dr. Roderval Marcelino, UFSC-SC

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

Dedico esta dissertação à minha família.

AGRADECIMENTOS

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

Ao Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - LdTM, coordenado pelo Prof. Dr. -Ing. LÍrio Schaeffer, pelo fornecimento da estrutura e equipamentos utilizados na execução deste projeto, assim como a empresa Voges Motores pelo auxílio nos ensaios com a máquina.

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

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

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

Ao revisor deste trabalho, o M.Sc. Eng. Paulo Mariot, pelas interessantes e pontuais observações.

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

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

À minha companheira Joelma, pela paciência, companheirismo e dedicação neste desafio.

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

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
2.1. Metalurgia do Pó (M/P).....	3
2.1.1. Matéria prima – obtenção e mistura dos pós.....	4
2.1.2. Compactação	6
2.1.3. Sinterização	8
2.2. Materiais Magnéticos	8
2.2.1. Magnetização	9
2.2.2. Curva de histerese	12
2.2.3. Materiais magnéticos macios	13
2.3. Máquinas Elétricas Trifásicas.....	18
2.3.1. Máquinas assíncronas.....	19
2.3.2. Núcleos magnéticos de máquinas elétricas	23
2.3.3. Perdas em Máquinas Elétricas	24
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	26
3.1. Estudo das ligas através da obtenção de corpos de prova	27
3.1.1. Formulação.....	27
3.1.2. Compactação	28
3.1.3. Sinterização	29
3.1.4. Ensaio de densidade aparente.....	30
3.1.5. Curvas de histerese e magnetização	30
3.1.6. Resistividade elétrica	35

3.1.7. Considerações sobre o estudo das ligas	36
3.2. Projeto da Máquina Assíncrona.....	37
3.2.1. Máquina trifásica utilizada.....	37
3.2.2. Projeto dos núcleos	38
3.3. Montagem da Máquina Assíncrona.....	40
3.3.1. Confeção dos núcleos	40
3.3.2. Montagem da máquina.....	42
3.4. Ensaio da Máquina em Bancada	48
3.4.1. Resultados	49
4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	56
4.1. Estudo do Material	56
4.2. Estudo da Máquina Elétrica.....	57
5. CONCLUSÕES.....	60
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	62
REFERÊNCIAS	63
ANEXOS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação esquemática do processo de metalurgia do pó.	4
Figura 2- Obtenção de pós por atomização.	4
Figura 3 - Moinho de bolas.....	5
Figura 4 - Misturadores (a) cilíndrico, (b) rotacional cúbico, (c) cone duplo e (d) dupla concha.....	6
Figura 5 - Misturador laboratorial tipo dupla concha ou “V”.	6
Figura 6 - Estágios de um compactação de um pó numa matriz.	7
Figura 7 - Sequencia de compactação de duplo efeito.	7
Figura 8 - Curva de magnetização B-H de um material ferromagnético desmagnetizado. Configurações de domínio durante várias fases da magnetização são representados. Densidade do fluxo na saturação B_s , Magnetização M_s , e permeabilidade inicial μ_i	10
Figura 9 - Estágios sucessivos de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo.	10
Figura 10 - (a) Curva de magnetização típica, (b) relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado H.....	11
Figura 11 - Ciclo de histerese de um material magnético macio para diferentes valores de indução magnética.	12
Figura 12 - Ciclo de Histerese. Área correspondente ao material magnético: 1-macio; 2-duro.....	13
Figura 13 - Ciclo de histerese – Perdas (a) < Perdas (b).	16
Figura 14 - Máquinas Elétricas - Motores CA – Tipologias.	18
Figura 15 - Máquina Elétrica – Visão explodida.....	21
Figura 16 - Motor com rotor bobinado.....	21
Figura 17 - Motor de gaiola.....	22
Figura 18 - Curva característica para motores de gaiola.	23
Figura 19 - Fluxo de potência ilustrado para uma máquina elétrica.	25
Figura 20- Fluxograma do procedimento experimental.	26

Figura 21- Matrizes para compactação.....	28
Figura 22- Anel: $\varnothing_{ext}= 50\text{mm}$; $\varnothing_{int}= 41\text{mm}$; $h= 5\text{mm}$	28
Figura 23- Curva de Sinterização: 1250°C por 1h, taxa de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$	29
Figura 24 - Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento do primário.	31
Figura 25 - Curvas de magnetização média.....	32
Figura 26 - Permeabilidade relativa.....	32
Figura 27 - Indução máxima (saturação).....	32
Figura 28 - Curvas de histerese.	33
Figura 29 - Perdas por histerese	33
Figura 30 - Indução remanente ou retentividade (T).....	34
Figura 31 - Força coercitiva (A/m).....	34
Figura 32 - Anel seccionado com conectores para ensaio.....	35
Figura 33 - Equipamentos para ensaio de resistividade.	35
Figura 34 - Resistividade.....	36
Figura 35 - Tipologia de rotor e estator utilizado.....	38
Figura 36 - Dimensões do rotor.....	39
Figura 37 - Dimensões do estator.	39
Figura 38 - Tamanho do pacote e do rotor.	40
Figura 39 - Peças do rotor no eixo (esq.) e peça do estator (dir.).....	41
Figura 40 - Eixo utilizado no motor.	42
Figura 41 - Rotor confeccionado: Detalhe barras.....	42
Figura 42 - Rotor confeccionado: Detalhe lateral.	43
Figura 43 - Rotor confeccionado: Detalhe anel de curto-circuito.	43
Figura 44 - Carcaça de motor utilizada.	44
Figura 45 - Peças do estator inseridas na carcaça, com o auxílio de um núcleo de metal. .	44
Figura 46 - Material isolante sobre as ranhuras.....	45
Figura 47 - Bobinagem do motor: Parcial.	45
Figura 48 - Bobinagem concluída, sem fechamento de cabos.	46
Figura 49 - Bobinagem concluída, com fechamento de cabos.	46
Figura 50 - Carcaça com estator, rotor e tampas com rolamentos.	47
Figura 51 - Motor aberto com rotor inserido.....	47
Figura 52 - Forma final do motor, fechado.	48
Figura 53 - Ensaio a vazio.	50

Figura 54 - Influência do % de carga na corrente.....	51
Figura 55 - Influência do % de carga no rendimento.	51
Figura 56 - Influência do % de carga no fator de potência.....	52
Figura 57 - Influência do % de carga na rotação.	53
Figura 58 - Influência da variação do conjugado no escorregamento.	53
Figura 59 - Relação de corrente e conjugado com a evolução da velocidade.	54
Figura 60 - Curva característica do motor em teste.....	54
Figura 61 - Barras de um rotor de uma gaiola dupla de esquilo.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Categorias de motor de gaiola.....	23
Tabela 2- Densidade aparente a verde e sinterizado.....	30
Tabela 3 - Dados do fabricante - Motor convencional.....	37
Tabela 4 - Dados de serviço - Motor convencional.....	37
Tabela 5 - Dados de bobinagem.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS

CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica;
FEEVALE	Federação de Estabelecimentos de Ensino Superior em Novo Hamburgo
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica;
M/P	Metalurgia do Pó;
RS	Rio Grande do Sul;
UCS	Universidade de Caxias do Sul;
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
ULBRA	Universidade Luterana do Brasil;

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Densidade de fluxo magnético, T;
B_{\max}	Indução de saturação, T;
B_r	Retentividade ou magnetismo remanente, T;
C_n	Conjugado nominal, torque, N.m;
d	Densidade, g/cm ³ ;
f	Frequência, Hz;
h	Altura;
H_c	Coercitividade ou força coercitiva, A/m;
I_n	Corrente nominal, A;
I_p	Corrente de pico, A;
MPa	Múltiplo de unidade de pressão, Mega Pascal;
n	Velocidade em rotações por minuto, rpm;
n_s	Velocidade síncrona em rotações por minuto, rpm;
\varnothing	Diâmetro;
°C	Graus Celsius;
p	Número de polos;
R	Resistência elétrica, Ω , Ohm.
s	Escorregamento, %;
Y	Ligação de motor em estrela;
μ_r	Permeabilidade relativa;
ρ	Resistividade elétrica, $\Omega.m$;

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o estudo da aplicação de ligas ferromagnéticas obtidas por Metalurgia do Pó em um motor de indução. O núcleo desta máquina, usualmente constituído de chapas laminadas, foi substituído por blocos maciços. No estudo das ligas, empregou-se pó de ferro e ligas deste, obtidas por misturas com diferentes percentuais de fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 5%) e níquel (50%). Com as formulações pré-estabelecidas efetuou-se as mensurações mássicas, precedendo a mistura. Em seguida, fez-se a compactação de 3 corpos de prova por liga. Estes foram sinterizados em forno com temperaturas controladas. Para caracterizar o material, efetuaram-se ensaios de densidade a verde e sinterizado, traçadas curvas de histerese e magnetização e teste de resistividade. Observou-se que a liga Fe₂P apresentou resultados mais promissores, comparativamente as outras ligas, do ponto de vista para aplicações em máquinas elétricas, onde a indução de saturação ficou em 1,36 T, permeabilidade relativa de 4198 e a coercitividade em 207 A/m. No entanto, em comparação com aço elétrico laminado, a indução de 1,36 T ficou abaixo da média de 1,7 T, apresentada pelo aço elétrico acessita, do grupo Acelor. O fator de interesse são as perdas, uma vez que nas ligas estudadas, a inserção dos elementos de liga citados pode vir a compensar seu formato maciço. Partindo do princípio que a liga Fe₂P apresentou os melhores resultados, seguiu-se para a montagem do motor de indução com esta formulação. A máquina montada foi levada para testes, na empresa Voges Motores, de Caxias do Sul - RS. Os resultados apresentados demonstraram um conjugado abaixo do nominal para máquinas de mesma tipologia, ficando apenas 18% do resultado ideal. O fator de potência ficou acima do motor convencional, no entanto, o escorregamento ficou elevado, principalmente em altas rotações. De acordo com a curva de conjugado apresentada, concluiu-se que o motor apresenta a curva característica “D”, onde o conjugado máximo é alcançado a baixas rotações.

ABSTRACT

This work aims to study the application of ferromagnetic alloys obtained by Powder Metallurgy in an induction motor. The core of this machine, usually made of rolled sheets, was replaced by massive blocks. In the study of alloys, was used an iron powder and alloys thereof, obtained by mixtures with different percentages of phosphorus (1, 2 and 3%), silicon (1, 3 and 5%) and nickel (50%). With the pre-set formulations, mass measurements were conducted preceding with the mixture. Then 3 specimens per alloy were compacted. These were sintered in a kiln with controlled temperatures. To characterize the material, density tests were performed prior and post sintered curves of Hysteresis and curves of Magnetization were drawn and resistivity test was obtained. At this time, it was observed that the alloy Fe2% P showed the most promising results compared to other alloys, from the point of view of applications in electrical machines where the saturation induction was 1.36 T, the relative permeability was 4198 and coercivity was at 207 A / m. However, compared to laminated electrical steel, the induction of 1.36 T was below the average of 1.7 T, presented by steel plates acessita, Acelor group. The factor of interest are the losses, once at the alloys studied, the insertion of alloy elements may offset their solid form. With the alloy Fe2% P, that showed the best results, it followed with the mounting of the induction motor. The assembled machine was taken for testing at the company Voges Motores, Caxias do Sul - RS. The results presented demonstrated below nominal torque for the same type of machines, but only 18% from the ideal result. The power factor was higher than the conventional motor, however, the slip became high, especially at high speeds. According to the torque curve presented, it was concluded that the motor features the characteristic curve "D", where maximum torque is achieved at low speeds.

1. INTRODUÇÃO

Existe busca constante para o desenvolvimento de novos materiais e processos que apresentem maior rendimento, eficiência e menores custos na construção de máquinas elétricas rotativas. O Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM da UFRGS, em parceria com outras instituições como a FEEVALE-RS, a ULBRA-RS, o CEFET-RS e a UCS-RS vem de longa data realizando projetos de pesquisa com materiais magnéticos obtidos pela Metalurgia do Pó, para aplicação em núcleos de máquinas elétricas.

Com o intuito de colaborar com a área, este trabalho tem por objetivo a construção de um motor de indução que utiliza material maciço sinterizado no núcleo do rotor e do estator. Para este fim, é efetuado um estudo das propriedades de ligas ferromagnéticas obtidas por Metalurgia do Pó para a construção de núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas, que usualmente são montados a partir de chapas de aço laminadas.

A sequência do trabalho apresenta, no capítulo 2, os fundamentos teóricos da metalurgia do pó, iniciando da preparação da matéria-prima ou pó, conformação e sinterização. Em seguida, faz-se um alinhamento a respeito dos conceitos e tipos de materiais magnéticos. E, por fim, observa-se uma descrição do funcionamento básico das máquinas elétricas rotativas trifásicas e partes constituintes, com destaque ao motor de indução trifásico.

O capítulo 3 traz os procedimentos experimentais. Foram preparadas misturas de pó de ferro com diferentes percentuais de fósforo, silício e níquel com a finalidade de analisar suas propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas. As ligas sinterizadas estudadas foram: Ferro Puro, Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe5%Si e Fe50%Ni. Ainda neste capítulo, apresenta-se o projeto de montagem da máquina de indução, bem como os testes e resultados coletados.

A discussão e análise dos resultados estão presentes no capítulo 4, onde comparações com a máquina convencional são efetuadas. Nesta parte, também se fazem presentes as possíveis medidas a serem tomadas para aumento do rendimento do projeto.

Por fim, encontra-se no capítulo 5 a conclusão do trabalho, onde são concentradas as ideias finais sobre os conceitos vistos e sobre os resultados apresentados, fazendo a avaliação sobre o desempenho do projeto como um todo, analisando as perspectivas de continuidade ou não desta proposta.

Após as conclusões apresentam-se os anexos e as referências utilizadas para o estudo e fundamentação do trabalho.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Metalurgia do Pó (M/P)

A Metalurgia do Pó (M/P) é uma técnica de fabricação de componentes utilizada em diversas aplicações, onde a geometria e o tamanho do produto final fazem com que este processo seja mais econômico quando comparado a outros processos de fabricação como fundição, estampagem e usinagem (BARBOZA 2009). Pode-se controlar com grande precisão sua composição e impurezas, possibilita-se também a obtenção de altas densidades no produto (DAS 2008).

Por este processo pode-se obter peças inteiriças, sem a necessidade de laminação. Estes blocos inteiriços sinterizados, obtidos a partir de ligas de ferro com outros elementos como silício, níquel, fósforo e cobalto, podem substituir os núcleos do rotor e do estator de um motor (DIAS 1996).

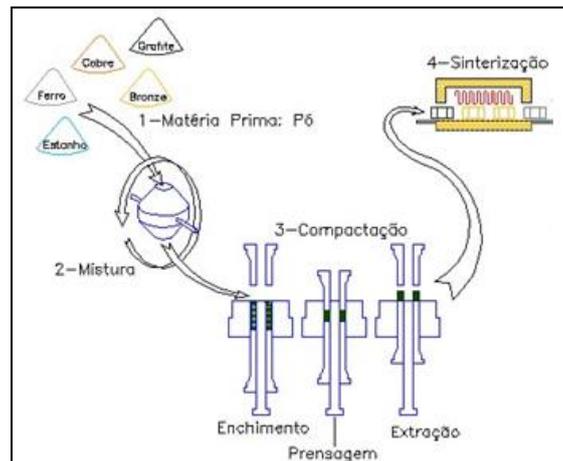
A M/P diferencia-se de processos metalúrgicos convencionais por utilizar-se de pós metálicos e não metálicos como matérias-primas. Considera-se que não há presença de fase líquida ou a presença é apenas parcial durante sua manufatura. Neste processo, usualmente se produz peças com formas definitivas, dentro de determinadas tolerâncias, tornando desnecessário realizar usinagem posterior ou outro tipo de acabamento (CHIAVERINI 2001).

O número reduzido de operações na produção da peça acabada e o aproveitamento quase total da matéria-prima são fatores econômicos que contribuem para que a Metalurgia do Pó venha sendo utilizada em larga escala (MORO 2007).

As etapas fundamentais neste processo são: mistura, compactação e sinterização. Na primeira, o material é separado, quantificado e feito sua mistura. Após, os pós são submetidos à aplicação de pressão, à temperatura ambiente, no interior de matrizes, cujo formato geralmente corresponde ao produto esperado. Por fim, os materiais são expostos a um tratamento térmico, abaixo do ponto de fusão da liga metálica utilizada,

com temperatura e atmosfera controlada. Esta etapa do processo é a principal responsável por conferir resistência mecânica ao produto (CHIAVERINI 2001). A figura 1 mostra, esquematicamente, as etapas de um processo de fabricação por metalurgia do pó convencional.

Figura 1- Representação esquemática do processo de metalurgia do pó.

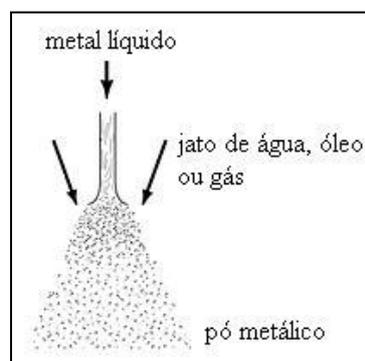


Fonte: QUALISINTER 2011.

2.1.1. Matéria prima – obtenção e mistura dos pós

Para a obtenção do pó utilizado no processo, a forma, a distribuição e o tamanho de grão são características importantes a serem consideradas. Métodos de obtenção, que podem ser mecânico, químico, físico e físico-químico, são empregados, podendo ser utilizados individual ou conjuntamente, de acordo com a característica de pó almejada. Um dos métodos físicos mais usados é a atomização, onde um metal fundido é vazado por um orifício, formando um filete líquido, passando por jatos de ar, de gás ou de água, conforme ilustra a figura 2 (ASM 2000) (ESSEL 2011).

Figura 2- Obtenção de pós por atomização.

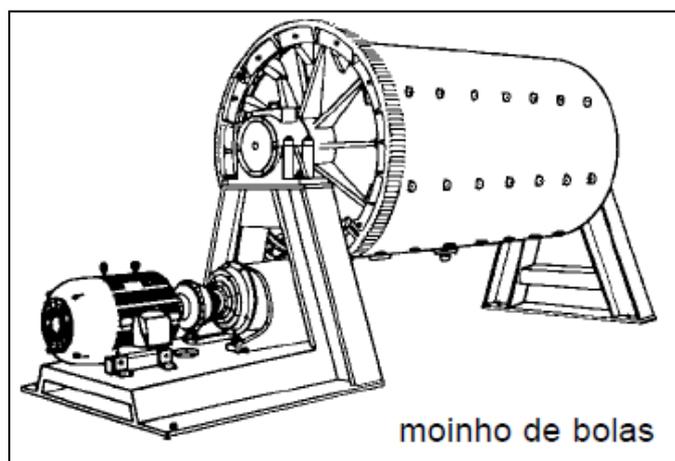


Fonte: ASM 2000.

Os jatos oriundos dos bocais produzem a pulverização do filete de metal fundido e seu imediato resfriamento. Depois, o pó é recolhido, reduzido, peneirado e está pronto para ser usado (ASM 2000)

Entre os métodos mecânicos para obtenção de pós, o mais difundido e largamente utilizado é a moagem. Geralmente é efetuada em um equipamento chamado moinho de bolas, que consiste num tambor rotativo contendo esferas metálicas de material resistente ao desgaste. Quando o tambor gira, as esferas chocam-se umas contra as outras, desintegrando gradativamente o material que se encontra no interior do tambor. A figura 3 ilustra um modelo do equipamento moinho de bolas (ESSEL, 2011).

Figura 3 - Moinho de bolas.



Fonte: ESSEL 2011.

Os pós podem ser obtidos também por métodos químicos, como a corrosão, que produz a oxidação do metal pelo ataque de ácidos ou bases, ou a redução de óxidos metálicos pelo emprego de hidrogênio ou monóxido de carbono (ESSEL 2011).

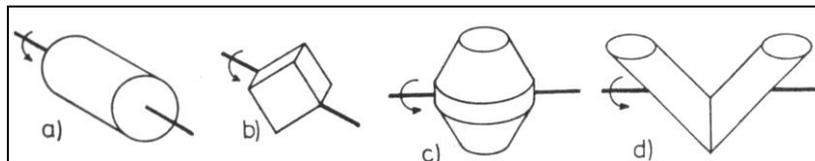
A composição química desejada para o produto final é bastante controlável na M/P. Basicamente, pós de diferentes metais podem ser misturados nas proporções especificadas, podendo-se partir diretamente de pós pré-ligados ou podendo-se, ainda, misturar pós pré-ligados a pós de metais, para se chegar à composição química desejada (GERMAN 1984).

O objetivo da mistura é promover uma boa homogeneização dos materiais e incorporar o lubrificante. Em sistemas de um só componente, como no caso da produção de peças com ferro puro, a etapa de mistura tem função de promover uma distribuição uniforme do lubrificante na liga desejada. O lubrificante é utilizado para reduzir o atrito entre as partículas de pó e a parede da matriz, bem como, entre as próprias partículas. O

lubrificante serve também para reduzir a força de extração da peça após a compactação, evitando danos ao compactado. Os lubrificantes mais difundidos comercialmente são, dentre outros, ácido esteárico, estearato metálico e estearato especial de zinco (BRANDBURY 1986).

Para efetuar esta etapa, geralmente faz-se uso de equipamentos chamados misturadores, compostos por um compartimento, onde se insere os materiais, acoplado a um eixo que efetua rotação com o auxílio de um motor. A figura 4 ilustra algumas formas geométricas de compartimentos misturadores, enquanto a figura 5 traz um exemplo do equipamento completo.

Figura 4 - Misturadores (a) cilíndrico, (b) rotacional cúbico, (c) cone duplo e (d) dupla concha.



Fonte: GERMAN 1984.

Figura 5 - Misturador laboratorial tipo dupla concha ou “V”.



Fonte: INCAL 2011.

2.1.2. Compactação

Esta etapa consiste em aplicar pressão de 150-900MPa sobre a mistura de pós, consolidando o material no formato desejado (SEVER 2002). Esta é a primeira das operações de consolidação da metalurgia do pó. O objetivo é conformar o pó na forma projetada, conferindo as dimensões finais da peça e obtendo adequada a densidade a verde do compactado e resistência mecânica necessária para manuseio posterior. O fator

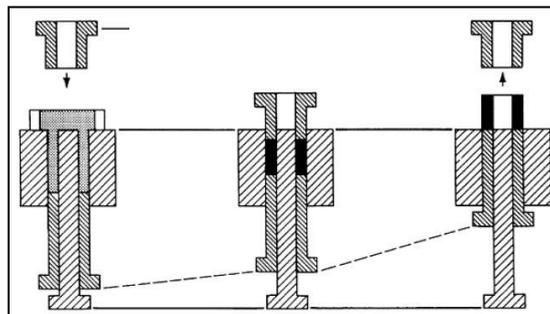
essencial é proporcionar o contato necessário entre as partículas de pó, para que a operação de sinterização seja efetuada de modo mais eficiente (BARBOZA 2009).

A compactação é executada em prensas mecânicas ou hidráulicas, podendo ser um processo dinâmico ou em escala laboratorial. Os sistemas de compactação utilizados são: compactação unidirecional de ação simples e ação dupla, figura 6, compactação isostática, laminação de pós, extrusão e forjamento de pré-formas sinterizadas. Estes sistemas podem ser empregados em regime a quente ou a frio (BARBOZA 2009).

O método mais empregado é a compactação em matriz, representado pela técnica de compactação de duplo efeito (figura 7). Este sistema é utilizado pressionando as peças com forças a partir de duas direções, produzindo peças com densidade mais uniforme (COLTON 2009).

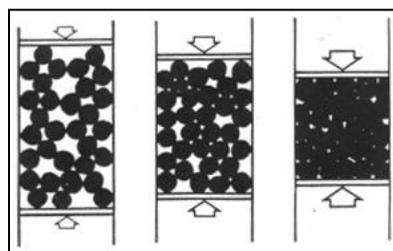
Densidade a verde é a densidade da peça compactada antes de ser sinterizada e depende da pressão, das características das matérias-primas, distribuição das partículas, tamanho e forma das partículas, uso ou não de lubrificantes e da geometria da matriz, fazendo relação com os espaços vazios na peça, conforme pode ser visualizado na figura 7 (BARBOZA 2009).

Figura 6 - Estágios de um compactação de um pó numa matriz.



Fonte: ASM 2000.

Figura 7 - Sequencia de compactação de duplo efeito.



Fonte: DIAS 1996.

2.1.3. Sinterização

Após a compactação, as peças passam pela sinterização. Esta é a operação fundamental da técnica de metalurgia do pó por constituir a fase final do ciclo de consolidação dos pós metálicos. A sinterização consiste no aquecimento do compactado verde a temperaturas elevadas, porém abaixo do ponto de fusão do metal ou do principal constituinte da liga metálica considerada. É um tratamento térmico que visa conferir o formato final desejado, atingindo propriedades químicas e mecânicas através da ligação atômica entre as partículas vizinhas (MARTINS 2010). A aplicação de calor durante ou após a compactação é utilizada para aumentar a ligação entre as partículas (BRITO 2008).

Como resultado, as partículas que constituem o compactado ligam-se entre si e o material adquire as características desejadas de densidade, dureza e resistência mecânica (BARBOZA 2009).

A sinterização é um processo termicamente ativado que consiste na consolidação, densificação em alguns casos, recristalização e ligação obtidas por tratamento térmico de pós durante ou após a compactação. A temperatura está abaixo do ponto de fusão dos componentes e envolve o transporte de matéria em escala atômica. É o passo na fabricação que consome maior parcela de energia e, por isto, tem forte influência nos custos de produção (DIAS 1996).

Nesta operação, obtém-se a ligação final entre as partículas do pó. O aquecimento é da ordem de 2/3 a 3/4 da temperatura de fusão do metal considerado. Esta operação deve ser realizada na presença de uma atmosfera protetora, para evitar fenômenos como oxidação, descarbonetação, etc. (BARBOZA 2009).

2.2. Materiais Magnéticos

Materiais para aplicações em núcleos magnéticos podem ser classificados como duros, *hard magnetic materials*, ou macios, *soft magnetic materials* (CREMONEZI 2009).

Os materiais magnéticos duros caracterizam-se por apresentar força magnética permanente, ao passo que os materiais magnéticos macios apresentam força magnética

somente em presença de um campo magnético externo (CREMONEZI 2009). Esta classificação é embasada na caracterização magnética através da observação de duas características: curva de histerese e magnetização.

2.2.1. Magnetização

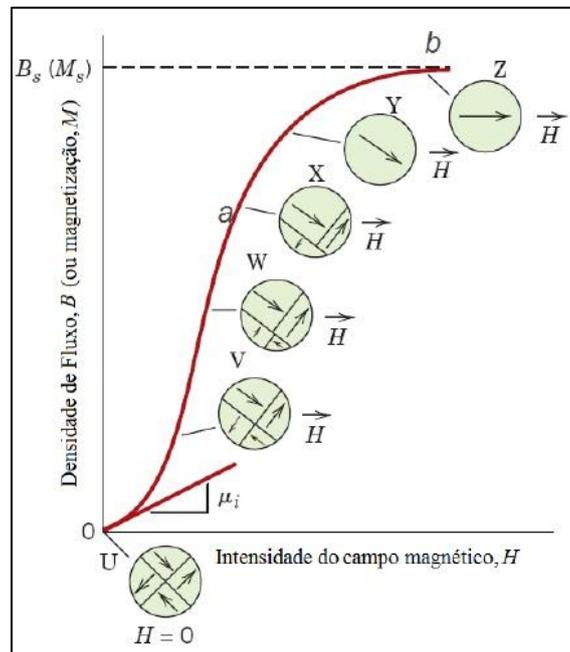
A fonte da magnetização espontânea reside em uma propriedade atômica das partículas chamada *spin*. *Spin* é um conceito que proporciona às partículas do átomo um momento angular intrínseco. Entre a escala atômica do *spin* do elétron e magnetização macroscópica encontra-se outra subestrutura chamada domínios (LUNA 2012).

Abaixo da temperatura Curie, temperatura que reduz a saturação do material a zero, *spins* de elétrons de átomos vizinhos se alinham aleatória e espontaneamente. Cada região de *spins* alinhados é chamada de domínio. Quando um campo é aplicado, os domínios alinhados podem crescer a custa dele, criando uma magnetização. Assim, enquanto os domínios devem a sua magnetização microscópica ao alinhamento dos *spins*, a magnetização macroscópica “M” é uma medida de diversidade de domínios, “m” (MOON 2004). Pode-se então definir magnetização como sendo a soma de todos estes momentos magnéticos elementares em um determinado volume ocupado (LUNA 2012).

Ao submeter um material ferromagnético, que inicialmente foi desmagnetizado, a um aumento contínuo de campo magnetizante H, a relação entre H e densidade de campo B é mostrada pela curva de magnetização ou curva inicial normal Oab – figura 8 (CALLISTER 2007).

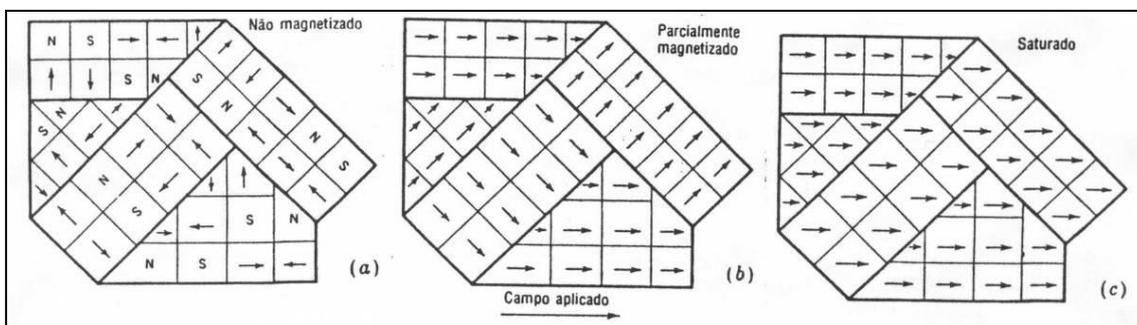
Com o campo H aplicado, os domínios mudam de forma e tamanho pelo movimento dos limites do domínio. As estruturas esquemáticas do domínio são representadas na figura 8, de U até Z e na figura 9 em vários pontos ao longo da curva B-H. Inicialmente, a constituição dos momentos dos domínios tem orientação aleatória, de tal forma que não há rede B (ou M) magnética (U) (LUNA 2012).

Figura 8 - Curva de magnetização B-H de um material ferromagnético desmagnetizado. Configurações de domínio durante várias fases da magnetização são representados. Densidade do fluxo na saturação B_s , Magnetização M_s , e permeabilidade inicial μ_i .



Fonte: LUNA 2012.

Figura 9 - Estágios sucessivos de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo.



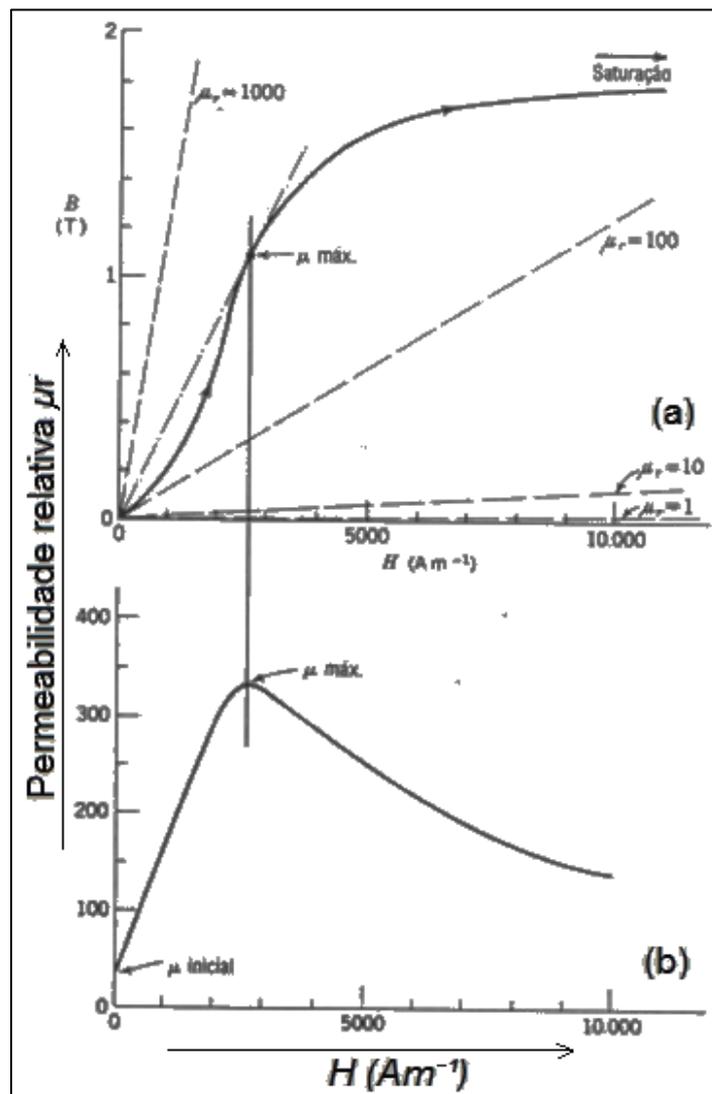
Fonte: BARBOZA 2009.

Da curva de magnetização pode-se extrair informações importantes para a avaliação de materiais para aplicações magnéticas, como: Saturação Máxima e Permeabilidade. Uma curva típica de um material magnético é mostrada pela curva sólida da figura 10(a). Para fins de comparação, a figura mostra quatro linhas tracejadas, correspondendo às permeabilidades relativas constantes, μ_r , de 1, 10, 100 e 1.000. A figura 10(b) mostra um gráfico de permeabilidade relativa como função do campo H aplicado. A permeabilidade relativa máxima está no ponto da curva de magnetização

onde a relação indução B e campo H é máxima e é designada por $\mu_{\text{máx}}$ (BARBOZA 2009).

Quando H é aumentado, o valor de B aumenta rapidamente a princípio e depois mais lentamente. Nos valores suficientes altos de H a curva tende a ficar assintótica. Esta condição é chamada de saturação magnética (KRAUS 1978).

Figura 10 - (a) Curva de magnetização típica, (b) relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado H .



Fonte: BARBOZA 2009.

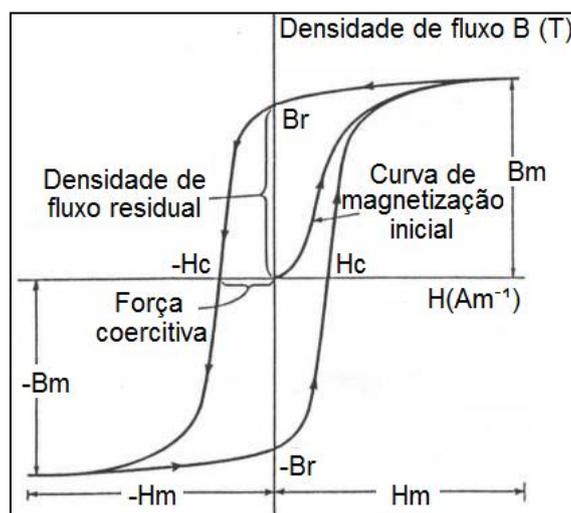
Materiais magnéticos geralmente apresentam propriedades de baixa coercividade e valores elevados de permeabilidade magnética, resistividade elétrica e condutividade térmica (RODRIGUES et al 2011).

2.2.2. Curva de histerese

Tomando uma bobina com determinado material em seu núcleo e submetendo-a circulação de uma corrente elétrica I , um campo magnético H será gerado no interior desta bobina e a peça irá sofrer uma indução magnética B (BARBOZA 2009).

Caso o material deste núcleo for de características ferromagnéticas, muitas linhas de fluxo serão induzidas em seu interior, acarretando uma relação $B \times H$ que respeita uma determinada curva. Esta curva é denominada de curva de histerese ou ciclo de histerese e é demonstrada na figura 11. Estes materiais também são conhecidos como materiais magnéticos (BARBOZA 2009).

Figura 11 - Ciclo de histerese de um material magnético macio para diferentes valores de indução magnética.



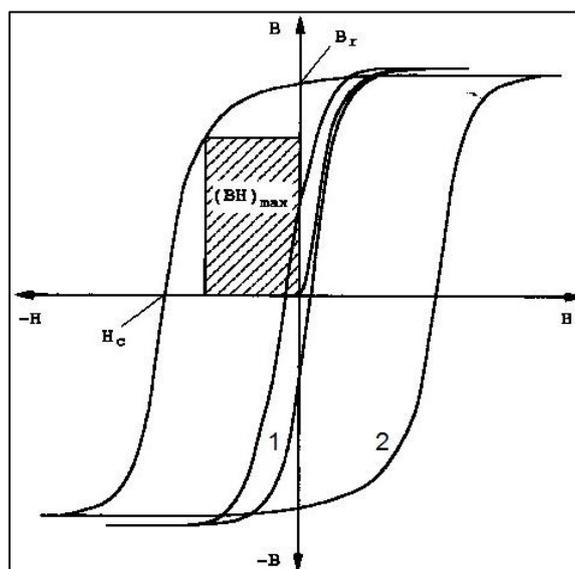
Fonte: BARBOZA 2009.

O ponto em que a curva corta o eixo B , no quadrante superior, é denominado de magnetismo remanente ou retentividade B_r e representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado, $H=0$. O ponto em que a curva corta o eixo de H no quadrante esquerdo é denominado de força coercitiva ou coercitividade H_c e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime, $B=0$. A permeabilidade magnética relativa μ_r está relacionada com o ponto de maior declividade da curva de histerese. A indução de saturação B_{max} pode ser visualizada a partir dos valores de campo onde a indução tende a permanecer constante ou com declividade quase nula (JILES 1998).

Materiais Magnéticos Macios x Duros:

Conforme apresenta a figura 12, é possível distinguir estes dois tipos de materiais quando feita a comparação de seus ciclos de histerese (THÜMMLER 1993).

Figura 12 - Ciclo de Histerese. Área correspondente ao material magnético: 1-macio; 2-duro.



Fonte: THÜMMLER 1993.

Segundo a figura 12, materiais magnéticos macios apresentam baixa coercitividade (H_c) e baixa remanência (B_r) em conjunto com uma alta permeabilidade (μ_r) e indução de saturação. Por outro lado, materiais magnéticos duros mostram alta resistência contra desmagnetização por apresentar alta coercitividade, alta remanência e maior produto $(BH)_{max}$ (THÜMMLER 1993).

2.2.3. Materiais magnéticos macios

Para a produção de materiais magnéticos macios tem sido empregada a técnica de metalurgia do pó, com a finalidade de obterem-se peças com forma definitiva e um mínimo de usinagem e retificação, respeitando as propriedades magnéticas de interesse (CHIAVERINI 2001).

Os materiais magnéticos macios, metálicos, considerados mais importantes e mais utilizados são Fe puro, Fe-Si, Fe-P, Fe-Si-P, Fe-Ni, Fe-Co e ligas de Fe-Co-V (THÜMMLER 1993).

Esses materiais, inicialmente aplicados principalmente na indústria eletroeletrônica, disseminam-se também para outros segmentos, como a indústria automobilística, eletrodomésticos, ferramentas elétricas e máquinas elétricas (CREMONEZI 2009 e ANISIMOVA 1990).

Materiais sinterizados obtidos a partir de ligas de material magnético macio, com ferro e outros constituintes como, por exemplo, fósforo, silício, níquel, cobalto e molibdênio podem ser utilizados na construção dos núcleos de estatores e rotores de máquinas elétricas rotativas em blocos únicos (SILVA 2003, FRAYMAN 2008 e PERSSON 1995).

Características dos materiais magnéticos macios

Para possibilitar a aplicação dos materiais magnéticos a serem estudados e utilizados em máquinas elétricas rotativas, estes devem apresentar algumas propriedades físicas de interesse. Desta forma, avaliam-se as características mecânicas, magnéticas e elétricas (BARBOZA 2009).

Propriedades Mecânicas

No desenvolvimento de ligas, devem ser observadas as características de ductilidade, dureza e resistência mecânica, necessárias para suportar os esforços originados dos campos magnéticos no núcleo, bem como resistir a vibrações originadas quando a máquina estiver operando (LUNA 2012).

Na determinação destas ligas, observam-se as propriedades mecânicas de dureza e resistência a compressão. Podem ser efetuadas análises metalográficas para verificação da morfologia da microestrutura e imperfeições microestruturais relacionando-as com o comportamento das propriedades de interesse (BARBOZA 2009).

O acréscimo de fósforo permite obter aumento da dureza e resistência mecânica utilizando temperaturas de sinterização menores, devido à formação de fase líquida transiente (KHRAISAT 2003 e DIAS 2005). O fósforo em percentuais inferiores a 1%

não confere ao ferro sinterizado diminuição do limite de escoamento (VERMA 2007 e CUNHA 2003).

Propriedades Magnéticas

Características dos materiais obtidos por metalurgia do pó, como propriedades magnéticas e elétricas, são influenciadas por vários fatores, no entanto, o desenvolvimento do processamento do material é considerado de maior relevância (BARBOZA 2009). No caso de materiais sinterizados, a maioria dos materiais ferrosos possui resistividade elétrica maior devido principalmente a porosidade e a oxidação superficial das partículas (DIAS 1996). É possível aumentar a resistência elétrica total de peças feitas pela metalurgia do pó adicionando outros tipos de materiais, como resinados, alterando a porosidade final da peça. Sabendo que a resistividade das ligas metálicas diminui com o aumento da densidade, ao incrementar a porosidade, além do acréscimo do valor desta propriedade, há uma diminuição da permeabilidade magnética e da indução de saturação e aumento da coercitividade (SONTEA 2002).

O tamanho de partícula de pó também afeta as propriedades magnéticas (QUALISINTER 2011). O aumento da granulometria do pó aumenta a permeabilidade magnética, assim com a coercitividade. Além disto, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização também alteram algumas propriedades físicas (ESSEL 2011).

Para utilização das ligas desenvolvidas para aplicação como núcleos magnéticos, estas devem apresentar algumas propriedades físicas de interesse (MARTINS 2010).

Permeabilidade magnética relativa (μ_r)

O acréscimo nos valores de permeabilidade magnética das ligas provoca um menor campo magnético no núcleo e um maior campo no entreferro. Para uma máquina elétrica rotativa, caso dos motores e geradores, o espaço compreendido entre o núcleo do rotor e o estator, deve apresentar o maior campo magnético possível, acarretando assim uma maior indução magnética.

No caso de um motor elétrico, o conjugado conferido a ponta de eixo pela máquina é proporcional ao fluxo magnético do entreferro. Cabe saber que fluxo, indução e campo magnético são grandezas relacionadas e proporcionais. Para a situação de um gerador, a tensão induzida nos enrolamentos da armadura é proporcional ao fluxo de entreferro. As ligas ferrosas proporcionam alta permeabilidade magnética e baixas perdas totais, resultando em dispositivos com alta eficiência (DIAS 1996).

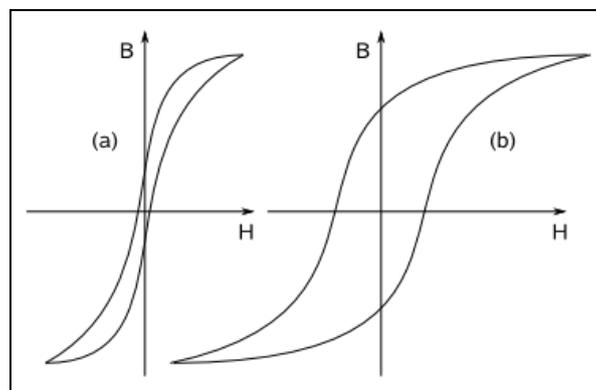
Indução de Saturação (B_{max})

A saturação magnética limita a maior indução possível no material. Nesta situação, mesmo que o material seja experimentado a aumentos no campo magnetizante, a indução pouco será alterada. Nos núcleos de máquinas elétricas, quanto maior a indução de saturação, maior será o fluxo de entreferro (BARBOZA 2009).

Baixas Coercitividade (H_c) e Retentividade (B_r) e Perdas por Histerese

O ideal é a curva de histerese se aproximar de uma reta, ou seja, baixas coercitividade e retentividade. A área da curva de histerese, que representa as perdas por ciclo de histerese em um dispositivo eletromagnético alimentado com corrente alternada, deve ser a mínima possível, para que as perdas por este efeito sejam minimizadas, conforme figura 13 (BARBOZA 2009).

Figura 13 - Ciclo de histerese – Perdas (a) < Perdas (b).



Fonte: MSPC 2012.

Propriedades Elébricas

O desenvolvimento de ligas para aplicações em núcleos de máquinas elétricas deve atender a necessidade de apresentar elevada resistividade elétrica (DIAS 1996).

Resistividade elétrica é a capacidade que um determinado material tem de se opor a passagem de um fluxo de corrente elétrica. Quanto menor for a resistividade, comparando corpos de prova iguais, tanto menor será sua resistência, proporcionando desta forma menor oposição a corrente elétrica. A resistividade elétrica, ρ , [Ωm] é determinada pela equação 2.1 (DIAS 1999):

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (2.1)$$

Onde:

R : Resistência Elétrica [Ω]

A : Área da Seção Transversal do corpo de prova [m^2]

l : Comprimento do corpo de prova [m]

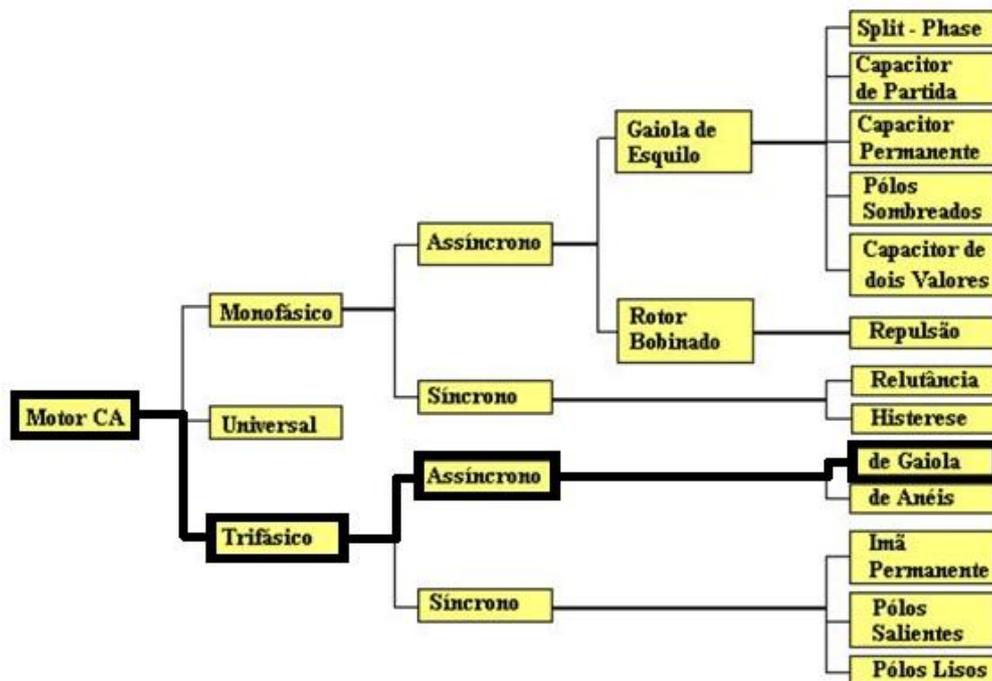
Dispositivos eletromagnéticos alimentados com corrente alternada apresentam tensões induzidas em seu núcleo de ferro. Esta tensão induz correntes no núcleo, conhecidas por correntes parasitas ou correntes de Foucault. Estas correntes são responsáveis por uma apreciável perda em potência e, por conseguinte, uma redução da eficiência destes dispositivos. Por este motivo, estes núcleos são construídos a partir de finas lâminas com espessura menor que um milímetro e isoladas eletricamente uma da outra. Isto limita e reduz as correntes induzidas, diminuindo as perdas por correntes parasitas. Outra forma de atenuar os efeitos das correntes parasitas e em consequência as perdas, é desenvolver um material que, sem perder as características magnéticas, apresente elevada resistividade elétrica (DIAS 1999).

Para a substituição de núcleos envolvidos por enrolamentos de armadura, uma possibilidade é a construção destes núcleos em blocos maciços de material magnético macio de elevada permeabilidade magnética, porém de alta resistividade elétrica (JANSSON 1992). Esta seria uma alternativa para redução das correntes parasitas. Uma forma de se aumentar a resistividade elétrica dos materiais é a utilização dos processos da Metalurgia do Pó (KRAUSE 1997).

2.3. Máquinas Elétricas Trifásicas

Dentre os diversos tipos de máquinas elétricas estão as rotativas trifásicas (CHAPMAN 2003). Basicamente as máquinas elétricas trifásicas diferem-se entre si com relação a construção do rotor, resultando com isto os dois tipos mais comuns, que são as máquinas síncronas e as máquinas assíncronas (WEG 2010 e RICHARDSON 1982). O universo tecnológico em máquinas elétricas, mais precisamente motores, pode ser visualizado conforme ilustra a figura 14.

Figura 14 - Máquinas Elétricas - Motores CA – Tipologias.



Fonte: Adaptado de WEG 2010.

Um tipo de máquina assíncrona trifásica é o motor assíncrono de Gaiola, ou simplesmente, motor de indução trifásico, destacado na figura 14 e objeto deste trabalho. As máquinas elétricas com alimentação trifásica podem funcionar como motor ou gerador. Como motor converte uma potência elétrica, a partir de uma fonte de energia elétrica, numa potência mecânica, podendo acionar uma carga acoplada ao eixo. Como gerador, processa-se o inverso (DIAS 1999).

2.3.1. Máquinas assíncronas

A velocidade de rotação nas máquinas elétricas possui comportamento diferente, dependendo de sua tipologia. Nas síncronas, a velocidade angular do eixo é constante e independe da carga acoplada, isto até, para determinados valores de potência, tendo como limite de uso a potência nominal da máquina (WEG 2010).

Os enrolamentos podem ser construídos com um ou mais pares de polos, que se distribuem alternadamente (um “norte” e um “sul”) ao longo da periferia do núcleo magnético. A velocidade síncrona do motor é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de polos ($2p$) do motor e da frequência (f) da rede, em hertz. O campo girante percorre um par de polos (p) a cada ciclo. (WEG, 2010, p. D-9)

A equação 2.2 representa a velocidade n_s [rpm], para máquinas síncronas.

$$n_s = \frac{120.f}{2.p} \quad (2.2)$$

Onde:

f – frequência da rede [Hz];

p – número de polos da máquina.

Nas assíncronas, há uma queda da velocidade angular quando é acoplado carga no eixo (DIAS 1999). Com essa diferença entre velocidade do rotor e do campo girante, as barras do rotor, que serão vistas a seguir, cortam as linhas de força magnética, provocando correntes induzidas, proporcionando assim uma alteração no conjugado.

Quanto maior a carga, maior terá que ser o conjugado necessário para acioná-la. Para obter o conjugado, terá que ser maior a diferença de velocidade para que as correntes induzidas e os campos produzidos sejam maiores. Portanto, à medida que a carga aumenta cai a rotação do motor. Quando a carga é zero (motor em vazio) o rotor girará praticamente com a rotação síncrona. A diferença entre a velocidade do motor n e a velocidade síncrona n_s chama-se escorregamento s , que pode ser expresso em rpm, como fração da velocidade síncrona, ou como porcentagem desta (WEG, 2010, p. D-9).

Pode-se chegar ao valor do escorregamento de duas formas: no caso de motores comerciais, este valor vem impresso na própria placa do motor, geralmente na unidade %; para outros casos, deve-se medir a velocidade real do eixo e utilizar a equação 2.3, para chegar-se ao escorregamento s [%].

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Onde:

n_s – velocidade síncrona [rpm];

n – velocidade da máquina [rpm].

Desta forma, através da equação 2.4, calcula-se a velocidade n [rpm] de um motor assíncrono, para um dado escorregamento.

$$n = n_s \left(1 - \frac{s}{100}\right) \quad (2.4)$$

Em relação ao aspecto construtivo, são constituídas fundamentalmente de duas partes: rotor e estator (FITZGERALD 2006).

Estator

Parte fixa da máquina na qual são colocados os enrolamentos de armadura com alimentação trifásica, onde é gerada uma onda de indução magnética também conhecida por campo girante (FITZGERALD 2006).

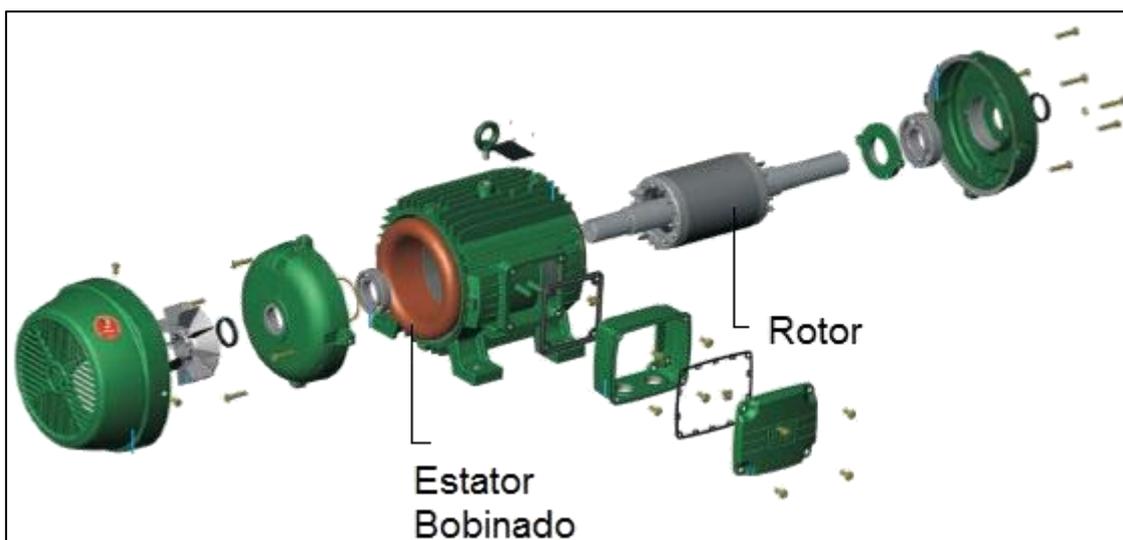
Rotor

Parte girante que envolve o eixo da máquina, podendo estar presente os enrolamentos de campo ou barras curto-circuitadas, como no caso do motor de gaiola (DIAS 1999).

A figura 15 demonstra a visão explodida destes componentes principais de um motor.

A diferença fundamental entre as diversas máquinas trifásicas está na concepção do rotor (NASAR 1987). A seguir, estão relacionadas os dois principais tipos assíncronos: de anéis e de gaiola.

Figura 15 - Máquina Elétrica – Visão explodida.

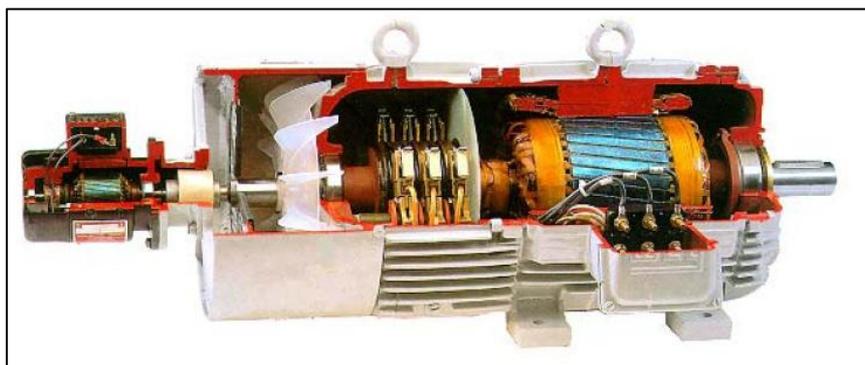


Fonte: WEG 2010.

Motor de anéis ou rotor bobinado

Esta tipologia de motor assíncrono é construída com o rotor possuindo um enrolamento polifásico, com o mesmo número de polos que o seu estator. Sobre o eixo, são montados anéis deslizantes isolados, onde são conectados os terminais do enrolamento do rotor (FITZGERALD 2006). A figura 16 apresenta este tipo de motor.

Figura 16 - Motor com rotor bobinado.



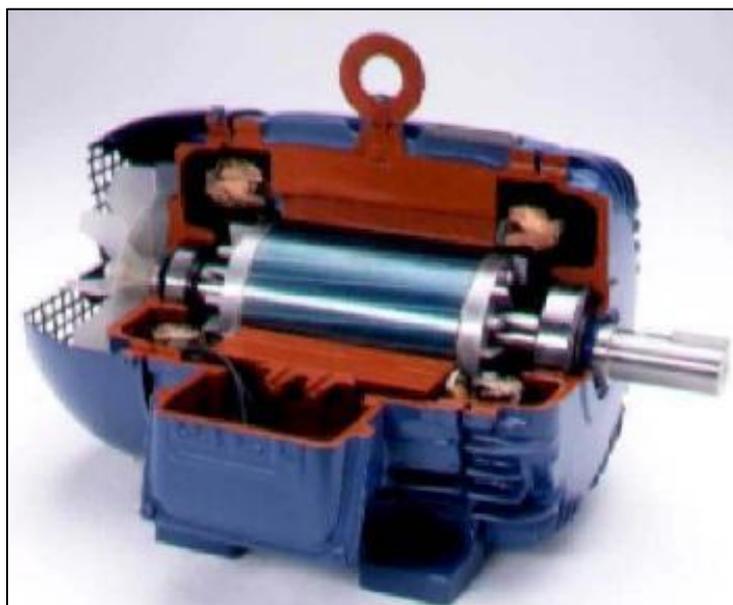
Fonte: WEG 2010.

Este tipo de máquina tem sua utilização reduzida, sendo essencialmente empregada quando se necessita elevado conjugado de partida, controle de velocidade ou quando se introduzem tensões externas ao circuito do rotor. Isto se deve ao seu elevado custo inicial e maior custo de manutenção em relação ao motor de gaiola (KOSOW 1986).

Motor de gaiola

O motor de gaiola possui o estator de mesma forma que o de anéis, apresentando diferença apenas em relação ao seu rotor. Possui barras condutoras encaixadas em ranhuras no ferro do rotor e curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores (KOSOW 1986). A figura 17 apresenta uma ilustração deste tipo de motor.

Figura 17 - Motor de gaiola.



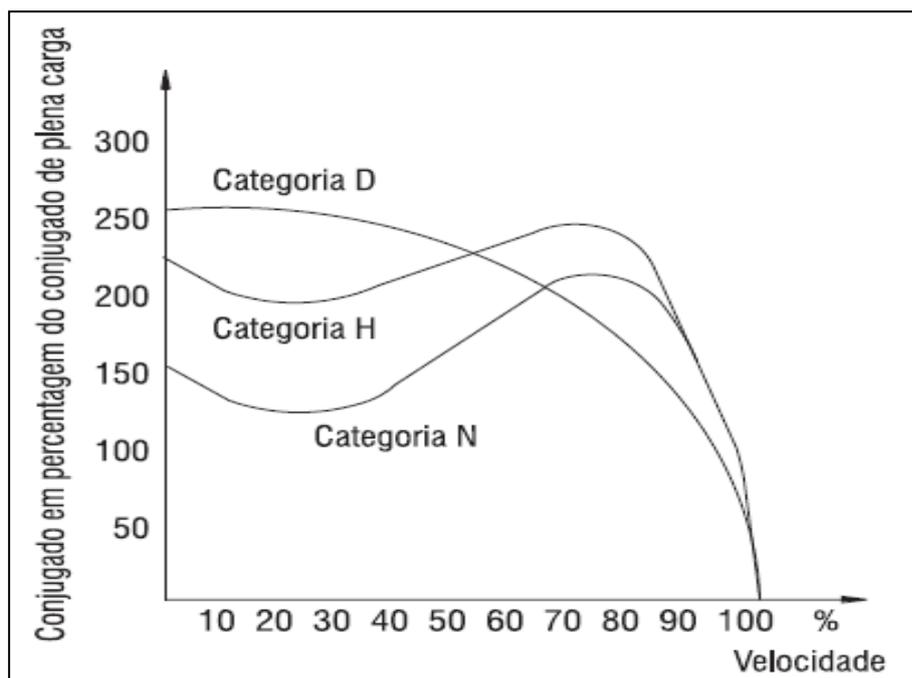
Fonte: WEG 2010.

A extrema simplicidade e a robustez da construção em gaiola de esquilo representam grandes vantagens para esse tipo de motor de indução, tornando-o tipo de motor mais difundido, desde motores fracionários até os de grande porte ([FRITZGERALD 2006]).

É o motor mais empregado em qualquer aplicação industrial, devido a sua construção robusta e simples, além de ter a solução mais econômica, tanto em termos de motores como de comando e proteção (WEG, 2010, p. D-2).

De acordo com suas características de conjugado, em função da velocidade e corrente de partida, estes motores podem ser classificados em categorias. Estas são organizadas em razão do tipo de carga. A figura 18 ilustra as curvas características de cada tipo. As especificações das categorias seguem ilustradas na tabela 1.

Figura 18 - Curva característica para motores de gaiola.



Fonte: WEG 2010.

Tabela 1- Categorias de motor de gaiola.

	CATEGORIA		
	N	H	D
Conjugado de partida	Normal	Alto	Alto
Corrente de partida	Normal	Normal	Normal
Escorregamento	Baixo	Baixo	Alto (>5%)
Utilização	Bombas, máquinas operatrizes, ventiladores	Peneiras, transportadores de correias, cargas de alta inércia, britadores.	Prensas excêntricas, elevadores.

Fonte: Adaptado de WEG 2010.

2.3.2. Núcleos magnéticos de máquinas elétricas

Os núcleos magnéticos, rotores e estatores das máquinas elétricas rotativas geralmente são construídos a partir de chapas de aço baixo carbono, em finas lâminas metálicas, com espessura menor que 1 mm, agrupadas em pacotes de chapas. Algumas máquinas de maior rendimento, como os geradores, são construídas com chapas de aço-

silício, com percentual de aproximadamente 3% de silício. O processo total para confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, estampagem, um processo para isolamento elétrica, empacotamento e fixação (DIAS 1999).

Com relação às chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento consiste num tratamento térmico, onde os pacotes de chapas são colocados em fornos durante um intervalo de tempo de aproximadamente 2 horas. Tendo como consequência, além do alívio de tensões, a oxidação da superfície das chapas, formando uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes. Alguns tipos de chapas de aço-silício são fornecidos pelos fabricantes com uma pintura a base óxido em uma das superfícies (DIAS 1999) (NASAR 1987).

2.3.3. Perdas em Máquinas Elétricas

A potência solicitada a uma máquina elétrica é definida pelas características da carga que está sendo considerada, ou seja, independente da potência nominal da máquina. A potência transmitida à carga pelo eixo do motor é menor que a potência absorvida da rede. Isto acontece devido às perdas. Tal efeito pode ser classificado em (WEG 2010):

- Perdas joule no enrolamento estatórico, perdas no cobre;
- Perdas joule no enrolamento do rotor, quando existente;
- Perdas por atrito e ventilação;
- Perdas magnéticas no núcleo, perdas no ferro.

A figura 19 mostra a distribuição destas perdas, onde:

- 1 – Potência aparente elétrica da rede;
- 2 – Potência aparente elétrica do estator a ser transferida ao rotor;
- 3 – Perdas primárias, estator, no ferro;
- 4 – Perdas primárias, estator, no cobre;
- 5 – Potência aparente elétrica no rotor;

6 – Potência mecânica no eixo;

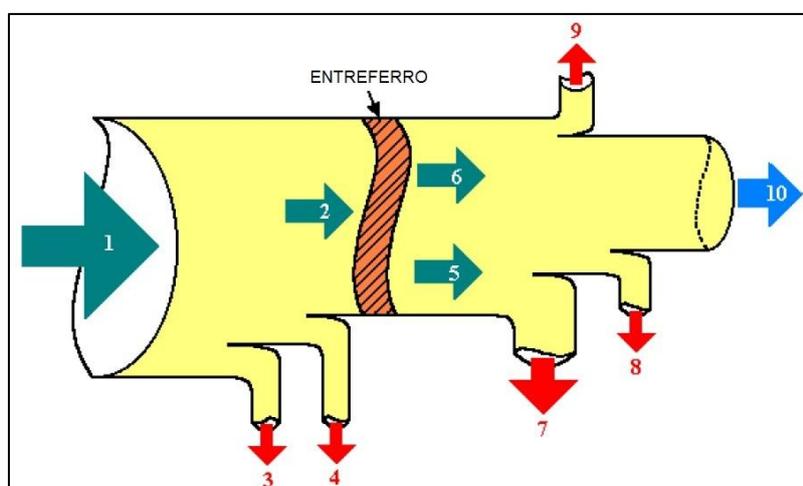
7 – Potência elétrica no rotor que pode ser recuperável, no caso do rotor estar ligado a uma rede externa por meio de anéis;

8 – Perdas elétricas dissipadas no rotor;

9 – Perdas por atrito e ventilação;

10 – Potência resultante no eixo.

Figura 19 - Fluxo de potência ilustrado para uma máquina elétrica.

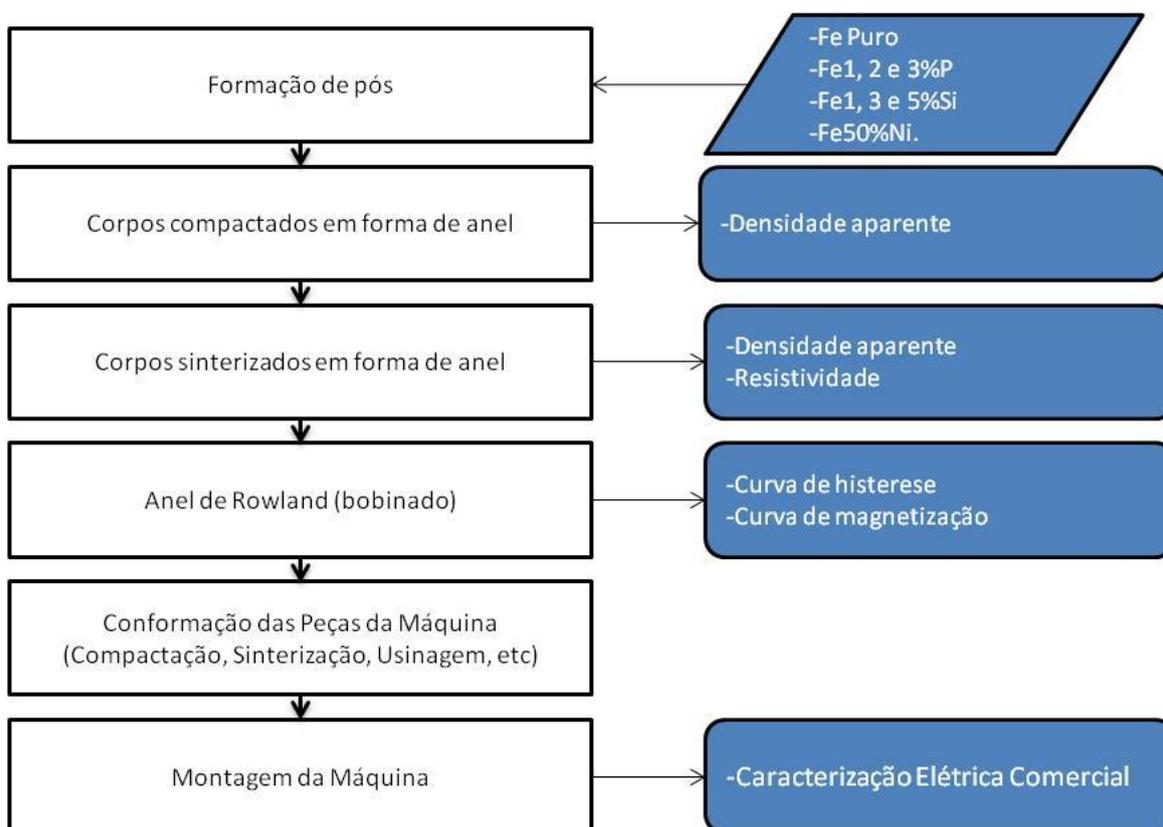


Fonte: WEG 2010

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental iniciou-se pela elaboração, baseada na literatura, das ligas mais comumente utilizadas em aplicações em máquinas elétricas. A quantidade de cada componente da liga teve por base a literatura (CHIAVERINI 2001). Contudo, utilizaram-se pequenas variações de percentuais com o objetivo de testar a influência dos materiais nas características finais. O fluxograma visto na figura 20 mostra a sequência lógica do trabalho.

Figura 20- Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Arquivo pessoal.

Foi considerado como produto padrão ou objetivo, chapas de Aço-Silício, utilizadas em motores elétricos, fornecidas pela empresa Voges Motores, de Caxias do Sul - RS. A partir da preparação das ligas, fez-se a compactação de 3 amostras, corpos

de prova em forma de anel e executou-se a sinterização. Posteriormente realizaram-se os ensaios para caracterização elétrica e magnética do material.

Com o auxílio de matrizes pré-existentes no laboratório, efetuou-se a compactação da liga. Os corpos compactados, em um formato muito próximo ao final, foram sinterizados e usinados, para se tornarem adequados ao tipo de rotor escolhido. Uma vez com as bolachas compactadas e sinterizadas, foi levado à empresa HP eletricidade, Porto Alegre – RS, para que fosse efetuada a montagem do motor elétrico.

Ao final deste processo, efetuaram-se os ensaios tradicionais de motores, na empresa Voges Motores.

3.1. Estudo das ligas através da obtenção de corpos de prova

3.1.1. Formulação

Na realização dos ensaios para caracterização elétrica e magnética dos materiais, optou-se pela confecção de corpos de prova em forma de anel. Nas formulações foram utilizados pós fornecidos pela empresa Höganäs Brasil Ltda. Estes pós apresentaram-se, de acordo com dados dos fabricantes, com granulometria inferior a 150 μm . Em todas as formulações foi inserido também um percentual mássico na ordem de 1% de estearato de zinco, utilizado como lubrificante sólido, para facilitar o processo de compactação (CHIAVERINI 2001).

Os materiais testados foram as seguintes ligas: Fe; Fe1%P; Fe2%P; Fe3%P; Fe1%Si; Fe3%Si; Fe5%Si e Fe50%Ni. As dosagens foram efetuadas com o auxílio de uma balança laboratorial digital, com precisão de 3 dígitos, modelo *Marte® AL500*. Após feita cada dosagem, o material passou por um processo de homogeneização em um misturador de cone duplo, por 30 minutos, a uma rotação de 22 rpm.

3.1.2. Compactação

Com as formulações devidamente prontas, partiu-se para a etapa de compactação dos corpos de prova em forma de anel. Para tanto, foram utilizadas matrizes laboratoriais de duplo efeito, conforme apresenta a figura 21. As dimensões, inseridas em desenho técnico, seguem ilustradas no anexo A.

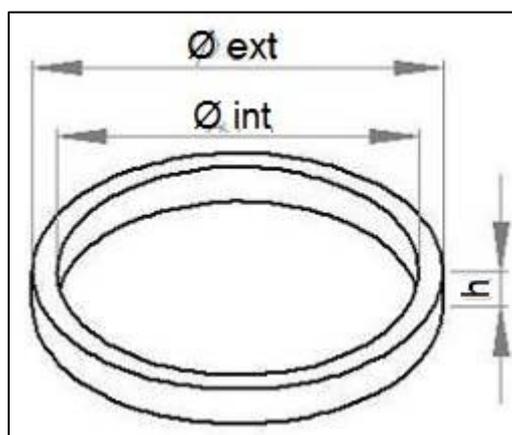
Figura 21- Matrizes para compactação



Fonte: Arquivo pessoal.

As dimensões desejadas para os anéis seguem de acordo com a figura 22.

Figura 22- Anel: $\varnothing_{ext}= 50\text{mm}$; $\varnothing_{int}= 41\text{mm}$; $h= 5\text{mm}$



Fonte: Arquivo pessoal.

Inseriram-se as matrizes em uma prensa hidráulica de capacidade máxima de 40 t, marca EKA. Na sequência, preencheu-se toda a cavidade da matriz com o pó em questão e efetuou-se a compactação com uma pressão conferida ao material de 600 MPa. Materiais para aplicações magnéticas via metalurgia do pó são comumente compactados a 600 MPa, ou 6 t/cm², o que lhes garante a densidade adequada para sua funcionalidade (CHIAVERINI 2001).

A cada corpo de prova compactado, extraíram-se, com o auxílio de um paquímetro digital, suas dimensões. Foram efetuadas medições da massa de cada corpo, para determinação da densidade a verde, em g/cm³, dos anéis. Este parâmetro foi calculado de acordo com a equação 3.1 (HALLIDAY 1996).

$$d = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

Onde:

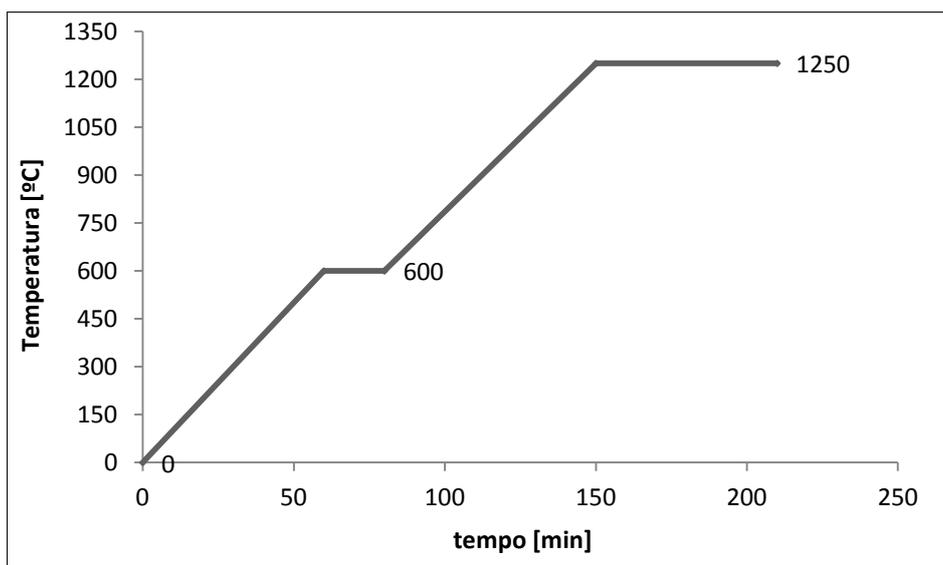
m – massa do anel [g];

V – volume do anel [cm³].

3.1.3. Sinterização

Os corpos compactados foram submetidos à sinterização em um forno tubular, com atmosfera inerte de argônio, o que evita a oxidação durante o processo (PELEGRINI 2012). Este tratamento térmico deu-se de acordo como mostra o gráfico da figura 23, que relaciona a evolução da temperatura do interior da câmara em função do tempo.

Figura 23- Curva de Sinterização: 1250°C por 1h, taxa de 10°C/min



Fonte: Arquivo pessoal.

O resfriamento do material sinterizado deu-se no próprio forno. Após passarem por este processo, foram efetuadas novas mensurações das dimensões dos corpos,

através de um paquímetro digital, bem como a medição de suas massas para cálculo da densidade.

3.1.4. Ensaio de densidade aparente

Os dados dimensionais e a massa a verde e sinterizados mensurados foram utilizados para o cálculo das densidades dos corpos de prova, que estão na tabela 2.

Tabela 2- Densidade aparente a verde e sinterizado.

Densidade (g/cm ³)		Fe Puro	Fe1%P	Fe2%P	Fe3%P	Fe1%Si	Fe3%Si	Fe5%Si	Fe50%Ni
Verde	Média	6,58	6,46	6,49	6,34	6,56	6,49	6,47	6,63
	Desvio	0,03	0,03	0,00	0,01	0,02	0,02	0,00	0,12
Sinterizado	Média	6,63	6,71	6,87	7,00	6,70	6,73	6,76	7,25
	Desvio	0,02	0,04	0,02	0,02	0,07	0,05	0,02	0,02

Fonte: Arquivo pessoal.

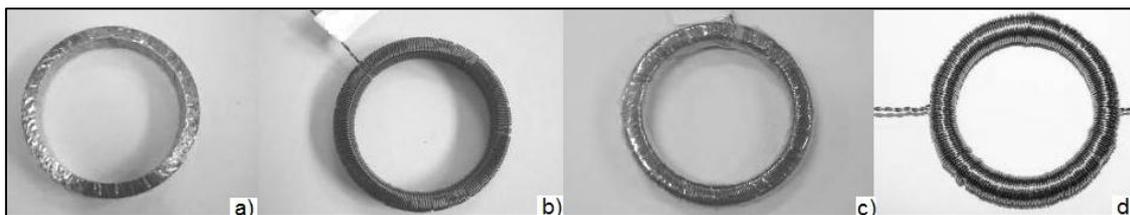
Na liga Fe-P, observa-se um incremento no valor da densidade a verde até 2% de fósforo, decrescendo para 3%P. Para a liga Fe-Si a densidade a verde decai com o aumento do percentual de Si. Em todos os casos a densidade aumentou com o acréscimo de P e Si na sinterização.

3.1.5. Curvas de histerese e magnetização

Para realização das curvas de histerese foi utilizado como base a norma ASTM A773. Esta fornece o procedimento de obtenção de curvas de histerese, qual foi obtida através de um Traçador de Curvas de Histerese Magnética, TCHM, modelo TLMP-TCH-14.

Na aplicação desta metodologia, fez-se a preparação de amostras, tendo os seguintes passos: isolamento elétrico do anel, bobinagem de espiras secundárias, isolamento dos fios e bobinagem primária. O procedimento consiste em: isolar o anel com filme plástico para evitar descascamento do fio esmaltado, enrolamento de espiras secundárias e novo isolamento, seguido do enrolamento das espiras primárias, como apresentado na figura 24.

Figura 24 - Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento do primário.



Fonte: BITTENCOURT 2012.

O TCHM é constituído por um amplificador de corrente capaz de magnetizar pequenas amostras mantendo o campo magnetizante senoidal. Um resistor “*shunt*” fornece uma tensão proporcional à corrente elétrica no enrolamento primário que permite estimar o campo magnetizante H . Um circuito integrador permite gerar um sinal proporcional à indução magnética B .

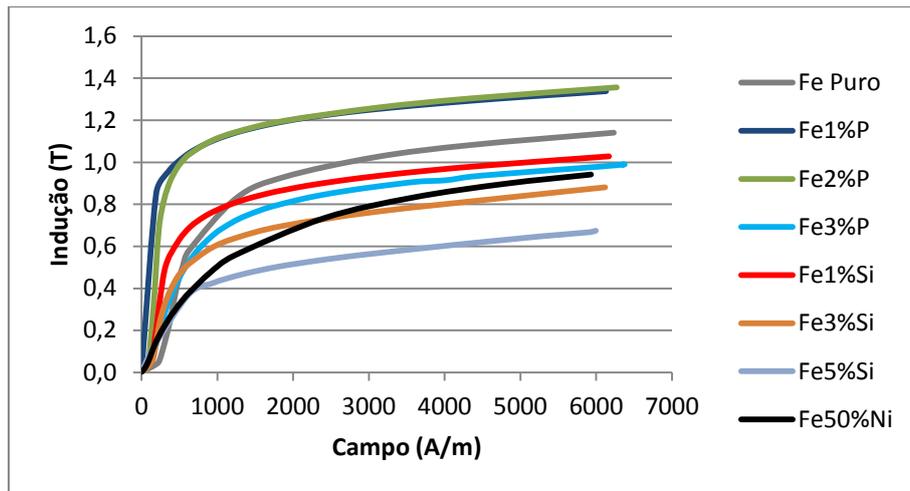
O TCHM também permite o registro da curva de histerese, da curva de magnetização e estimativa das perdas magnéticas de amostras maiores utilizando fontes externas de magnetização. Para a obtenção da curva de histerese e as propriedades magnéticas pelo método do TCHM utilizou-se um software de aquisição de dados GLB-BH 3.0.

Resultados das curvas de histerese e magnetização

Foram realizados os ensaios para obtenção da curva de histerese e curva de magnetização das 3 amostras de cada liga. Por intermédio da curva magnetização, puderam-se extrair os dados de permeabilidade e indução máximas. Da curva de histerese obtiveram-se os dados de perdas, indução remanente e força coercitiva. Para todas as amostras, utilizou-se durante o ensaio corrente de 5A e frequência de 0,05Hz.

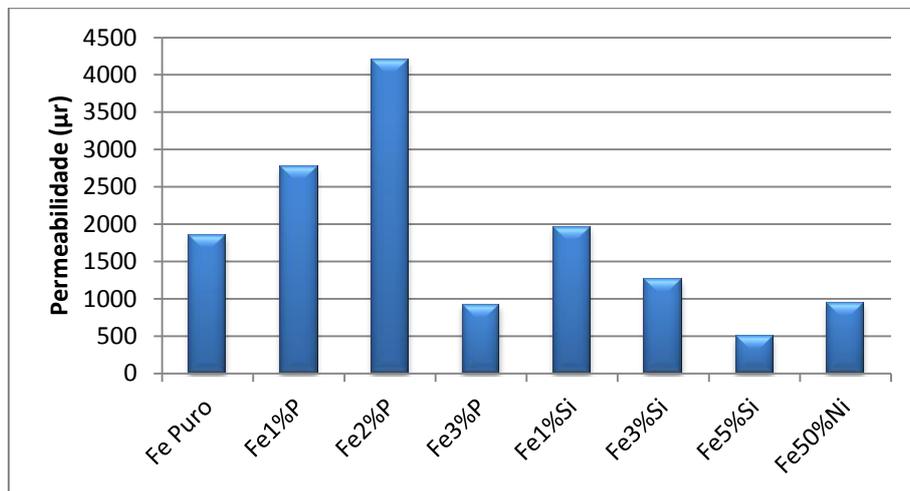
As curvas de magnetização médias, referente às amostras de cada espécie, seguem apresentadas na figura 25. Pela avaliação dos dados destas curvas, plotaram-se no gráfico da figura 26 os resultados de permeabilidade relativa para cada liga. Da mesma forma, na figura 27, são apresentados os dados de indução máxima, ou de saturação.

Figura 25 - Curvas de magnetização média



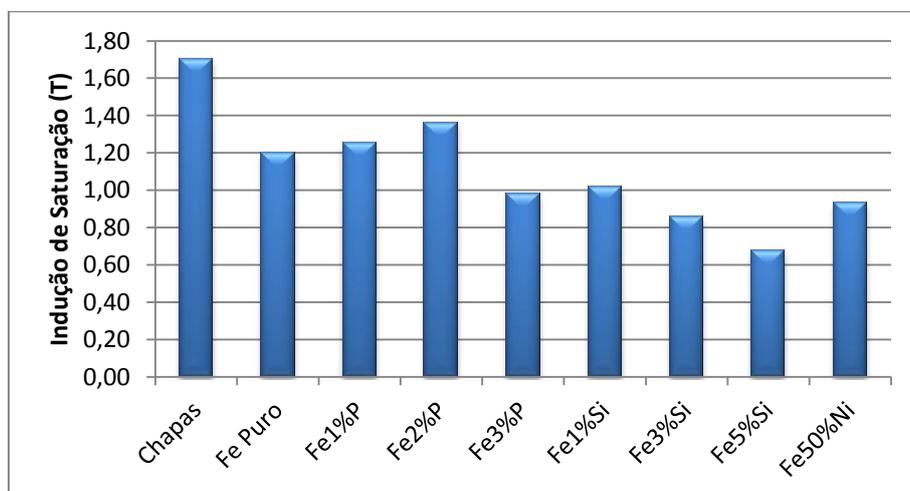
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 26 - Permeabilidade relativa



Fonte: Arquivo pessoal.

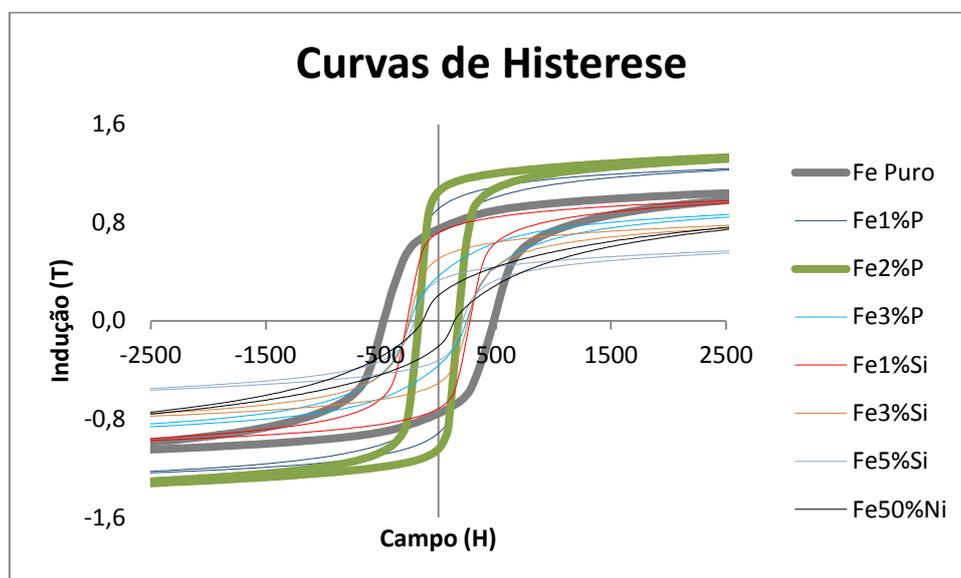
Figura 27 - Indução máxima (saturação).



Fonte: Arquivo pessoal.

As curvas de histerese médias, referente as 3 amostras de cada liga, são demonstradas no gráfico da figura 28. Nesta ilustração, foi dada ênfase à liga Fe2%P e ao Fe Puro, como meio de comparação.

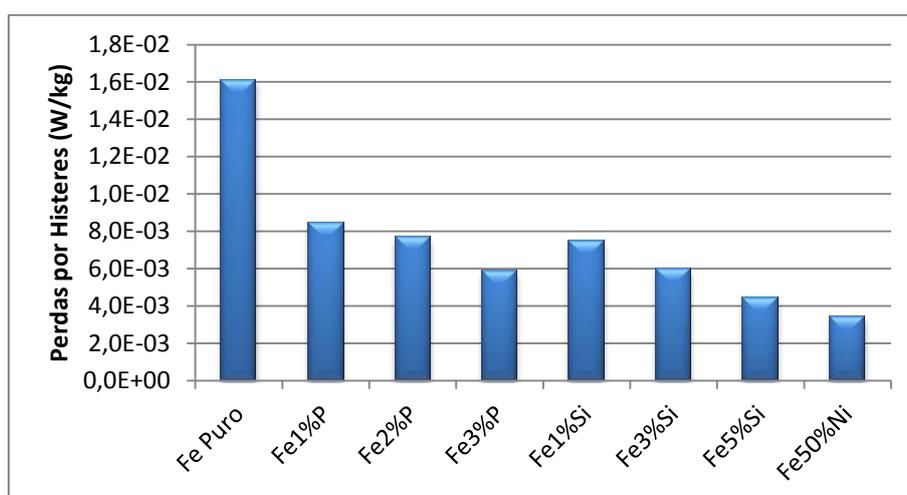
Figura 28 - Curvas de histerese.



Fonte: Arquivo pessoal.

Com o aproveitamento dos dados fornecidos pelo software utilizado no ensaio, através do cálculo da área geométrica das curvas da figura 28, chegou-se ao gráfico da figura 29, onde é apresentada a relação de perdas por histerese de cada material em estudo.

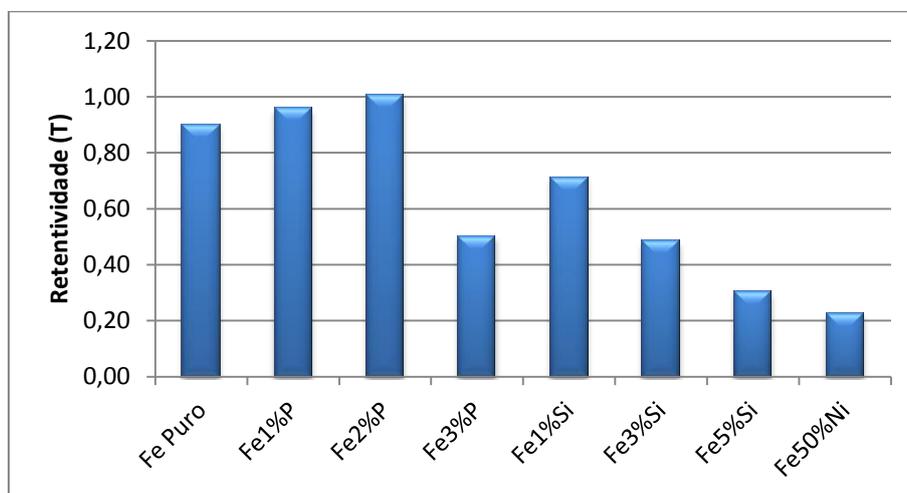
Figura 29 - Perdas por histerese



Fonte: Arquivo pessoal.

Nos gráficos da figura 30 e da figura 31 são apresentados os valores de indução remanente e força coercitiva, respectivamente.

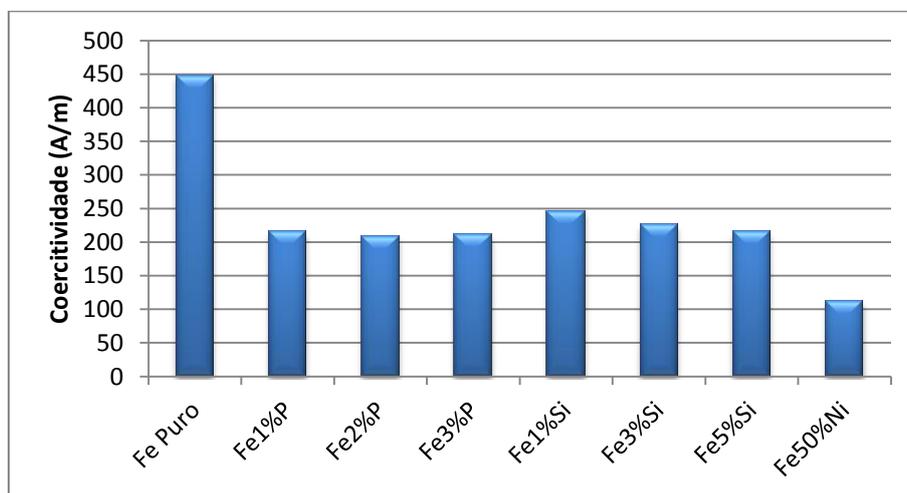
Figura 30 - Indução remanente ou retentividade (T)



Fonte: Arquivo pessoal.

Como pode-se observar, a liga Fe2%P apresentou resultados de retentividade elevados, porém próximos da liga Fe1%P e Fe Puro. Para a liga FeSi, o acréscimo de Silício provocou uma queda na retentividade.

Figura 31 - Força coercitiva (A/m)



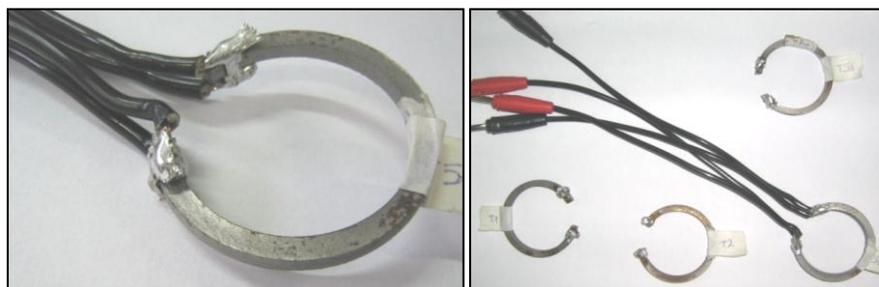
Fonte: Arquivo pessoal.

Em relação a força contrária necessária para desmagnetizar o material, força coercitiva ou coercitividade, observou-se que as ligas apresentaram comportamentos muito semelhantes, com exceção ao Fe Puro, que apresentou resultados elevados.

3.1.6. Resistividade elétrica

A resistividade elétrica foi determinada a partir da resistência elétrica de um anel, sendo este cortado em uma parte do perímetro, conforme a figura 32. Este artifício permitiu obter um corpo de prova de comprimento muito maior que a seção transversal, ou algo como próximo a uma barra curvada.

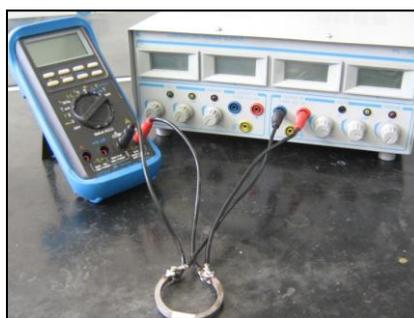
Figura 32 - Anel seccionado com conectores para ensaio.



Fonte: Arquivo pessoal.

Assim, para calcular a resistência elétrica do corpo, aplicou-se correntes elétricas a partir de uma fonte de tensão contínua e mediu-se a tensão elétrica a partir de um milivoltímetro. As correntes de valores 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0A foram fornecidas por fonte Vcc Jomed, modelo PS – 2403D. Mediu-se a tensão sobre o anel com o auxílio de voltímetro de precisão Minipa, modelo ET 2930. O aparato montado segue ilustrado na figura 33.

Figura 33 - Equipamentos para ensaio de resistividade.



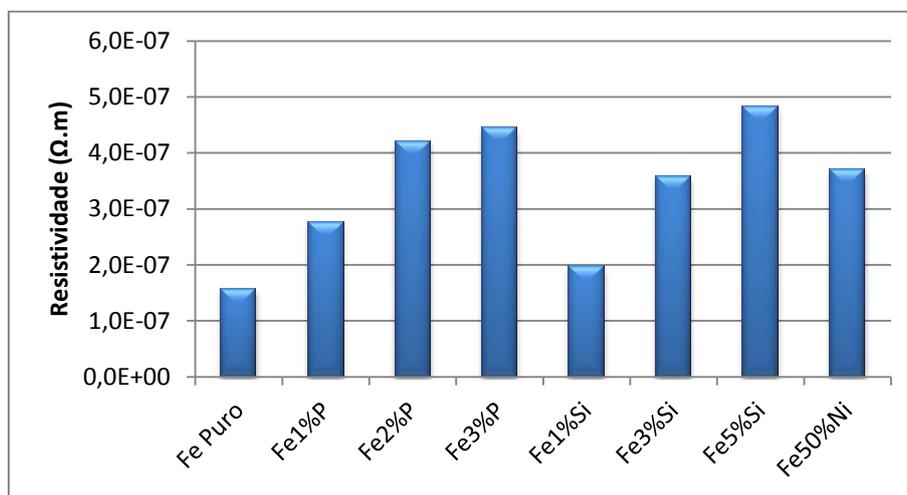
Fonte: Arquivo pessoal.

Resultados do ensaio de resistividade

Os resultados do ensaio de resistividade demonstraram através da figura 34, que com o aumento da inserção de elementos de liga a resistividade final do material sofre

um acréscimo no seu valor, o que é interessante para a aplicação em núcleos de máquinas elétricas. No entanto, cabe salientar que estes valores ainda ficaram muito abaixo de ligas comerciais, como a Somaloy 500, da empresa Hoganas, qual resultado é da ordem de $70\mu\Omega.m$.

Figura 34 - Resistividade



Fonte: Arquivo pessoal.

3.1.7. Considerações sobre o estudo das ligas

De acordo com os resultados apresentados, foi feita uma avaliação sobre qual liga seria empregada para a construção do motor de indução, na concepção do núcleo do rotor e estator. A liga Fe2%P apresentou a melhor permeabilidade magnética e a melhor indução de saturação, seguida da liga Fe1%P, nos dois casos. Em relação aos resultados de indução remanente, a combinação FeSi mostrou-se mais interessante para a aplicação, uma vez que ao cessar a força magnetizante, demonstrou os menores valores de magnetismo remanente. No entanto, em relação a força coercitiva, as ligas tiveram resultados bastante próximos, o que pode compensar esta diferença na remanência. Por fim, ao ensaio de resistividade, que auxilia na avaliação das perdas, os acréscimos de elementos de liga, tanto na formulação FeP e FeSi, acarreta um aumento na resistividade.

Sendo assim, considerou-se que a liga mais adequada para a aplicação, de acordo com os resultados deste trabalho, seria a liga Fe2%P, pois, ao equiparar-se com as demais na maioria dos resultados, teve o diferencial de apresentar melhor desempenho de permeabilidade e indução de saturação.

3.2. Projeto da Máquina Assíncrona

Para este estudo, considerou-se um motor elétrico comercial como base. As características elétricas foram respeitadas, uma vez que o que se pretendeu foi avaliar o material em estudo, e não a potencialidade do motor em questão. Em relação ao aspecto dimensional, foram reaproveitados carcaça e eixo de um motor existente no laboratório, que foram adaptados para receber os núcleos. Estes sim respeitaram o dimensionamento do motor comercial.

3.2.1. Máquina trifásica utilizada

Para o projeto da nova máquina de indução trifásica proposta, utilizou-se os dados de um motor Voges, cujas características principais estão descritas na tabela 3.

Tabela 3 - Dados do fabricante - Motor convencional.

Potência		Carcaça (ABNT)	Rotação (rpm)	Corrente		
cv	kW			In(A)	Ip(A)	Io(A)
0,125	0,09	56a	1650	0,78	2,34	0,57

Conjugado			Rendimento			Fator de Potência		
Cn(N.m)	Cp/Cn(%)	Cm/Cn(%)	50%	75%	100%	50%	75%	100%
0,5	280	300	42,00%	51,50%	56,00%	0,45	0,51	0,56

Fonte: Voges, 2012.

Outros dados fornecidos pelo fabricante, que serviram como parâmetros para o trabalho, estão relacionados na tabela 4. Em relação à bobinagem, utilizou-se os dados da tabela 5.

Tabela 4 - Dados de serviço - Motor convencional.

Fator Serviço	1,15
Escorregamento %	8,33
Ip/In	3
Isolação	B
GD2(kmg^a)	0,0007
Massa(Kg)	3,3
TMRT(s)	15
Ruído(db)	50

Fonte: Voges, 2012.

Tabela 5 - Dados de bobinagem.

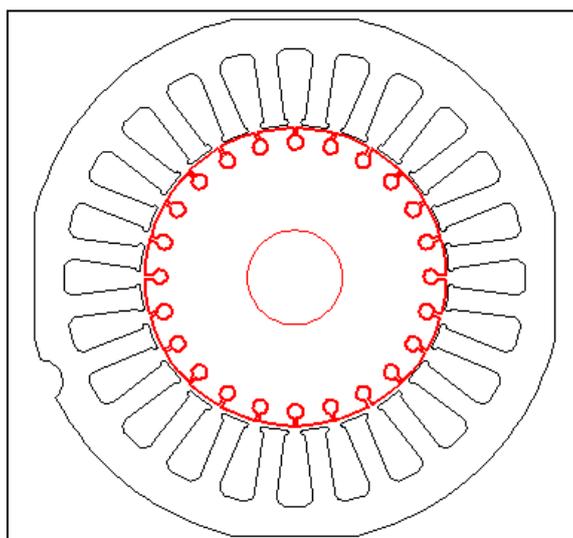
Fio (AWG)	30
Espiras	265
Passe	7
Ligação	Série
Nº cabos	6
Nº Ranhuras	24
Pacote do ferro Silício (mm)	42
Diâmetro do ferro Silício (mm)	42

Fonte: Arquivo pessoal.

3.2.2. Projeto dos núcleos

Com os dados do motor base e os materiais reaproveitados, chegou-se na tipologia proposta para o projeto, que segue ilustrada na figura 35.

Figura 35 - Tipologia de rotor e estator utilizado.

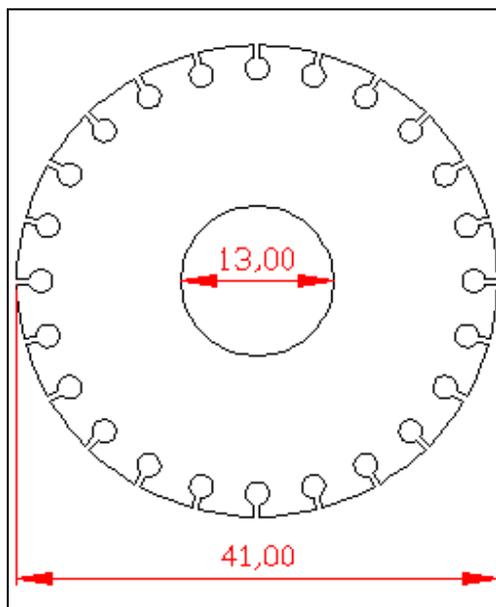


Fonte: Arquivo pessoal.

Trata-se de um motor de indução, gaiola de esquilo, que possui em seu rotor, em vermelho na figura 35, barras de cobre curto-circuitadas. O núcleo do rotor, que foi constituído por 4 peças circulares de faces planas, considerando a matriz utilizada, ficou dimensionado para 41 mm de diâmetro, depois de usinado. Conforme ilustra a figura 36. Para o núcleo do estator, fez-se a utilização de uma matriz existente no laboratório, qual teve sua concepção no trabalho de título Desenvolvimento de Compósitos Magnéticos Macios Utilizados em Núcleos de Máquinas Elétricas, cujo autor foi o Eng. Lewis. Uma ilustração desta matriz segue no anexo B. Considerando a matriz utilizada e a carcaça

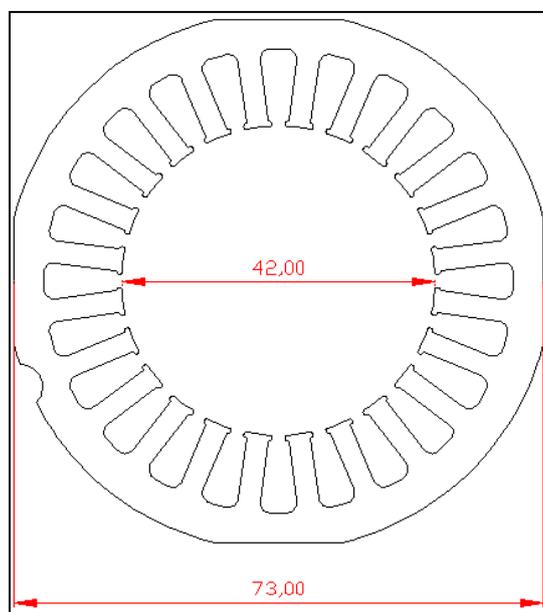
reaproveitada, o estator deveria ficar com 42 mm de diâmetro interno e 73 mm de diâmetro externo, conforme apresenta a figura 37.

Figura 36 - Dimensões do rotor.



Fonte: Arquivo pessoal.

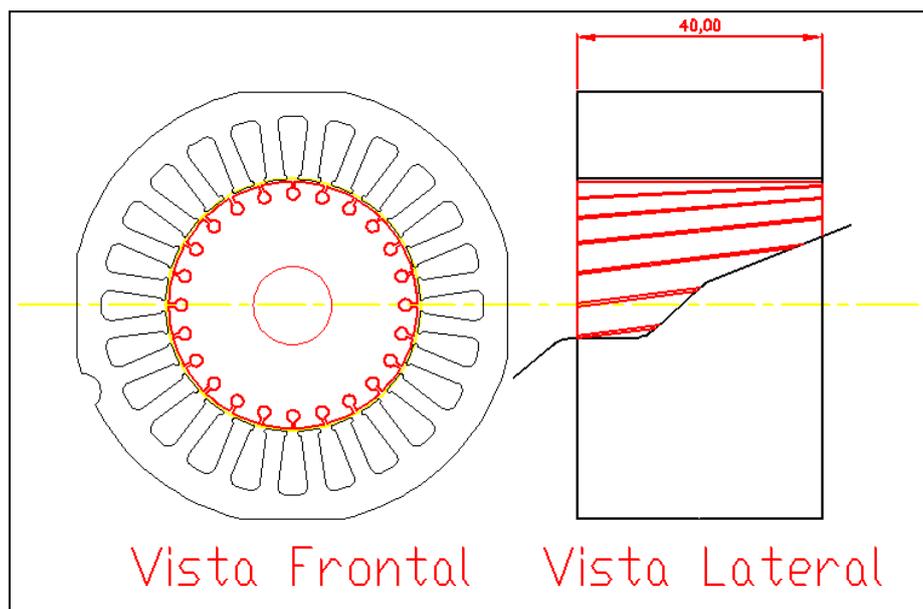
Figura 37 - Dimensões do estator.



Fonte: Arquivo pessoal.

Conforme ilustra o esquema proposto na figura 38, o tamanho do pacote, estator, e do rotor ficou com 40 mm.

Figura 38 - Tamanho do pacote e do rotor.



Fonte: Arquivo pessoal.

3.3. Montagem da Máquina Assíncrona

A montagem da máquina procedeu-se iniciando pela confecção dos núcleos. Nesta etapa foram respeitadas as mesmas condições que foram utilizadas no estudo das ligas, tanto em relação a formulação do material, quanto na compactação e sinterização.

Após os núcleos serem confeccionados, estes foram levados à usinagem, para que fossem efetuadas correções dimensionais. Posteriormente, em parceria com a empresa HP Eletricidade, fez-se a montagem na carcaça e a bobinagem, de acordo com o projeto prévio.

3.3.1. Confecção dos núcleos

Para a confecção do rotor, efetuou-se a prensagem de corpos cilíndricos, com faces planas, de 42 mm de diâmetro e 12 mm de espessura. Estas dimensões, maiores que as do projeto, foram utilizadas em função do aproveitamento da matriz existente, no caso do diâmetro, e para possibilitar possíveis ajustes de usinagem posterior, no caso da espessura. As fendas no rotor, para inserção das barras de cobre, foram efetuadas por usinagem após a sinterização, o que ajudou a evitar a quebra das peças.

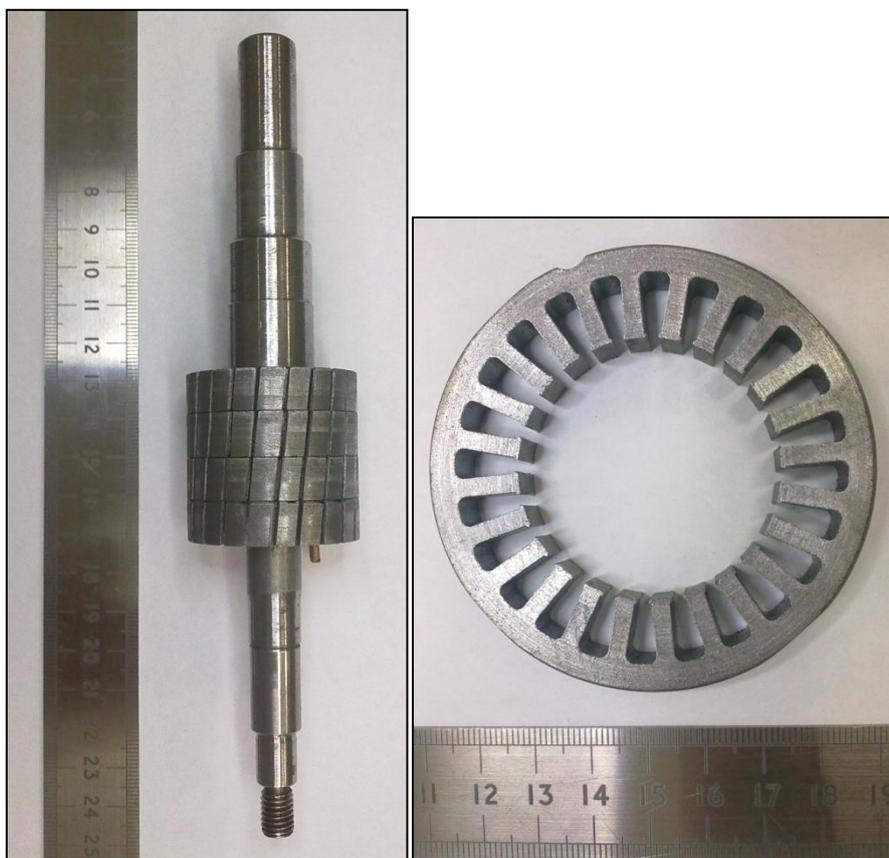
Para o estator, também em função da utilização de uma matriz preexistente, compactaram-se os corpos, já com as ranhuras no seu formato final, restando apenas os ajustes no diâmetro externo e na espessura, que também foram efetuados através de usinagem. Este processo foi efetuado na empresa Tecsinter Metalurgia.

Para ambos os casos, utilizou-se uma compactação com 600 MPa. Após a compactação, os corpos foram levados à sinterização, obedecendo a curva apresentada na figura 23.

Posteriormente a sinterização, os corpos foram levados para a usinagem, recebendo ajustes dimensionais, a fim de adquirir as medidas previstas no projeto, como visto no item 3.2.2.

O resultado é o apresentado na figura 39, que mostra no lado esquerdo o rotor parcialmente montado, com 4 peças maciças sinterizadas com a liga Fe2%P. No lado direito, pode-se visualizar uma peça do estator do mesmo material.

Figura 39 - Peças do rotor no eixo (esq.) e peça do estator (dir.).



Fonte: Arquivo pessoal.

3.3.2. Montagem da máquina

Conforme citado anteriormente, para a montagem final da máquina, contou-se com o apoio da empresa HP Eletricidade. O procedimento deu-se pela montagem do rotor, com a inserção das barras de cobre e a execução dos curtos-circuitos nas extremidades das mesmas. O estator foi montado na carcaça e o acoplamento nesta deu-se através do próprio envernizamento da bobinagem efetuada, garantindo assim a ideal fixação do estator no interior do motor.

Montagem do rotor

Na montagem do rotor, iniciou-se inserindo as 4 peças previamente usinadas no eixo, apresentado na figura 40, que foi reaproveitado de um motor existente no laboratório.

Figura 40 - Eixo utilizado no motor.



Fonte: Arquivo pessoal.

As peças foram aderidas umas nas outras através da utilização de uma resina própria para adesão das chapas laminadas, em processos convencionais.

Após esta etapa, foram colocadas as barras de cobre de 2 mm de diâmetro. Estas receberam um anel em cada uma de suas extremidades. Este anel passou por uma soldagem, proporcionando que todas as barras ficassem em curto-circuito. O resultado deste processo pode ser visto na figura 41.

Figura 41 - Rotor confeccionado: Detalhe barras.



Fonte: Arquivo pessoal.

A figura 42 ilustra o rotor em visão lateral, onde é possível perceber a inclinação de um passo aplicada para as barras de cobre. Esta inclinação foi necessária por motivos construtivos, facilitando o posicionamento do núcleo e também em função da possibilidade de redução do efeito das harmônicas e perdas. O aspecto elétrico envolvido nesta característica não foi considerado inicialmente.

Figura 42 - Rotor confeccionado: Detalhe lateral.



Fonte: Arquivo pessoal.

A figura 43 ilustra o detalhe do anel de curto-circuito inserido. Este foi soldado e recebeu um acabamento por usinagem.

Figura 43 - Rotor confeccionado: Detalhe anel de curto-circuito.



Fonte: Arquivo pessoal.

Montagem do estator

Para a montagem do estator, partiu-se de uma carcaça de motor existente no laboratório, conforme ilustrado na figura 44. Esta recebeu uma usinagem interna, apenas para correções de imperfeições.

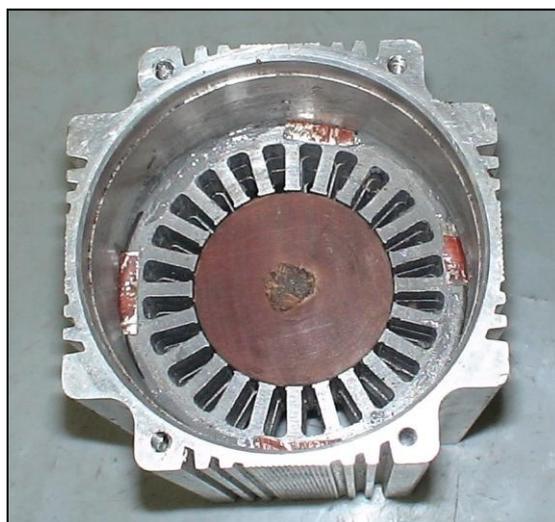
Figura 44 - Carcaça de motor utilizada.



Fonte: Arquivo pessoal.

Posteriormente, com o auxílio de um núcleo de metal, fez-se o alinhamento das ranhuras das 4 peças do estator. Estas peças foram fixadas entre si com uma fita adesiva e foram inseridas na carcaça. A figura 45 apresenta a montagem.

Figura 45 - Peças do estator inseridas na carcaça, com o auxílio de um núcleo de metal.



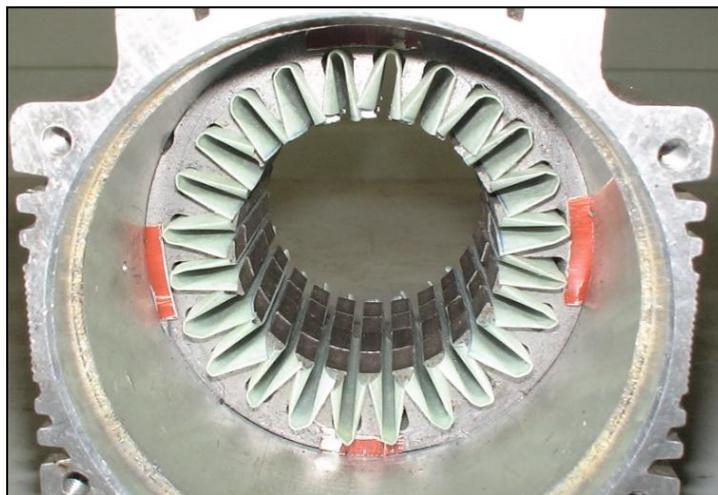
Fonte: Arquivo pessoal.

Nesta etapa foi feita uma pré-aderência do núcleo na carcaça, através de uma resina colante, para evitar que o material se movesse durante a bobinagem.

Com o núcleo pré-fixado, partiu-se para a etapa de bobinagem, que se procedeu iniciando pela disposição de material isolante entre as ranhuras. Isso possibilita a redução do atrito entre os fios e o núcleo sinterizado durante o processo e protege contra

curto-circuito no funcionamento. A figura 46 ilustra o material colocado sobre as ranhuras.

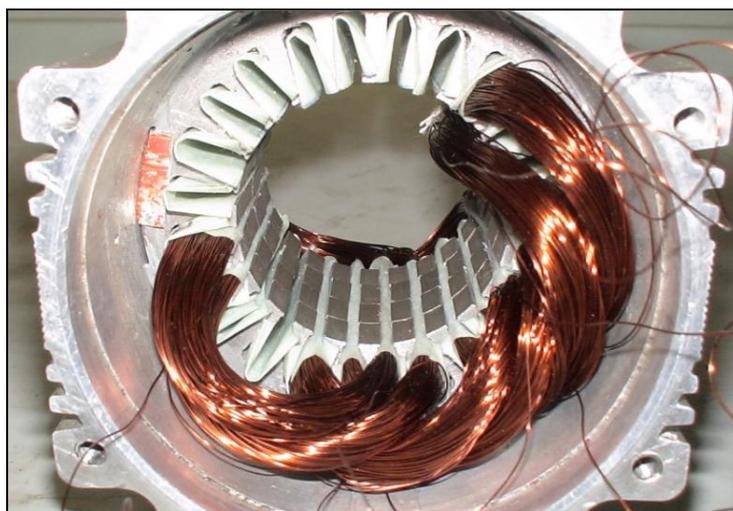
Figura 46 - Material isolante sobre as ranhuras.



Fonte: Arquivo pessoal.

A partir de então, fez-se a bobinagem, obedecendo a um procedimento industrial padrão, de acordo com os dados vistos no projeto. A figura 47 ilustra o trabalho, de forma parcialmente concluída.

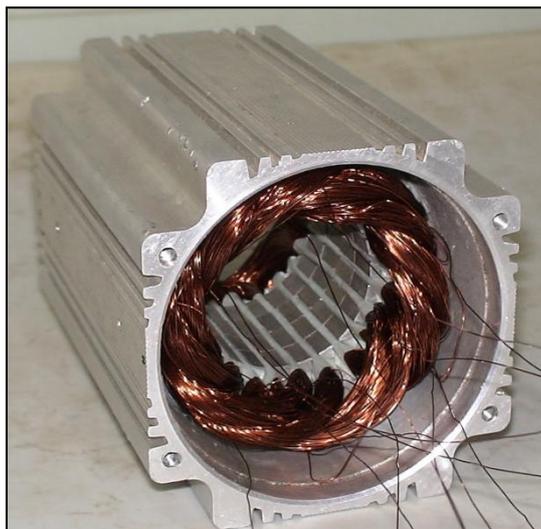
Figura 47 - Bobinagem do motor: Parcial.



Fonte: Arquivo pessoal.

A bobinagem completa, ainda sem o acabamento, é apresentada na figura 48.

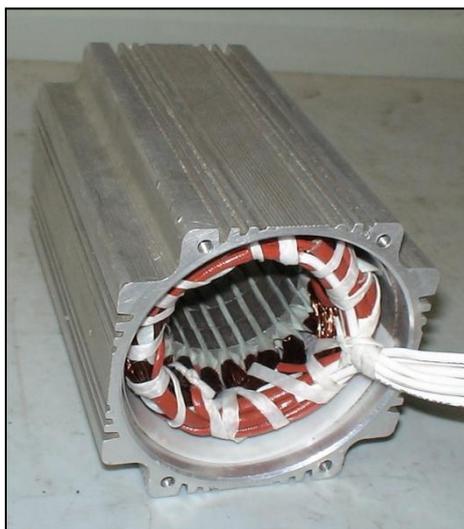
Figura 48 - Bobinagem concluída, sem fechamento de cabos.



Fonte: Arquivo pessoal.

Com a bobinagem concluída, do ponto de vistas da quantidade de fios e voltas, fez-se o fechamento dos cabos, conforme mostra a figura 49.

Figura 49 - Bobinagem concluída, com fechamento de cabos.



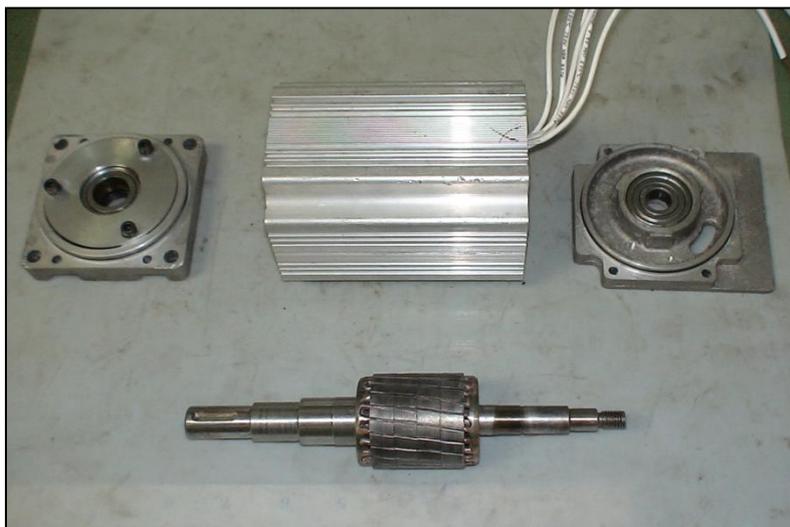
Fonte: Arquivo pessoal.

Com este procedimento foi possível deixar disponível os 6 cabos necessários para o fechamento do motor em Y (estrela), que foi a configuração utilizada nos testes, demonstrado mais a frente.

Montagem final

Considerando que o rotor e o motor já foram montados, restou apenas unir as partes em um corpo só, ou seja, fechar o motor. A figura 50 ilustra as partes que seriam unidas para o formato final do motor.

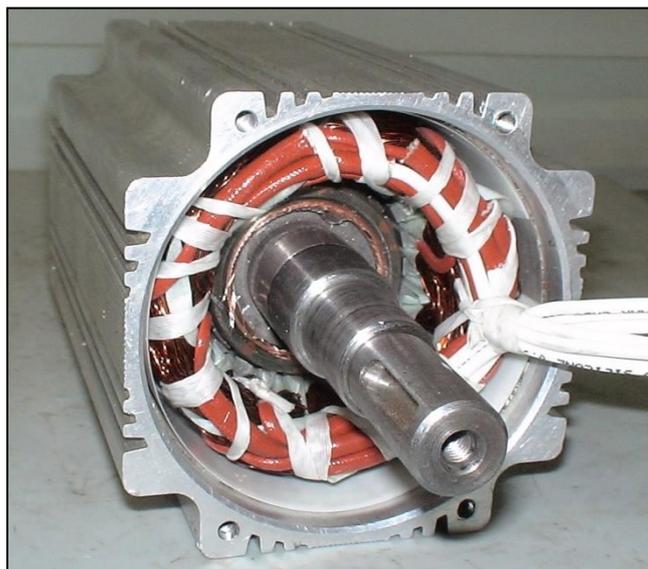
Figura 50 - Carcaça com estator, rotor e tampas com rolamentos.



Fonte: Arquivo pessoal.

Procedeu-se inserindo o rotor no interior do estator, qual é ilustrado pela figura 51. Neste momento restava apenas fazer o fechamento final com as tampas.

Figura 51 - Motor aberto com rotor inserido.



Fonte: Arquivo pessoal.

A figura 52 ilustra a forma final do motor, fechado. Observa-se que neste projeto não foi utilizado ventilador para resfriamento, uma vez que se trata de um estudo laboratorial, pois, ao perceber-se um aumento de temperatura, cessa-se o processo para proteção do material.

Figura 52 - Forma final do motor, fechado.



Fonte: Arquivo pessoal.

3.4. Ensaio da Máquina em Bancada

A máquina pronta, montada, foi levada para ensaios, padrão industrial. Estes ensaios foram realizados na empresa Voges Motores, em Caxias do Sul – RS. Foram realizados testes a vazio, com rotor bloqueado, conjugado máximo, variação de carga com tensão constante, variação de tensão com carga constante e medição de resistência das 3 fases.

Posteriormente, os resultados foram comparados aos tabelados para o motor padrão, de 90W. Cabe resaltar que, como será visto mais a frente, para o motor teste foi considerado como tensão de trabalho 190V, enquanto que no motor padrão a tensão considerada para a extração de dados tabelados foi de 220V.

3.4.1. Resultados

Medição de resistência

Efetuiu-se a medição de resistência em cada um dos 3 enrolamentos, obtendo-se como resultado $151,6\Omega$ para a fase 1, $152,15\Omega$ para a fase 2 e $152,17\Omega$ para a fase 3. O que resulta em uma diferença de, no pior dos casos, 0,37% de uma fase para outra. Valor este que pode ser considerado desprezível.

Ensaio com rotor bloqueado

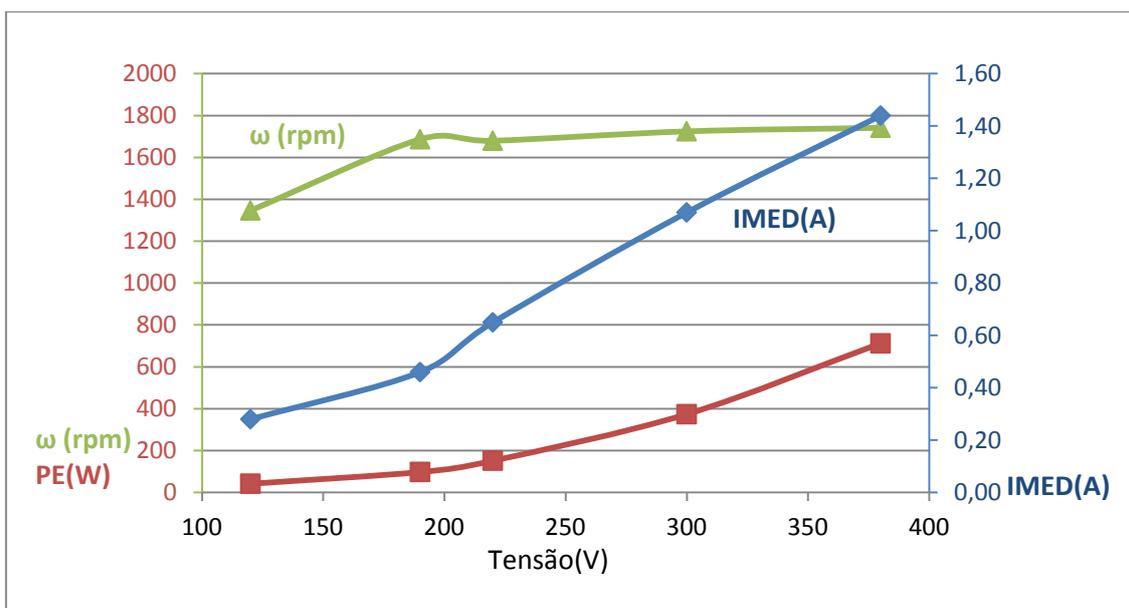
Para o ensaio de rotor bloqueado, foi possível obter como resultado, considerando uma tensão nominal aplicada de 190V, uma corrente nominal média para as 3 fases de 0,55A, implicando em uma potência elétrica de 158W. Este resultado gera uma I_p/I_n de pouco mais de 1,03. Este valor excessivamente baixo é refletido no baixo conjugado apresentado nos testes, que serão vistos mais a frente no trabalho. Neste ensaio ainda foi possível analisar o conjugado máximo desenvolvido pelo motor, considerando os limites aceitáveis da relação tensão x corrente x temperatura. O resultado foi da ordem de 0,3N.m.

Ensaio a vazio

Neste teste foi possível obter como resultado, a evolução da corrente, potência elétrica e rotação em função da variação da tensão de entrada. O gráfico que apresenta estes resultados segue ilustrado na figura 53.

Este ensaio serve para avaliar a linearidade do avanço da rotação em função das demais variáveis.

Figura 53 - Ensaio a vazio.



Fonte: Arquivo pessoal.

Segundo o resultado, a rotação apresenta um comportamento não linear e, a partir de 220V, apresenta uma elevação desprezível em seu valor, ficando praticamente constante.

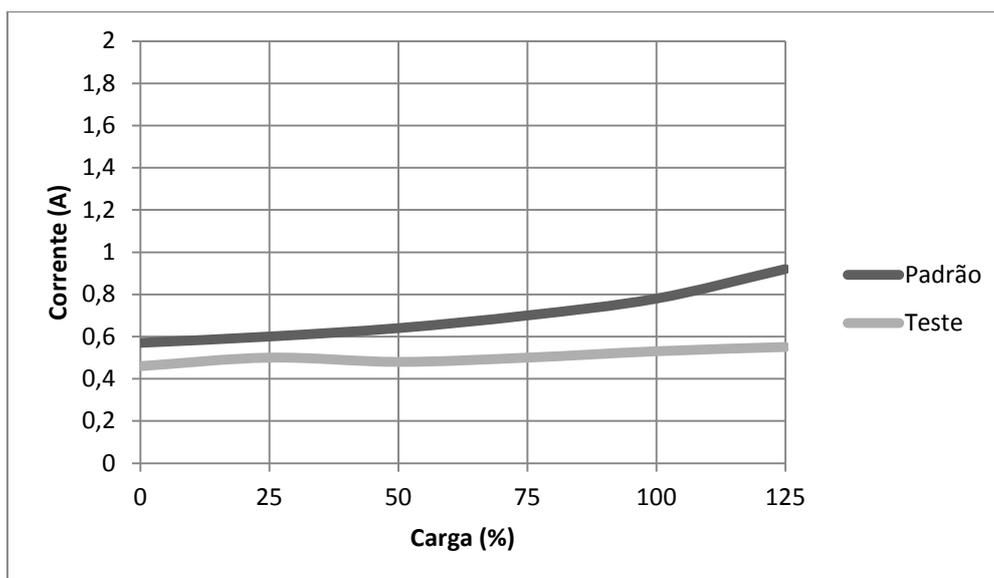
Variação de carga com tensão constante

Testes prévios mostraram que, para o enrolamento efetuado no motor, a tensão de 190V mostrou-se um valor seguro de excitação, que garantiu o não comprometimento térmico da máquina em estudo. Em função deste parâmetro, variou-se a carga aplicada ao eixo, indo de 0N.m até 0,28N.m e observou-se as demais variáveis envolvidas. Com a variação do conjugado, foi possível avaliar a corrente, o rendimento, o fator de potência, a rotação e o escorregamento do motor em teste, fazendo a comparação com resultados tabelados de um motor padrão Voges.

O gráfico da figura 54 mostra o comportamento da corrente em função da variação da carga.

O resultado mostra que a corrente do motor de teste ficou abaixo da corrente do motor padrão.

Figura 54 - Influência do % de carga na corrente.

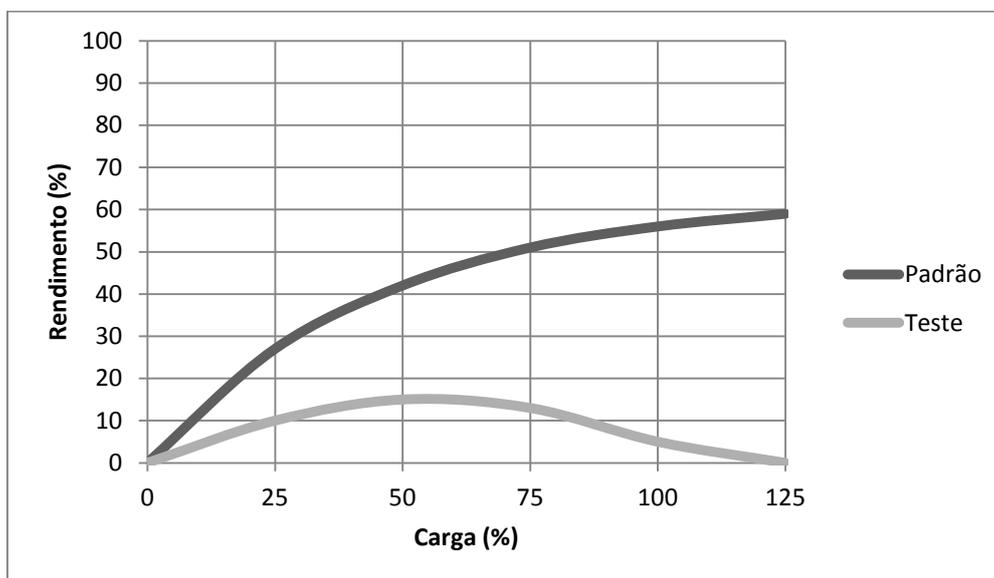


Fonte: Arquivo pessoal.

Este fato pode ser explicado, dentre outros possíveis fatores, pela tensão aplicada, que no motor padrão é 220V e no teste foi de 190V.

Em relação ao rendimento, o gráfico da figura 55 apresenta o resultado calculado no teste, em função da potência consumida x potência entregue na ponta do eixo.

Figura 55 - Influência do % de carga no rendimento.



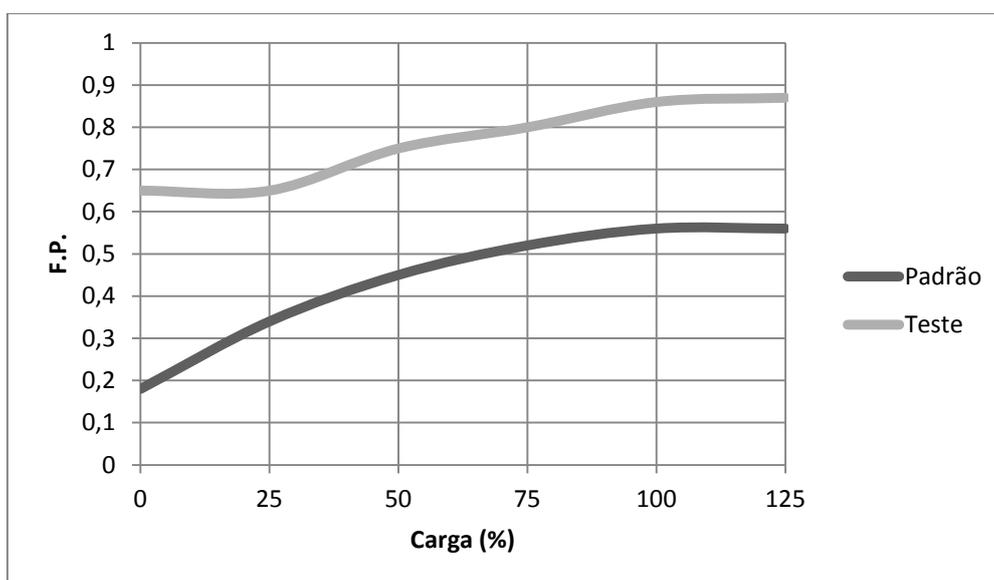
Fonte: Arquivo pessoal.

É possível extrair que, na melhor das hipóteses, o motor em teste obtém como rendimento o valor de 15,6%, ficando bastante abaixo de 60%, que é o resultado máximo apresentado pelo motor padrão. Porém, no ponto de melhor rendimento, o

resultado do teste se aproxima do motor original. Ou seja, com aproximadamente 50% da carga aplicada, o motor em estudo apresenta 15,6% contra aproximadamente 40% do motor comercial.

O gráfico da figura 56 traz que o motor em avaliação comportou-se melhor em relação ao fator de potência, que é a relação entre a potência aparente consumida da rede e a potência ativa. Esta última é a parcela transformada em trabalho propriamente dito.

Figura 56 - Influência do % de carga no fator de potência.



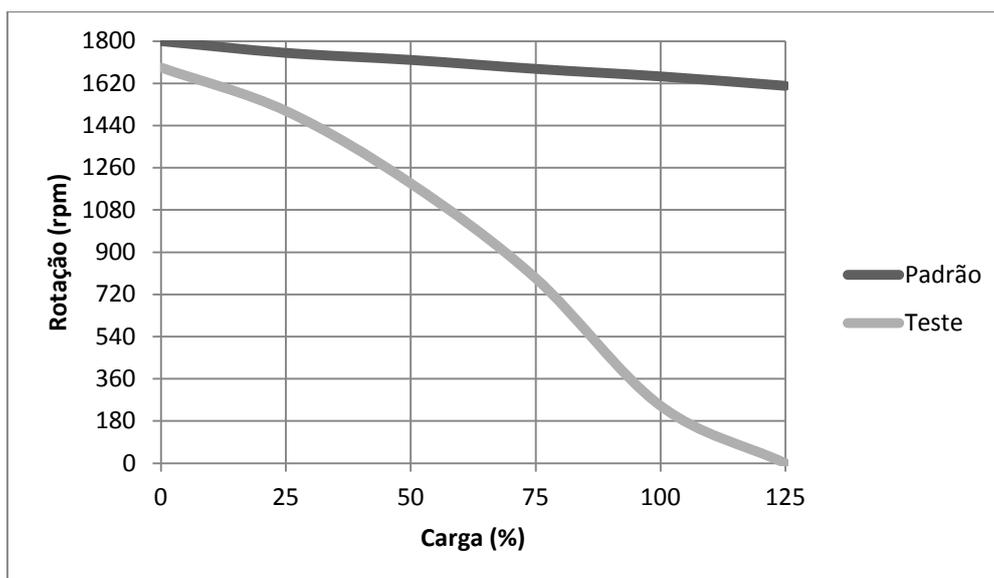
Fonte: Arquivo pessoal.

O fator de potência, acima de 60%, enquadra-se nos padrões de motores convencionais para a faixa de potência em questão, 90W.

Foi avaliado o comportamento rotacional do motor em teste, com o intuito de verificar as alterações de velocidade inerentes à alteração na carga. Os resultados seguem apresentados na figura 57, que ilustra os valores de rotação obtidos e no gráfico da figura 58, que mostra os valores de escorregamento calculados.

Pode-se observar que ao elevar a carga, a velocidade do motor em estudo decresceu bastante, chegando a travar o eixo no final do teste, o que pode ser explicado em função das altas perdas por correntes parasitas, em função da baixa resistividade, o que diminuiu o rendimento do motor.

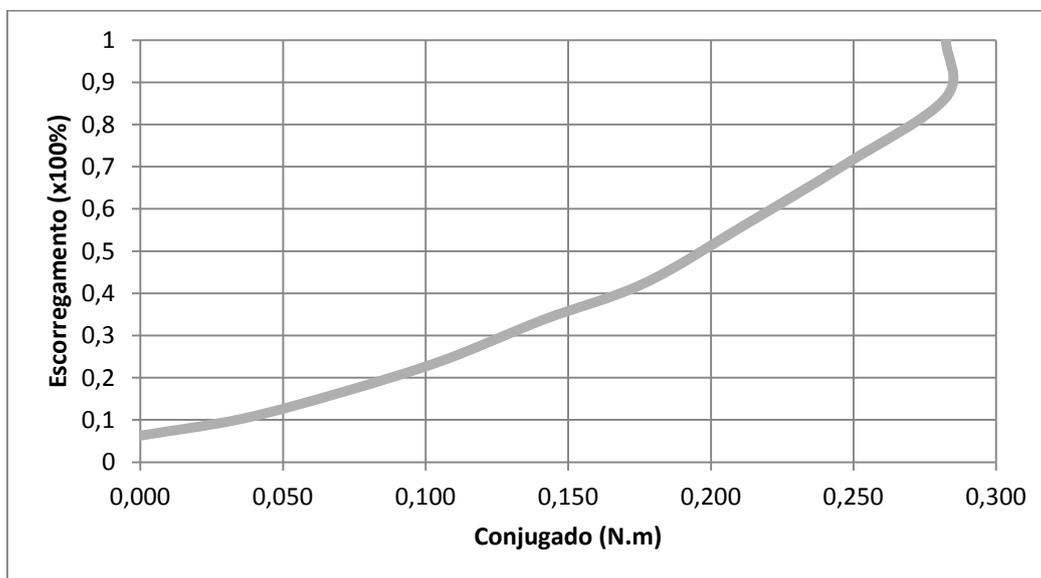
Figura 57 - Influência do % de carga na rotação.



Fonte: Arquivo pessoal.

Resultado este que não se repete no motor padrão. Do mesmo modo, o escorregamento calculado apresenta um crescimento muito rápido, em função da elevação da carga.

Figura 58 - Influência da variação do conjugado no escorregamento.

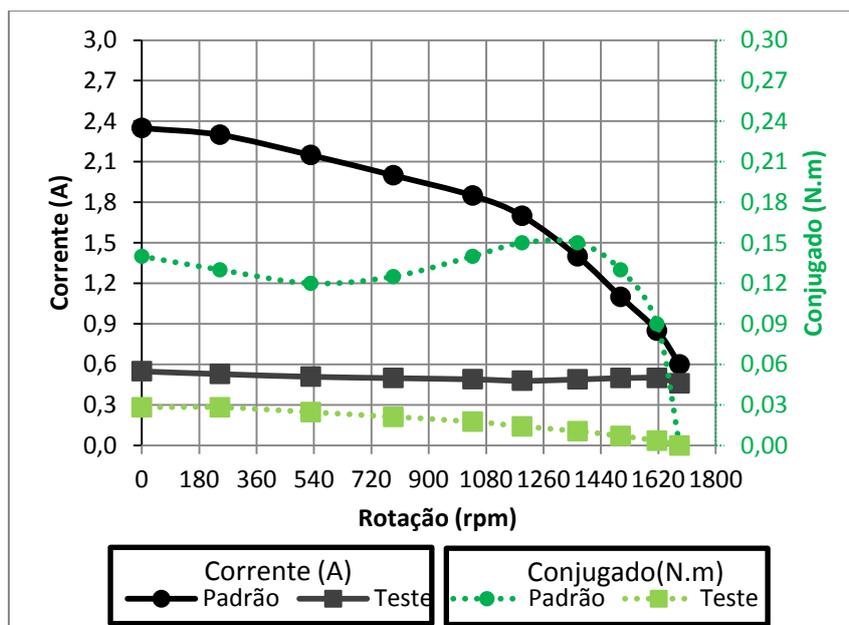


Fonte: Arquivo pessoal.

O motor em teste apresentou um alto escorregamento, sempre acima dos 5%, que é o valor mínimo para a categoria em que a máquina se enquadrou. Ao incrementar-se o conjugado aplicado, o escorregamento cresceu bastante, acarretando uma redução de energia mecânica transmitida, proveniente do enfraquecimento do campo no seu interior e das perdas apresentadas.

Com os dados que foram coletados do teste de variação de conjugado, foi montado um gráfico tradicional, apresentado na figura 59, que traz as curvas de conjugado e corrente em relação a evolução da velocidade. Neste momento é possível observar que o motor em teste tem sua maior corrente, bem como maior conjugado desenvolvido no momento de menores velocidades.

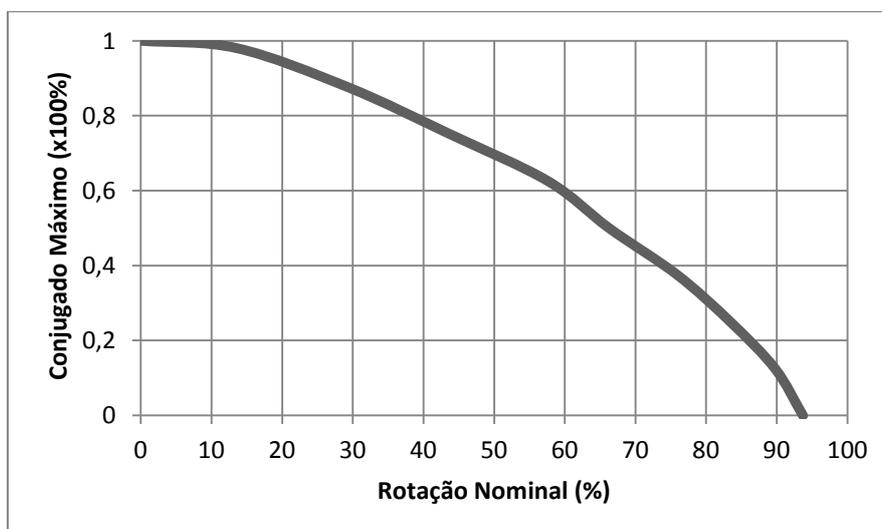
Figura 59 - Relação de corrente e conjugado com a evolução da velocidade.



Fonte: Adaptado de Voges, 2012 e arquivo pessoal.

É possível perceber que os resultados do conjugado para o motor teste ficaram bastante abaixo do motor padrão. Assim como a corrente também ficou abaixo.

Figura 60 - Curva característica do motor em teste.



Fonte: Arquivo pessoal.

Analisando especificamente a curva de conjugado testada, foi possível extrair e comparar a curva característica do motor em teste. De acordo com a comparação do gráfico da figura 18 e da figura 60, pode-se dizer que este motor enquadrou-se na categoria D, que é indicada para aplicação em cargas que apresentam conjugado e corrente de partida elevados.

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A discussão em relação aos resultados desta proposta pode ser dividida em duas partes: estudo do material e estudo da máquina montada.

4.1. Estudo do Material

De acordo com os testes efetuados, observou-se que, de acordo com o esperado, a densidade dos corpos de prova aumentou após a sinterização. Ainda, este acréscimo foi acentuado na presença de P e Si na formulação. Isto indica que estes elementos atuam como substâncias intersticiais, preenchendo espaços vazios nas vacâncias do material. Este efeito é possível em razão do fósforo promover a formação de fase líquida na sinterização, favorecendo o processo de densificação, como confirmado também por Bittencourt (2012).

Em relação a saturação do material, curva de magnetização, a formulação com 2% de P mostrou-se mais promissora, indicando que o acréscimo deste elemento até este percentual é benéfico ao material. Este resultado é corroborado através da permeabilidade e indução de saturação de cada material, figura 26 e figura 27, respectivamente, pois, uma vez que o material é mais “permeável” magneticamente, o alinhamento de seus domínios magnéticos é realizado com mais facilidade.

Esta alta permeabilidade e saturação refletem ainda na curva de histerese do material, apresentando picos de indução maiores que nas outras ligas. A facilidade de magnetização e desmagnetização colabora para a redução dos valores da força coercitiva, que é a força contrária necessária para desmagnetizar totalmente o material. Confirmando os resultados, a liga Fe2%P apresentou valores relativamente baixos, sobre as demais, ficando na ordem de 210 A/m.

Por outro lado, a área da curva, que é a perda por ciclo de histerese, tem relação maior com a resistividade da liga e, conforme se apresentou na figura 29, o acréscimo de P melhora seu resultado. A resistividade incide ainda no valor de perdas totais em núcleos magnéticos. Conforme traz a literatura, a inclusão de elementos de liga, como o fósforo, por exemplo, reduz estas perdas pelo aumento da resistividade (DIAS 1999).

Finalmente, a respeito do estudo do material necessário para a decisão de qual liga utilizar na construção da máquina, viu-se que, de uma forma geral, a liga Fe2%P é a mais adequada em relação as suas propriedades: maior resistividade, maior permeabilidade e indução e semelhante coercitividade.

4.2. Estudo da Máquina Elétrica

Para os testes com a máquina construída, faz-se a comparação com resultados tabelados de uma máquina convencional, de uso comercial. Neste caso, em função da similaridade construtiva, a relação seria com o motor de gaiola trifásico, 90W, da empresa Voges Motores.

Em relação ao ensaio de rotor bloqueado, o motor teste apresentou uma I_p/I_n de ordem de 1/3 do motor convencional. Este valor baixo de corrente traz consigo a análise da força do campo magnetizante que, em função disso, é menor. Este efeito é refletido no conjugado na ponta do eixo da máquina, que também ficou bastante inferior.

Para o ensaio a vazio, a rotação do motor comportou-se de forma adequada para tensões inferiores a 220V, qual foi projetado sua bobinagem. Ao crescer da tensão de excitação, a rotação permaneceu constante, uma vez que sem carga, o efeito do escorregamento foi praticamente nulo ou constante.

Em relação ao conjugado máximo, o resultado de 0,28N.m para o motor teste foi muito inferior ao conjugado nominal do motor convencional, que é de 1,5N.m. Isso pode ser explicado, pois, ao efetuar-se a variação gradual de conjugado até 0,28N.m, viu-se que a corrente ficou abaixo da nominal do motor padrão. Isso implica em um enfraquecimento do campo magnético no motor, explicando a redução da força que este exerce para movimentação da carga.

O motor em teste apresentou um rendimento máximo de 15,6%, contra 60% do motor Voges. Uma ressalva cabe ser efetuada nessa avaliação: o motor convencional apresentou uma curva de trabalho, figura 59, mostrando ser mais produtivo para cargas mais próximas da nominal, enquanto que a máquina teste apresenta maior conjugado em menores rotações e, por consequência, seu rendimento máximo não se dá com rotação nominal. Desta forma, avaliando-se o melhor ponto da curva teste, 15,6%, neste instante o convencional apresenta um rendimento de 40%.

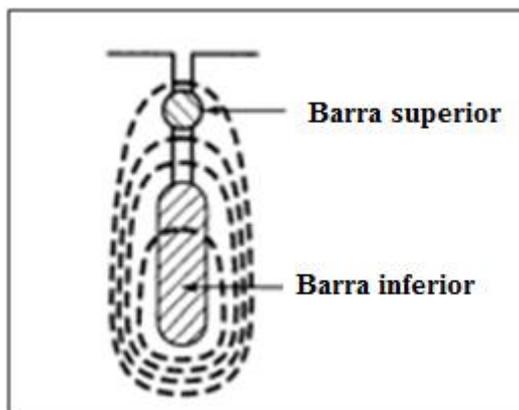
O resultado promissor apresentado no fator de potência é um indício de que uma maior parte de energia ativa consumida da rede está realmente sendo transformada em trabalho. Isso contribui para o aumento do fator de potência e possíveis reduções na conta e na geração de energia, no caso da possibilidade de uma aplicação industrial.

A verificação da curva característica, relacionando a influência da carga na rotação, transparece o enfraquecimento do campo no rotor, supracitado. Deste gráfico, figura 59, é possível visualizar que ao incremento da carga, o motor perde cada vez mais velocidade, aumentando o escorregamento. Este comportamento é característico para aplicações que exijam um elevado conjugado de partida.

Ao analisar este projeto, juntamente com o consultor do projeto, chegou-se a algumas explicações e possibilidades de melhorias no desempenho do motor, visto que o resultado de conjugado ficou bastante abaixo do padrão. Inicialmente, verificou-se que, considerando só a parte estática da máquina, não há muito que mudar, visto que foi efetuada uma bobinagem padrão.

De acordo com experiências passadas, em motores menos eficientes que os atuais, nas quais os resultados foram conseguidos empiricamente, a análise leva a crer que o ponto de melhoria seria no projeto do rotor. A tipologia utilizada neste trabalho foi a de gaiola simples, figura 35, ou gaiola única, onde somente um jogo de barras de cobre é utilizado para formar as correntes no rotor. O desenvolvimento de motores Voges, no passado, também passou por este problema de enfraquecimento de campo. A solução encontrada naquele momento foi reprojeter o rotor, fazendo-o com gaiola dupla. A figura 61 ilustra como seria a ideia da gaiola dupla.

Figura 61 - Barras de um rotor de uma gaiola dupla de esquilo.



Fonte: FITZGERALD 2006.

Esta tipologia de rotor proporciona um maior aproveitamento das correntes induzidas, elevando a intensidade do campo no rotor, proporcionando um aumento do conjugado na ponta do eixo.

Usando rotores de gaiola dupla e barras profundas, os motores de gaiola podem ser projetados para ter boas características de partida que resultam de uma resistência de rotor elevada e, ao mesmo tempo, as boas características de funcionamento resultantes de uma resistência de rotor baixa (Fitzgerald, 2006, p.331).

Cabe ressaltar que, esta proposta também está baseada na vasta experiência do consultor deste trabalho, qual desempenhou funções por mais de 15 anos no desenvolvimento de projetos da empresa Voges Motores.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisadas ligas, a partir de pó de ferro, que contendo fósforo, silício e níquel. As formulações em teste foram: Fe Puro, Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe5%Si e Fe50%Ni. Esta avaliação teve o intuito de verificar a aplicabilidade do material sinterizado em núcleos maciços de máquinas elétricas.

Após a compactação e sinterização de corpos de provas, efetuaram-se testes de curvas de histerese, magnetização e resistividade. Constatou-se que a liga Fe2%P apresentou melhores resultados em relação às demais. A perda por ciclo de histerese ficou em $7,69 \times 10^{-3}$ W/kg, enquanto que a indução de saturação esteve na ordem de 1,36T. A permeabilidade relativa ficou em 4198,7, superando a do ferro puro, por exemplo, em mais de 220%. Os resultados obtidos sobre o teste de força coercitiva foram bastante semelhantes entre as ligas estudadas.

A adição de elementos de liga favoreceu o crescimento da resistividade do material, em todos os casos. O resultado da liga Fe2%P ficou na ordem de $4,21 \times 10^{-7}$ Ω .m, contra $1,57 \times 10^{-7}$ Ω .m no caso da formulação isenta de fósforo, o Fe Puro. Com estes resultados, foi possível concluir previamente a aplicabilidade destes materiais.

Após os testes dos materiais terem sido concluídos, efetuou-se a montagem da máquina com sucesso. Esta foi colocada em funcionamento, ficando o trabalho a contento, do ponto de vista funcional.

Efetuaram-se testes em laboratório sobre o desempenho do motor teste. Estes ensaios comprovaram o correto funcionamento da máquina e trouxeram como resultados uma curva característica do tipo D, de alto escorregamento, quais as aplicações se direcionam para altos esforços na partida, como elevadores, prensas excêntricas, moinhos e etc. O resultado de conjugado apresentou-se na ordem de 18% do conjugado demonstrado na máquina convencional. Teve-se neste parâmetro o mais forte indício de que o motor precisa de um reprojeto, para que as boas características

elétricas e magnéticas inerentes a liga Fe₂P sejam aproveitadas. Conforme comentado, este reprojeto seria a concepção de um rotor de gaiola dupla, o que aproveitaria a elevada resistividade e também a maior indução nas barras curto-circuitadas.

Os resultados apresentados neste trabalho forneceram informações consistentes a respeito da viabilidade do uso de núcleos maciços em máquinas elétricas. Este argumento tem fundamento, uma vez que os dados elétricos e magnéticos das ligas foram satisfatórios e que, após a construção da máquina, esta foi testada e obteve um funcionamento adequado, embora tenha apresentado uma eficiência máxima de 15,6% contra 40% da máquina convencional.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Por se tratar de uma pesquisa de relativa abrangência de conhecimentos, torna-se importante a continuação deste trabalho. Os seguintes itens são propostos:

- Efetuar uma análise de custo, relacionando a produção de motores pelo processo convencional, chapas, e o processo através da concepção dos núcleos por metalurgia do pó;

- Para esta classe dimensional de motores, avaliar a utilização do núcleo constituído por ímãs permanentes;

- Realizar um estudo que quantifique o desempenho do motor em função da frequência de acionamento;

- Estudar as propriedades microestruturais das ligas empregadas para possibilitar um aumento de rendimento das características dos materiais.

REFERÊNCIAS

- ANISIMOVA, E. A.; OLEINIKOV, A. M.; SERDYUK, G. G. **Powder Materials with Specified Electrical and Magnetic Properties for Heavy and Two-Layer Rotors of Asynchronous Motors**. Powder Metallurgy and Metal Ceramics (English translation of Poroshkovaya Metallurgiya), v. 29, n. 9, 1990. p.741-744.
- ASM Handbook. **Powder Metal Technologies and Applications**. Volume 7. ASM International. 2000.
- BARBOZA, Juliano Soares. **Caracterização de Compósitos Magnéticos Macios Desenvolvidos Através da Metalurgia do Pó Aplicados a Núcleos de Máquinas Elétricas**. Dissertação. PPGE3M: UFRGS, 2009.
- BITTENCOURT, Sérgio Deitos. **Caracterização de Ligas Magnéticas Sinterizadas para Aplicação em Núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas**. Dissertação. PPGE3M: UFRGS, 2009.
- BRANDBURY, S. **Powder Metallurgy Equipment Manual**. New Jersey: ISBN, 1986.
- BRITO, F., MEDEIROS, K., LOURENÇO, J.. Um Estudo Teórico Sobre a Sinterização na Metalurgia do Pó. **Holos - ISSN 1807-1600**, 2008.
- CALLISTER W. D. **Ciencia e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. 4 ed. Mcgraw-Hill, 2003. 770 p.
- CHIAVERINI, V.; **Metalurgia do Pó: Técnica e Produtos**. 4 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001.
- COLTON, J. S. **Metal Powder Processing**. Georgia Intitute of Technology, ME 4210: Manufacturing Processes and Engineering, 2009. 29 p.
- CREMONEZI, A. **Materiais Magnéticos Moles. A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. Metallum Eventos Técnicos, São Paulo, p. 79-84, 2009.
- CUNHA, M. A.; PAOLINELLI, S. da C. **Effect of the annealing temperature on the structure and magnetic properties of 3% Si non-oriented steel**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 254-255, 2003. p. 379-381.

DAS, J. et al. **Novel powder metallurgy technique for development of Fe–P-based soft magnetic materials.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials. p.906–915, 2008

DIAS, M. M.; DIAS, A. M.; MUSSKOPF, A. **Desenvolvimento de Aços Sinterizados FE-NI-MO-P,** Revista Liberato, v.6, n.6, 2005. p. 49-55.

DIAS, Moises De Mattos. **Construção de Uma Máquina Síncrona de Relutância Trifásica com Rotor de Material Magnético Macio Sinterizado.** Tese. PPGE3M:UFRGS, 1999.

_____. **Obtenção de Ímãs de Ferrita de Estrôncio Anisotrópicos.** Dissertação. PPGE3M:UFRGS, 1996.

ESSWEIN Jr., Jorge Alberto Lewis. **Desenvolvimento de Compósitos Magnéticos Macios Utilizados em Núcleos de Máquinas Elétricas.** Dissertação. PPGE3M:UFRGS, 2009.

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

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

JANSSON, P. **Soft Magnetic Materials for A.C. Applications.** Powder Metallurgy. v. 35, n.1, 1992. p. 63-66.

JILES, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials.** 2 ed. Boca Raton: Chapman and Hall, 1998.

KHRAISAT, W.; NYBORG, L. **Liquid phase sintering of ferrous powder by carbon and phosphorus control.** Powder Metallurgy, v. 46, n. 3, 2003. p. 265-270.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores.** Rio de Janeiro: Editora Globo, 1986.

KRAUS, J.D. **Electromagnetics.** 4 ed. New York: McGraw-Hill, 1992.

KRAUSE, R. F.; BULARZIK, J. H.; KOKAL, H. R. **A New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications.** Journal of Materials Engineering and Performance, v. 6, n. 6, 1997. p. 710-712.

LUNA, Hilbert Harold. **Desenvolvimento de Ímãs de Nd-Fe-B Aplicados em Máquinas Elétricas (Motores).** Tese. PPGE3M:UFRGS, 2012.

Magnetismo de materiais. MSPC.

<<http://www.mspc.eng.br/eleomag/eletrm0260.shtml>> Acesso em 19 Jan. 2012.

MARTINS, Vinícius. **Estudo das Propriedades Mecânicas dos Compósitos WC-6Co, WC-10Co, WC-20Co, WC-6Co-6Ni, WC-6Co-12Ni Obtidos por Metalurgia do Pó Convencional para Aplicação em Anéis de Selos Mecânicos.** Dissertação. PPGE3M:UFRGS, 2010.

Metalurgia do Pó. Essel.

<<http://www.essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/65proc.pdf>> Acesso em 27 Set. 2011.

Misturador de Pó Tipo V Modelo JAA-INC-2003. Incal.

<<http://www.incalmaquinas.com.br/produtos1.php?id=104>> Acesso em 27 Set. 2011.

MOON, F. C. **Superconducting Levitations Applications to Bearings and Magnetic Transportation.** Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.

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.

Motores Elétricos de Corrente Alternada. Catálogo WEG. 2010.

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

O Processo de Metalurgia do Pó. Qualisinter.

<<http://www.qualisinter.com.br/Processo.htm>> Acesso em 27 Set 2011.

PELEGRINI, Leandro. **Influência Do Tempo De Moagem Por Mecano-Síntese Nas Propriedades Da Liga Magnética Fe-3%Si-0,75%P Aplicada Em Núcleos De Máquinas Elétricas.** Dissertação. PPGE3M:UFRGS, 2012.

PERSSON, M.; JANSSON, P.; JACK, A. G.; MECROW, B. C. **Soft Magnetic Composite Materials - Use for Electrical Machines.** Electrical Machines and Drives, n. 412, 1995. p. 242-246.

RICHARDSON, D. V. **Rotating Electric Machinery and Tranformer Tecnology.** 2 ed. Virginia-USA: Reston Publishing Company, Inc., 1982. 635p.

RODRIGUES, Vanessa Isabel do Santos et al . Elaboração e caracterização de compósitos magnéticos. **Rem: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 64, n. 4, Dec. 2011.

SEVER, S.; LIVIU., **Introduction to Powder Metallurgy.** “Constantin Brâncusi” University – Engineering Faculty University’s Day. 8th International Conference. p.24-26, 2002.

SILVA, M. C. A.; BOLFARINI, C.; KIMINAMI, C. S.; GUSSON, P. P. **Magnetic Properties of Spray Formed Fe-3%wtSi, Fe-5%wtSi and Fe-6%wtSi Alloys.** Materials Science Forum, v. 416, n. 4, 2003. p. 113-118.

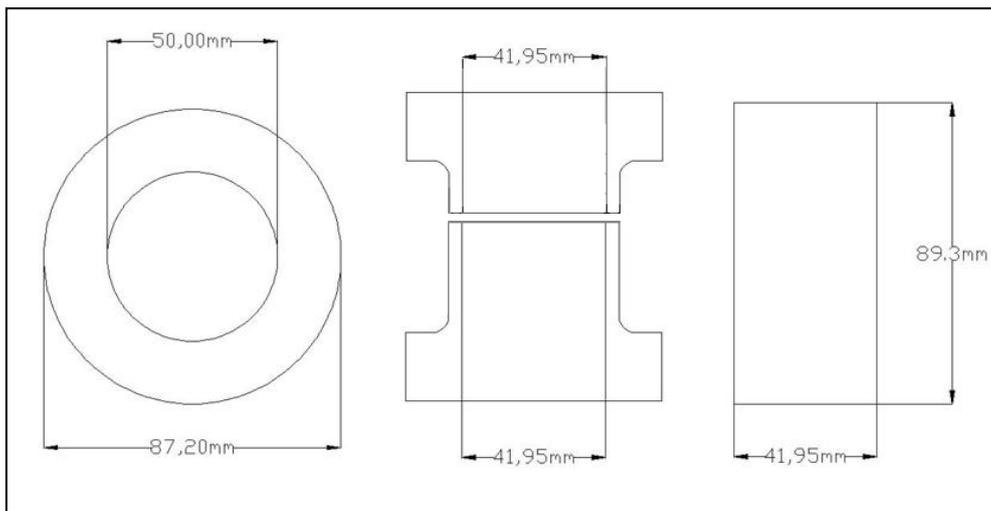
Standard Test Method for dc Magnetic Properties of Materials. **ASTM 773:** Using Ring and Permeameter Procedures with dc Electronic Hysteresigraphs. West Conshohocken, 2009.

THÜMMLER, F. OBERACKER, R. **An Introduction to Powder Metallurgy.** London: The Institute of Materials, 1993.

VERMA, N.; UPADHYAYA, A. **Effect of Phosphorus addition as sintering activator in Sinter-Hardened alloy steels.** Department of Materials and Metallurgical Engg, Indian Institute of Technology, 2007. 26 p.

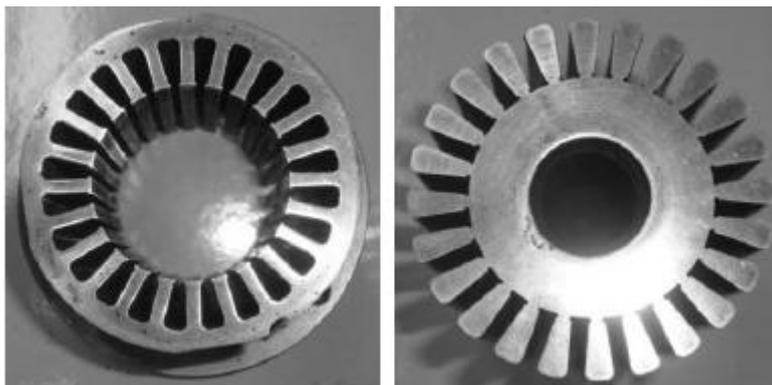
ANEXOS

ANEXO A – Desenho técnico da matriz utilizada para compactação dos corpos de prova.



Fonte: Arquivo pessoal.

ANEXO B – Matriz utilizada para compactação do núcleo do estator.



Fonte: ESSWEIN 2009.