

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 CORRENTE
CONTÍNUA UTILIZANDO MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS A PARTIR DA
METALURGIA DO PÓ

Franciele Peruchi Ronchi

Dissertação para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2015

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

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

PPGE3M

CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM MOTOR DE CORRENTE
CONTÍNUA UTILIZANDO MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS A PARTIR DA
METALURGIA DO PÓ

FRANCIELE PERUCHI RONCHI
Engenheira Eletricista

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

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2015

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

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior
UNILA

Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli
UFSC

Dr. Eng. Alexandre Polozine
UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ing. Lírío 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. Lírío Schaeffer, pelo fornecimento da estrutura e equipamentos utilizados na execução deste projeto.

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

Ao GDER, Grupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis, pela dedicação em nossos projetos e parceria nas atividades desenvolvidas.

Às empresas Höganäs e Imobras Motores Elétricos, principalmente ao Sr. Ireno Antônio dos Reis e Ismael Britz, pois foram essenciais na realização deste projeto.

Ao Laboratório de Máquinas Elétricas e Acionamentos Elétricos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - LMEAE, coordenado pelo Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, pela disponibilidade na realização dos testes de caracterização magnética e principalmente ao Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro que acompanhou os testes.

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

Meus agradecimentos também ao Prof. João Mota, que muito me auxiliou na elaboração desta dissertação; aos colegas Wilson C. Rodrigues, Rodrigo Gonzatti e André Tavares, e a todos que, de alguma forma, colaboraram no desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Máquinas elétricas rotativas	20
2.1.1 Motor de Corrente Contínua	22
2.2 Propriedades Magnéticas.....	25
2.3 Fatores que determinam o desempenho das máquinas elétricas de corrente contínua	26
2.4 Metalurgia do pó	27
2.5 Materiais magnéticos macios por metalurgia do pó.....	29
2.5.1 Características do compósito magnético macio	32
2.6 Aplicação de materiais magnéticos macios por metalurgia do pó em máquinas elétricas.....	33
2.7 Somaloy®.....	35
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	39
3.1 Ligas Utilizadas na Confecção dos Rotores	39
3.2 Matrizes utilizadas para compactação dos corpos de prova.....	41
3.4 Obtenção dos Corpos de Prova dos Materiais	43
3.3.1 Matéria Prima Empregada no Estudo.....	43
3.3.2 Compactação dos corpos de prova dos materiais.....	43
3.3.3 Tratamento térmico dos corpos de prova	45
3.4 Obtenção das Propriedades Físicas e Magnéticas dos Corpos de Prova.....	47
3.4.1 Densidade dos corpos de prova	47
3.4.2 Resistividade Elétrica	48
3.4.3 Propriedades magnéticas dos materiais empregados no estudo	49

3.5	Projeto da Máquina Elétrica Proposta	52
3.5.1	Projeto das matrizes	54
3.5.2	Compactação	56
3.5.3	Tratamento Térmico	57
3.5.4	Montagem da máquina proposta.....	58
3.5.5	Ensaio da máquina	59
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	61
4.1	Estudo do Material	61
4.2	Comparativo do Motor Elétrico CC Proposto.....	63
5.	CONCLUSÕES	68
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
	ANEXOS	75
	ANEXO A - GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS ENVOLVIDAS NO ESTUDO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS	76
	ANEXO B - METALURGIA DO PÓ	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1	Máquinas elétricas de trabalhos já realizados no LDTM	17
Figura 1. 2	Sequência lógica seguida durante o trabalho	19
Figura 2. 1	Operações de uma máquina elétrica rotativa.	21
Figura 2. 2	Universo tecnológico em Motores Elétricos	21
Figura 2. 3	Princípio de funcionamento de um Motor CC – Estágio 1	24
Figura 2. 4	Princípio de funcionamento de um Motor CC – Estágio 2	24
Figura 2. 5	Princípio de funcionamento de um Motor CC – Estágio 3	25
Figura 2. 6	Ciclo de Histerese de um Material Magnético.	26
Figura 2. 7	Representação esquemática das etapas do processo de metalurgia do pó	29
Figura 2. 8	Representação esquemática do SMC	31
Figura 2. 9	(a) Motor ABS comercial de chapas laminadas, (b) Motor ABS com novo design em SMC.....	35
Figura 2. 10	Nível de desempenho das diferentes formulações do Somaloy®	36
Figura 2. 11	Posicionamento Somaloy® entre outros materiais quanto indução x Frequência.....	37
Figura 2. 12	Tratamento Térmico para o Somaloy 700 3P fornecido pela fabricante	38
Figura 3. 1	Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro: (a) Matriz, (b) Punção superior, (c) Punção inferior.	41
Figura 3. 2	Projeto matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro.	42
Figura 3. 3	Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel: (a) Matriz, (b) Punção inferior, (c) Punção superior, (d) Pino macho.	42
Figura 3. 4	Projeto Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel	43
Figura 3. 5	Amostras cilíndricas (a) e Amostras em anel (b).	44
Figura 3. 6	Amostras cilíndricas Somaloy 700 1P, à esquerda verde e à direita curada. .	45
Figura 3. 7	Ciclo de tratamento térmico para o Somaloy 700 3P	46
Figura 3. 8	Ciclo de tratamento térmico para a liga Fe2%P	47
Figura 3. 9	Corpo de prova para determinação da resistividade.	48
Figura 3. 10	Ohmímetro Digital DO5 (Cropico), utilizado para a obtenção da resistência das amostras.....	49
Figura 3. 11	(a) Anel isolado com fita, (b) Anel completamente bobinado	50
Figura 3. 12	Equipamento Remagraph-Remacomp C-710.....	50

Figura 3. 13	Curva de histerese Somaloy 700 1P	51
Figura 3. 14	Curva de magnetização Somaloy 700 1P	51
Figura 3. 15	Curva de permeabilidade magnética Somaloy 700 1P	52
Figura 3. 16	Imagem ilustrativa eletroventilador, Imobras 24V, CC.	53
Figura 3. 17	Desenho técnico eletroventilador, Imobras 24V, CC.	53
Figura 3. 18	Desenho técnico do motor em corte.	54
Figura 3. 19	Estrela de aço do motor base	54
Figura 3. 20	Projeto dimensional da Matriz para compactação do núcleo rotor	55
Figura 3. 21	Punção inferior (a), matriz para confecção do núcleo rotor (b), punção superior (c).....	56
Figura 3. 22	Compactação na matriz do núcleo do rotor.	56
Figura 3. 23	Peça compactada sendo retirada da matriz.	57
Figura 3. 24	Compactado verde (esquerda) e após tratamento térmico (direita) para os materiais utilizados.....	58
Figura 3. 25	Prensagem do pacote no eixo (a, b), Isolamento do pacote (c, d), Posicionamento do coletor (e), Bobinamento (f), Núcleos finais balanceados (g, h).....	58
Figura 3. 26	Teste em bancada dos motores (Dinamômetro).	59
Figura 3. 27	Teste em bancada dos motores (Ensaio Gerador).	60
Figura 4. 1	Correlação entre potência e torque	65
Figura 4. 2	Correlação entre corrente e torque	66
Figura 4. 3	Relação entre as perdas com o aumento do torque.....	66
Figura 4. 4	Relação entre a eficiência dos motores com o aumento do torque.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1	Propriedades dos materiais Somaloy 700 1P e Somaloy 700 3P	37
Tabela 3. 1	Ligas Utilizadas	40
Tabela 3. 2	Pressões Utilizadas na Compactação das Amostras	44
Tabela 3. 3	Forças Utilizadas na Compactação das Amostras	45
Tabela 3. 4	Densidade aparente média a verde e após o tratamento térmico	48
Tabela 3. 5	Resistividade média (ρ) dos corpos de prova na forma de anel.....	49
Tabela 3. 6	Pressão (mmCA), vazão (m ³ /h) e corrente (A) do eletroventilador.....	53
Tabela 3. 7	Forças Utilizadas na Compactação do Núcleo Rotor	57
Tabela 4. 1	Comparação da densidade medida no material com a densidade fornecida pela fabricante (Somaloy®)	61
Tabela 4. 2	Comparação da resistividade medida no material com a resistividade fornecida pela fabricante (Somaloy®)	62
Tabela 4. 3	Comparação das propriedades magnéticas encontradas	63
Tabela 4. 4	Comparação Permeabilidade medida x Permeabilidade literatura (Somaloy®).....	63
Tabela 4. 5	Desempenho dos motores em comparação a máquina convencional	64

LISTA DE ABREVIATURAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EFF _n	Eficiência nominal
GDER	Grupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
LMEAE	Laboratório de Máquinas Elétricas e Acionamentos Elétricos
M/P	Metalurgia do Pó
SMC	Compósito Magnético Macio
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal	[m ²]
B	Indução magnética	[T]
BH _{Max}	Produto energético	[J/m ³]
B _m	Indução de saturação ou máxima indução	[T]
B _r	Retentividade magnética ou magnetização remanente	[T]
dl	Comprimento infinitesimal	[m]
Ds	Elemento infinitesimal de superfície	[m ²]
f	Frequência	[Hz]
F	Força	[N]
h	Altura	[m]
H	Campo magnético	[A/m]
H _c	Coercitividade magnética ou força coercitiva	[A/m]
I	Corrente elétrica	[A]
I _E	Corrente elétrica de entrada	[A]
I _R	Corrente no resistor	[A]
J	Densidade de corrente	[A/m ²]
J _S	Polarização de magnetização	[T]
l	Comprimento	[m]
P	Potência	[W]
P _p	Potência no primário	[W]
P _s	Potência no secundário	[W]
R	Resistência	[Ω]
T _{Def}	Tempo de defasagem	[s]
T	Período	[s]
V	Tensão elétrica	[V]
V _e	Tensão de entrada	[V]
V _R	Tensão no resistor	[V]
V _s	Tensão de saída	[V]

Símbolos Gregos

α	Ângulo entre a perpendicular a área e a direção	[°]
η	Rendimento	[%]
$\cos\theta$	Fator de potência	[Adimensional]
μ	Permeabilidade magnética do meio	[H/m]
$\mu_{\text{máx}}$	Permeabilidade magnética máxima	[H/m]
μ_r	Permeabilidade magnética relativa	[Adimensional]
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo	[H/m]
ρ	Resistividade elétrica	[$\Omega \cdot \text{m}$]
σ_e	Tensão de escoamento	[MPa]
φ	Fluxo magnético total	[Wb]
\mathfrak{R}	Relutância magnética	[Ae/Wb]
\mathfrak{F}	Força magnetomotriz	[Ae]
\emptyset	Diâmetro	[m]

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um motor de corrente contínua, de imãs permanentes, onde o rotor, usualmente construído a partir de chapas de aço laminadas, foi substituído por blocos produzidos a partir do processo de metalurgia do pó. Para o desenvolvimento das peças utilizou-se três compósitos nos testes: a liga Fe₂P e as ligas comerciais Somaloy® 700 3P e 700 1P, que passaram por uma caracterização e análise de suas propriedades antes de sua utilização no rotor. A matriz para compactação foi projetada e confeccionada como parte deste trabalho e os três compósitos preparados para a confecção das peças para o rotor do motor de corrente contínua. Os motores, com os diferentes rotores, foram ensaiados em bancada, para análise de seu desempenho e os resultados obtidos com os novos rotores foram comparados com os dados do motor com rotor convencional, feito com chapas de aço laminadas.

ABSTRACT

This work aims to describe the development of a DC motor with permanent magnets, where the rotor core, usually constructed from laminated steel sheets, was replaced by blocks produced from the powder metallurgy process. For development of parts, three composites were used for the tests, the alloy Fe₂P, the commercial alloys Somaloy®, 700 1P and Somaloy®700 3P. The materials have gone through a characterization and analysis of their properties before their use in the rotor. A compression die was designed and built as part of this work, the materials were prepared in the final form of the rotor, coiled, and set for testing. The engines with different rotors were placed for testing and analysis of their performance. The results obtained from the new rotors were compared with the conventional motor from which the rotor core is made of laminated steel sheets.

1. INTRODUÇÃO

A construção de máquinas elétricas rotativas é um assunto que está usualmente em estudo, principalmente no desenvolvimento de novas topologias, como também pela busca de materiais dos componentes necessários para sua fabricação que apresentem maior rendimento, eficiência e menores custos. Esta pesquisa é direcionada para o avanço deste setor objetivando a otimização da máquina de corrente contínua [1- 4].

As exigências sobre as máquinas elétricas estão mudando constantemente. O avanço na eletrônica de potência abriu novas oportunidades no que se refere à frequência de operação. A engenharia atual exige um desenvolvimento integrado das partes, onde o motor se torna também uma parte do “*design*” de um produto e não somente um item a ser adicionado durante um processo de construção [5-7].

Os núcleos do estator e do rotor das máquinas elétricas atuais, em sua grande maioria são construídos com chapas de aço laminadas, de baixo carbono e com espessuras entre 0,35 e 0,5mm. Para máquinas que necessitam de maior rendimento as chapas possuem em sua composição de 1 a 3% de silício. A confecção dos núcleos magnéticos consiste em laminação, estampagem, tratamento térmico, empacotamento e fixação. A solução utilizada para a redução das perdas por correntes induzidas, no caso das chapas de aço de baixo carbono, baseia-se na isolação por tratamento térmico, onde o conjunto de chapas é inserido no forno para criar uma camada de oxidação em sua superfície [3].

Um dos grandes desafios atuais está no desenvolvimento e produção de materiais magnéticos com custos baixos, mas que garantam as características adequadas para a utilização em máquinas elétricas. A fim de garantir sua otimização com a utilização de novos materiais, graças aos avanços tecnológicos, diferentes tipos de materiais magnéticos têm sido utilizados, incluindo ferro puro e as suas ligas, capazes de substituir os materiais tradicionais utilizados na parte ativa das máquinas elétricas. Diferentes aspectos do processamento, propriedades, efeito de aditivos nas propriedades magnéticas e aplicações desses materiais já foram discutidos por muitos pesquisadores. Materiais, incluindo materiais amorfos, materiais nanocristalinos e materiais compósitos magnéticos macios, hoje são os mais recentes desenvolvimentos na história magnética. Desta forma, foi possível, não só a fabricação de ímãs permanentes, mas também

materiais magnéticos capazes de substituir os materiais tradicionalmente usados nas partes magnéticas ativas das máquinas elétricas [8].

O Processo de Fabricação por Metalurgia do Pó (M/P), caracterizado pela obtenção de peças inteiras, está entre os processos utilizados para o desenvolvimento desses novos materiais. As peças produzidas a partir do processo de M/P utilizam principalmente ligas de ferro, com adição de outros materiais, que inseridas nos núcleos das máquinas elétricas, podem resultar em vantagens como menores custos de produção, devido à redução de peças no projeto. Esses materiais são chamados de compósitos magnéticos macios (*Soft Magnetic Composites* - SMC), que aparecem no mercado atual com o intuito de participar dessa nova etapa na construção de máquinas elétricas e no conceito de projeto integrado. Este conceito de projeto integrado refere-se não somente na substituição dos núcleos das máquinas elétricas, mas em novos projetos, uma nova concepção, para que se utilize o máximo das melhores características do novo material e que toda a máquina seja otimizada ao final do processo [3].

O material SMC não é novo, mas por muito tempo estava restrito às utilizações em altas frequências. Foi com o passar dos anos e o desenvolvimento em melhores processos, principalmente melhorias em suas propriedades, que um novo grupo de compósitos magnéticos macios está se expandindo, principalmente para utilização em baixa e média frequência.

Ao ser integrado cuidadosamente a um projeto, o material SMC pode proporcionar melhora no desempenho, redução de peças, maior integração entre as partes, menor custo e tudo isso de uma forma menos agressiva ao meio ambiente [7].

Máquinas elétricas de trabalhos realizados no LdTM, aplicando a substituição dos materiais em seus núcleos podem ser visualizadas na Figura 1. 1.



Figura 1. 1 Máquinas elétricas de trabalhos já realizados no LDTM.

Trabalhos anteriores realizados no Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM da UFRGS [1; 6], em parceria com outras instituições apoiadoras, vem contribuindo com o desenvolvimento e estudo de novos materiais para utilização em máquinas elétricas rotativas. O principal material utilizado para os estudos até o momento foram as misturas de pó de ferro com diferentes percentuais, acrescidos de Fósforo, Silício e Níquel.

1.1 Objetivos

Com o intuito de colaborar com esta área de desenvolvimento e testes de novos materiais para aplicação em máquinas elétricas, este trabalho tem por objetivo a construção de rotores para um motor de corrente contínua, utilizando o processo de fabricação da metalurgia do pó, com diferentes materiais, a fim de comparar seu desempenho ao final do processo, tendo como base um motor CC, 24V, comercial.

Esta topologia de motor foi selecionada, considerando que ainda não havia sido estudada em trabalhos anteriores no LDTM, como também pelo interesse ocorrido durante as pesquisas em caráter de aplicação industrial do mesmo. Desta forma, diferente de outros trabalhos realizados, este esteve focado na aplicação prática deste motor.

Tendo em vista a variedade de ligas magnéticas obtidas a partir do ferro como elemento principal, estudadas pelo Grupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis (GDER), entre elas: Ferro Puro, Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe5%Si e Fe50%Ni, considerando os resultados com elas obtidos, um dos materiais escolhidos para os testes foi o Fe2%P, liga composta de pó de ferro e dois por cento de pó de fósforo, que obteve maior rendimento para aplicação em núcleos de máquinas elétricas [1].

Outro intento deste trabalho concentrou-se na utilização das ligas magnéticas comerciais, fabricadas pela empresa Höganäs, da Suécia, que em 1996 introduziu no mercado o primeiro material para este fim, o Somaloy®. Julgando este trabalho de grande importância para o conhecimento destes materiais perante a indústria, a empresa disponibilizou dois de seus compósitos para que fossem testados no núcleo do motor Somaloy 700 1P e Somaloy 700 3P, fechando assim o grupo de compósitos que foram

utilizados neste trabalho.

O fluxograma visto na figura 1.2 apresenta a sequência lógica do trabalho.

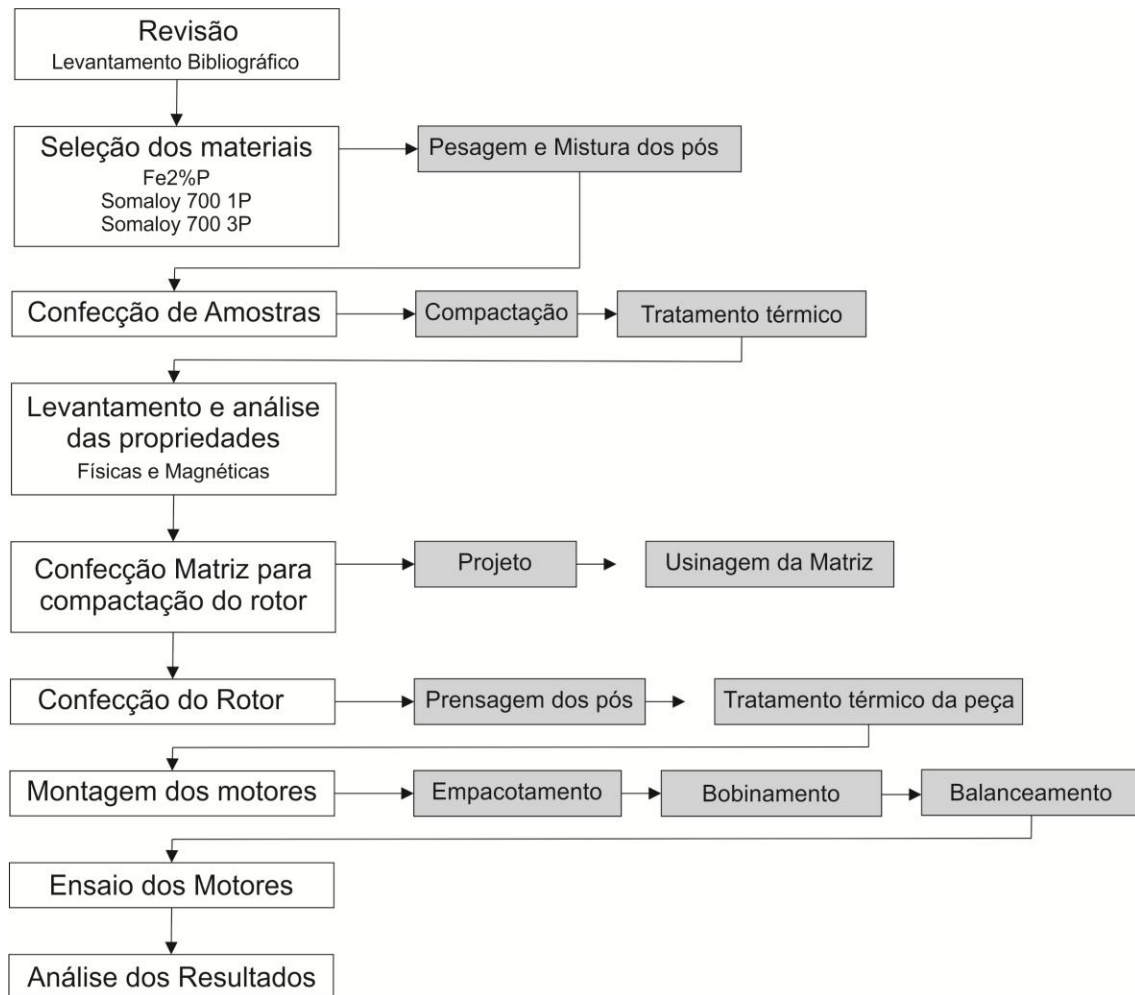


Figura 1. 2 Sequência lógica seguida durante o trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica, sobre assuntos importantes dentro da literatura, que são necessários para o entendimento e compreensão deste trabalho. Os assuntos aqui abordados abrangem principalmente a área de máquinas elétricas, com ênfase no motor de corrente contínua e materiais magnéticos macios por metalurgia do pó e a utilização destes em máquinas elétricas rotativas.

2.1 Máquinas elétricas rotativas

As máquinas elétricas são máquinas destinadas a transformar energia elétrica em mecânica e vice-versa.

Michael Faraday apresentou em 1831, a primeira indicação da possibilidade de intercâmbio entre a energia elétrica e mecânica. Faraday descreveu qualitativamente a indução de tensões por parte de um campo magnético variável no tempo. Esta descoberta implicou em um grande avanço no progresso da ciência, dando início ao gerador e ao motor elétrico, entre outros dispositivos que utilizam estes princípios [9; 10].

A conversão eletromecânica de energia ocorre quando se relacionam as forças elétricas e magnéticas do átomo com a força mecânica aplicada à matéria e ao movimento. Desta forma, tanto a energia elétrica pode ser convertida em energia mecânica quanto à energia mecânica pode ser convertida em elétrica por meio das máquinas elétricas [9].

Este processo de conversão produz também outras formas de energia, como o calor, que se relaciona como perdas e que foram sendo otimizadas e reduzidas ao mínimo para que exista uma conversão relativamente direta ao final do processo, em qualquer que seja a direção [9].

As máquinas elétricas rotativas podem ser classificadas segundo a transformação de energia: motora, quando recebe energia elétrica e converte em energia mecânica e geradora, quando recebe energia mecânica e converte em energia elétrica, como demonstrada na Figura 2. 1 [9; 11].

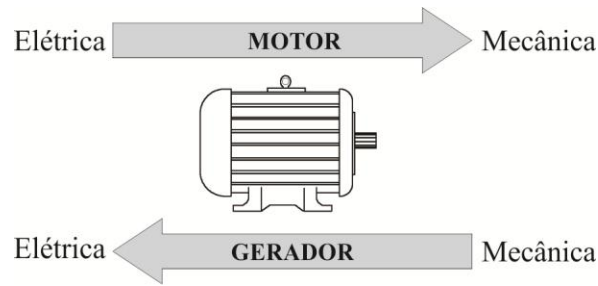


Figura 2. 1 Operações de uma máquina elétrica rotativa.

As máquinas elétricas também podem ser classificadas de acordo com o seu princípio de funcionamento, características construtivas e aplicações. A Figura 2. 2 mostra um diagrama, de forma geral, com o universo tecnológico dos motores elétricos [9; 12].

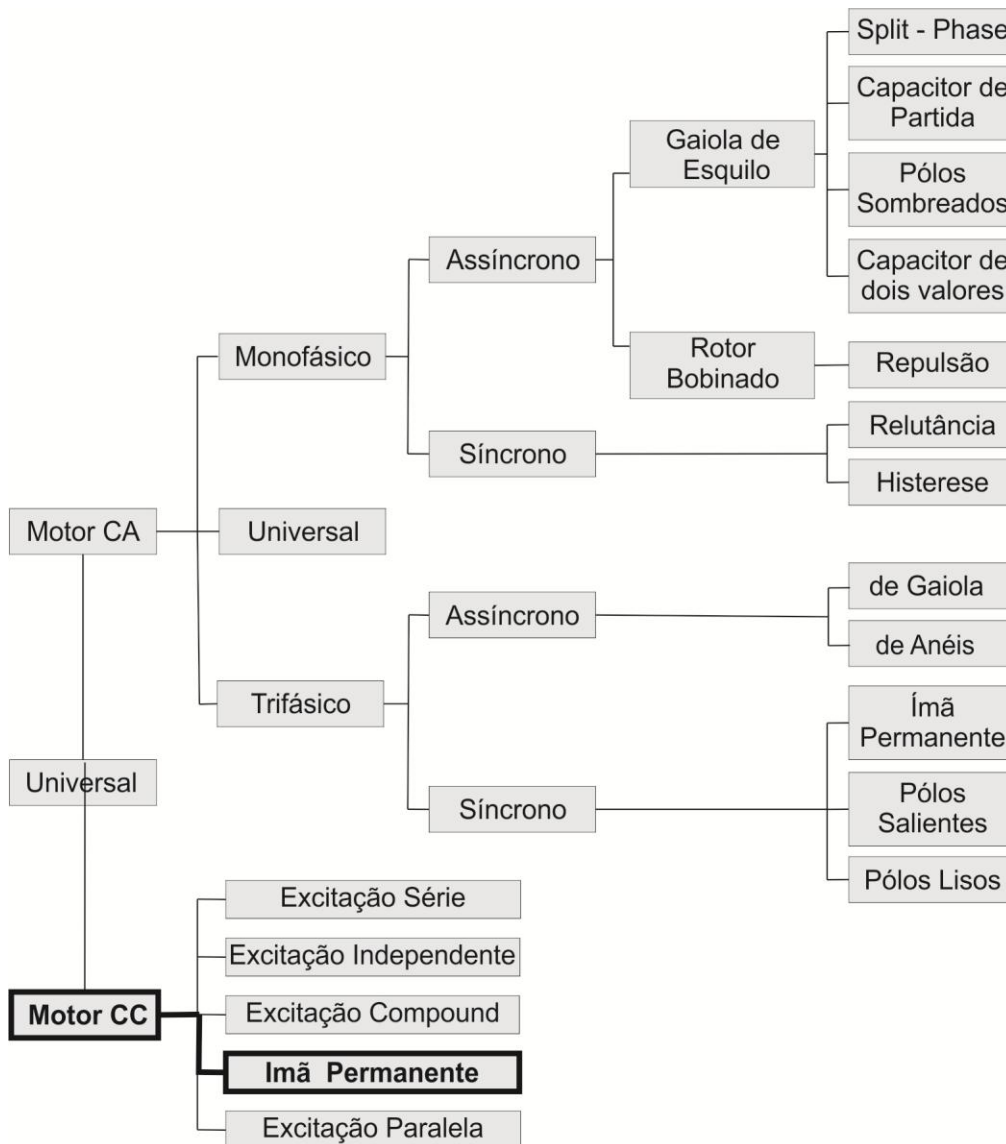


Figura 2. 2 Universo tecnológico em motores elétricos [12]

2.1.1 Motor de Corrente Contínua

O motor de corrente contínua converte energia elétrica em energia mecânica. Como qualquer motor, porém se diferencia dos outros por necessitar de alimentação por tensão contínua. A tensão contínua pode provir de pilhas e baterias, no caso de pequenos motores, ou de uma rede alternada após retificação, no caso de motores maiores [13].

A principal aplicação de um motor de corrente contínua está ligada ao controle de velocidade com necessidade crítica de torque. Essas máquinas, em função de seu princípio de funcionamento, permitem variar a velocidade de zero até a velocidade nominal, com a possibilidade de se manter um torque considerável. Esta é uma característica muito importante, pois desta forma torna-se possível fazer o acionamento em várias aplicações que exigem uma ampla faixa de velocidade, com ótima precisão de torque [13; 14].

O desenvolvimento de técnicas de acionamentos de motores CA e a viabilidade econômica têm favorecido a substituição dos motores CC por motores de indução acionados por inversores de frequência. Ainda assim, devido às suas características e vantagens, o motor CC ainda se mostra a melhor opção em inúmeras aplicações, tais como:

- a) Máquinas operatrizes em geral;
- b) Bombas a pistão;
- c) Tornos;
- d) Bobinadeiras;
- e) Máquinas de moagem;
- f) Máquinas têxteis;
- g) Guinchos e guindastes;
- h) Veículos de tração;
- i) Prensas;
- j) Máquinas de papel;
- k) Indústria química e petroquímica;
- l) Indústrias siderúrgicas;
- m) Fornos, exaustores, separadores e esteiras para indústria cimenteira; e
- n) Aplicações veiculares e outras.

Em relação ao aspecto construtivo, os principais componentes de um motor de corrente contínua são [13; 14]:

Estator: parte fixa do motor que pode conter um ou mais enrolamentos por polo. Estes enrolamentos são alimentados diretamente por uma fonte de tensão contínua. Este enrolamento é também chamado de enrolamento de campo e em motores menores o estator pode ser um ímã permanente.

Rotor: contém o enrolamento que é alimentado por uma fonte de tensão contínua por meio do comutador. Este enrolamento é também denominado enrolamento de armadura.

Comutador: é um dispositivo mecânico no qual estão conectados os terminais das espiras da armadura e garante que o sentido da corrente que circula nas bobinas da armadura seja sempre o mesmo, garantindo a repulsão contínua entre os campos do estator e do rotor, o que mantém o motor girando.

Escovas: geralmente feitas de liga de carbono, estão em constante atrito com o comutador, sendo responsáveis pelo contato elétrico da parte fixa do motor com a parte girante. Pode-se deduzir que as escovas sofrem desgaste natural com o tempo, necessitando de inspeções regulares e trocas periódicas.

Os motores de corrente contínua, em termos de manutenção de peças são muito complexos e exigem conhecimento, habilidade e um programa de manutenção eficiente.

A viabilidade econômica tem favorecido a substituição dos motores de corrente contínua (CC) pelos motores de indução acionados por inversores de frequência. Apesar disso, devido às suas características e vantagens, o motor CC ainda se mostra a melhor opção em inúmeras aplicações. Sua aplicação em sistemas de controle de velocidade em que o torque é um item importantíssimo em alguns casos, ainda não encontrou substituto eficiente, como no caso das pontes rolantes em indústrias siderúrgicas [13].

O princípio de funcionamento de um motor CC, pode ser entendido, simplificando-o em três componentes básicos: bobina, campo magnético e comutador, mostrados na Figura 2. 3 [13].

Inicialmente na Figura 2.3 a bobina está posicionada paralelamente ao campo, totalmente imersa ao campo criado pelo ímã. A bobina está sendo alimentada pelo comutador com a polaridade mostrada. Esta bobina, percorrida por uma corrente elétrica, produzirá por sua vez outro campo magnético em seu entorno que causará uma

reação da bobina dentro das linhas de força do campo magnético fixo [13].

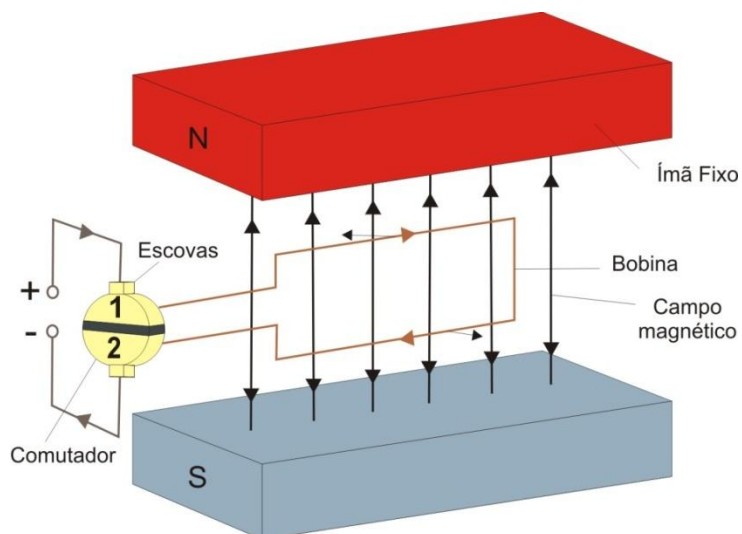


Figura 2. 3 Princípio de funcionamento de um motor CC – Estágio 1 [13].

Na Figura 2.4 a bobina girou no estágio anterior e agora está posicionada de forma que o campo fixo quase não a atinge. Desta forma, não há reação entre os campos, mas a bobina continua a girar por ação da força anterior [13].

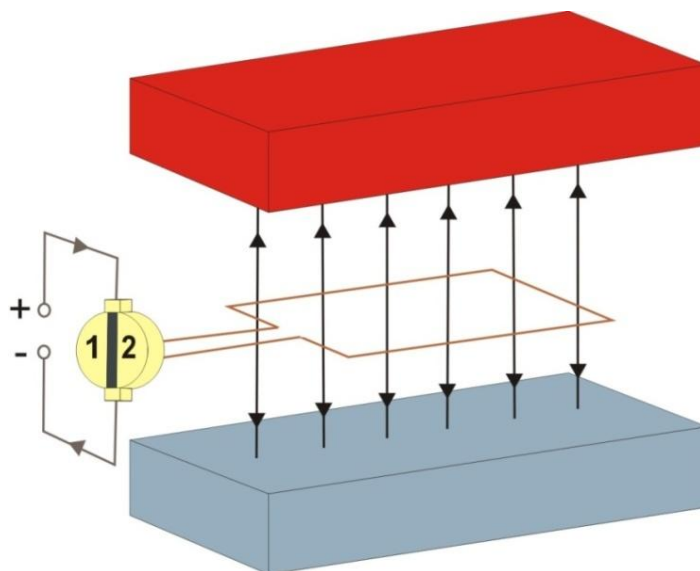


Figura 2. 4 Princípio de funcionamento de um motor CC – Estágio 2 [13].

No próximo estágio, figura 2.5, há uma inversão da posição da bobina. Nesta posição o comutador fará a inversão dos polos aplicados na bobina, voltando desta forma ao estágio inicial [13].

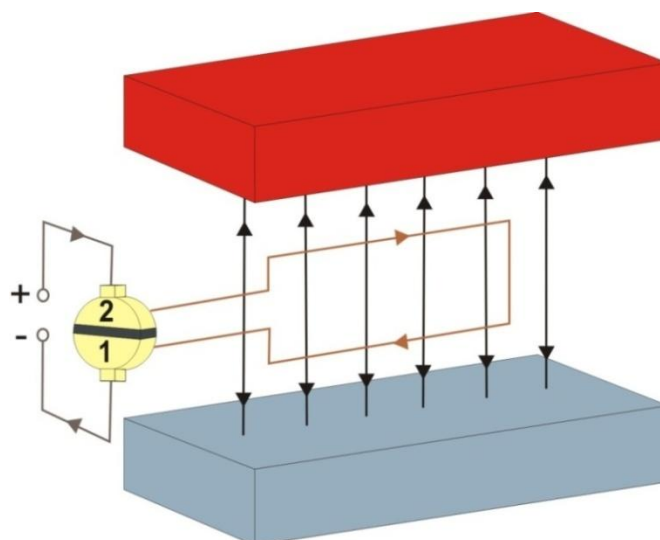


Figura 2. 5 Princípio de funcionamento de um motor CC – Estágio 3 [13].

Essas atrações e repulsões bem coordenadas é que fazem o rotor girar. A comutação no momento oportuno é condição indispensável para a manutenção dos torques favoráveis, os quais garantem o funcionamento dos motores [13; 14].

2.2 Propriedades Magnéticas

As propriedades magnéticas de um material são obtidas por meio da curva de histerese. A curva de histerese relaciona o campo magnético (H), aplicado a um material, com a indução magnética (B) resultante. A Figura 2. 6 apresenta uma curva característica de um material magnético.

Chama-se de magnetismo remanente ou retentividade (B_r), o ponto em que a curva corta o eixo B , no quadrante superior esquerdo, que representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado ($H=0$) e força coercitiva ou coercitividade (H_c) é denominado onde o ponto em que a curva corta o eixo de H no mesmo quadrante, que representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime ($B = 0$).

A permeabilidade magnética μ , está relacionada com o ponto de maior declividade da curva de histerese. A indução de saturação B_m pode ser visualizada a partir dos valores de campo onde a indução tende a permanecer constante ou com declividade quase nula [15; 16].

Maiores detalhes sobre o as propriedades magnéticas podem ser encontrados no Anexo A deste trabalho.

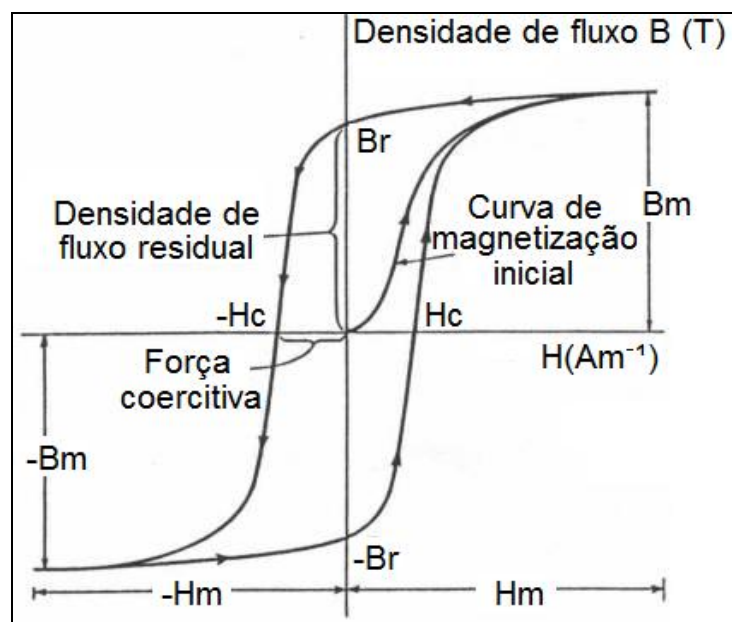


Figura 2. 6 Ciclo de Histerese de um material magnético [15].

2.3 Fatores que determinam o desempenho das máquinas elétricas de corrente contínua

Os núcleos do estator e do rotor das máquinas elétricas são usualmente construídos de chapas laminadas de aço baixo carbono. Algumas máquinas de maior rendimento ainda utilizam chapas de aço-silício em seus núcleos, variando de 1% a 3% de silício em sua composição [2].

Para a confecção dos núcleos de chapas laminadas, basicamente utilizam-se os processos de laminação, corte, tratamento para isolamento, empacotamento e fixação.

O processo de isolamento para as chapas de aço carbono consiste em um tratamento térmico, onde os pacotes de chapas são colocados em fornos, para que haja a oxidação da superfície das chapas, formando uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes [17; 18].

Para garantir o desempenho das máquinas elétricas deve-se levar em consideração alguns fatores importantes quanto as propriedades dos materiais a serem utilizados.

As chapas utilizadas nos núcleos dos motores são fabricadas a partir do ferro, material ferromagnético de alta permeabilidade magnética.

Nos circuitos magnéticos compostos por bobinas, núcleos de ferro e entreferro, quanto maior a permeabilidade magnética dos núcleos menor será o campo magnético

nos núcleos e maior será a intensidade de campo no entreferro. Desta forma, se os núcleos do estator e rotor de uma máquina são construídos com materiais de alta permeabilidade magnética, a máquina apresentará um melhor desempenho [18; 20].

Alem da alta permeabilidade magnética, o material para a construção dos núcleos deve também possuir elevada indução de saturação, possibilitando que a máquina trabalhe num ponto de fluxo magnético elevado, sempre abaixo do ponto de saturação [17; 19].

O aço baixo carbono é utilizado, pois é um material magnético macio de baixa coercitividade. Quanto menor a coercitividade, mais estreito o ciclo de histerese e menores são as perdas por histerese [17; 19; 21].

A incidência de fluxo de um fluxo alternado em um núcleo magnético gera neste, correntes induzidas. Os núcleos usualmente são feitos de várias chapas laminadas isoladas entre si, pois esse isolamento restringe as correntes induzidas a uma área de menor circulação. A corrente induzida total será a soma das correntes induzidas em cada chapa, que será consideravelmente menor do que se os núcleos fossem construídos de material maciço. Esta redução de correntes induzidas pode ser interpretada como um aumento da resistência elétrica do corpo, uma vez que são grandezas físicas inversamente proporcionais. Este efeito de redução das correntes induzidas também pode ser obtido com o aumento da resistividade elétrica do material. Portanto, quanto maior a resistividade do material, menor serão as correntes induzidas e as perdas por correntes parasitas [18; 19; 21; 22].

Considerando os pontos abordados acima, pode-se concluir que o material utilizado para a fabricação dos núcleos de uma máquina elétrica rotativa deve apresentar as seguintes características: [2; 3; 11]:

- a) Alta permeabilidade magnética relativa;
- b) Baixa coercitividade magnética;
- c) Alta resistividade ou resistência elétrica; e
- d) Alta indução de saturação.

2.4 Metalurgia do pó

A metalurgia do pó é um processo de fabricação, dentro da metalurgia, de peças metálicas e não metálicas. É atualmente um processo consolidado e maduro e está em

posição de destaque [23; 27].

Diferente de outros processos metalúrgicos, a metalurgia do pó não apresenta fase líquida ou apresenta somente presença parcial desta durante o processo. É uma técnica de fabricação que permite que se produzam peças em formatos definitivos ou praticamente definitivos, muitas vezes sem necessidade posterior de outros tipos de acabamento, como usinagem por exemplo. Os componentes obtidos a partir deste processo possuem características estruturais e físicas impossíveis de se alcançar com qualquer outro processo. É um processo altamente competitivo, com a possibilidade da fabricação de peças em larga escala, mantendo-se a precisão, alta qualidade e as características específicas exigidas pelo cliente. É um processo em que se mantém um baixo consumo de energia e traz menores riscos para o meio ambiente [23].

A metalurgia do pó, atualmente, possui grande aplicação principalmente na indústria automotiva [24].

A metalurgia do pó teve seu início na virada do século passado, com a produção em larga escala de metais com alto ponto de fusão, em que não existiam equipamentos de fundição adequados para estes materiais e mesmo após o aparecimento de fornos de fusão com maior sofisticação, a metalurgia do pó foi pouco impactada, pois as propriedades obtidas por este processo não conseguia ser obtida em outro.

Este processo possui algumas etapas principais, sendo elas [23; 27]:

- a) Obtenção dos pós: fase de obtenção da matéria-prima;
- b) Mistura de pós: fase das misturas de um ou mais pós para a formação de ligas ou mistura com lubrificantes;
- c) Compactação: etapa onde há a aplicação de uma pressão sobre o pó, no interior de matrizes, dando ao produto a característica final; e
- d) Tratamento Térmico: etapa que pode ser de cura ou sinterização. Esta etapa confere resistência mecânica, entre outras propriedades, ao material final.

Tal como em qualquer processo a metalurgia do pó têm suas vantagens e também suas desvantagens. Entre as principais vantagens deste processo, pode-se destacar a obtenção de ligas impossíveis ou muito difíceis de obter em outros tipos de processo, a obtenção de características diferenciadas como o controle de porosidade, a eliminação ou minimização de acabamentos posteriores como usinagem, a produção de peças com formato complexo e único, o baixo nível de consumo energético e o menor impacto ambiental devido à redução das perdas [23].

Na Figura 2.7 pode ser vista uma representação esquemática das etapas do

processo de Metalurgia do pó.

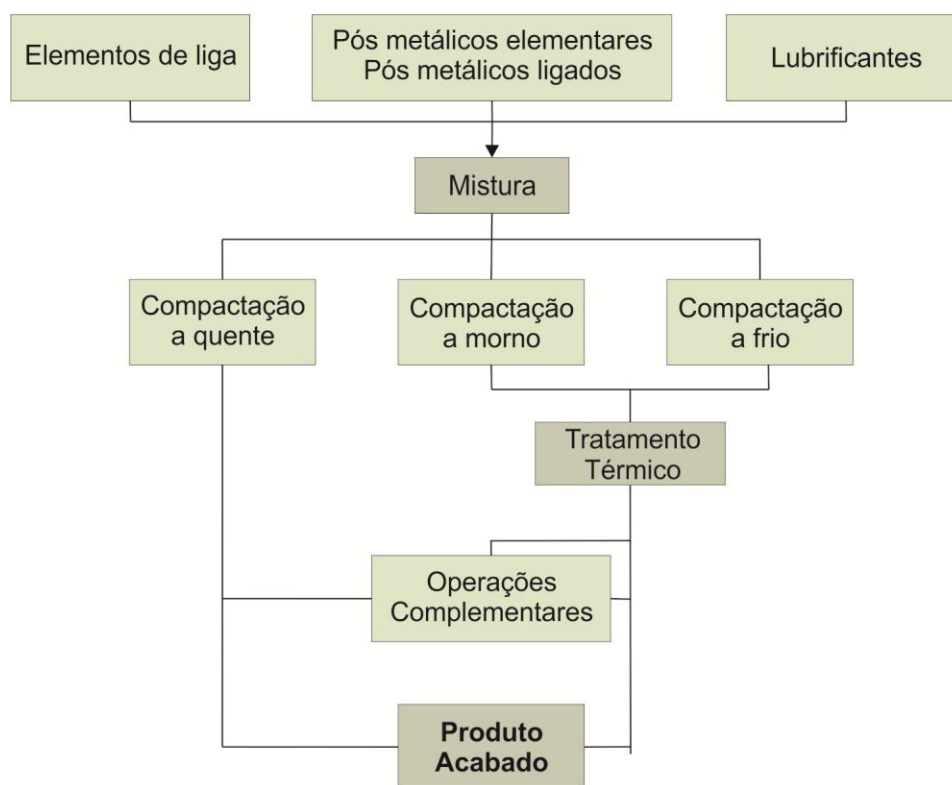


Figura 2. 7 Representação esquemática etapas do processo de metalurgia do pó [24].

Tal como em qualquer processo a metalurgia do pó têm suas vantagens e também suas desvantagens. Entre as principais vantagens deste processo, pode-se destacar a obtenção de ligas impossíveis ou muito difíceis de obter em outros tipos de processo, a obtenção de características diferenciadas como o controle de porosidade, a eliminação ou minimização de acabamentos posteriores como usinagem, a produção de peças com formato complexo e único, o baixo nível de consumo energético e o menor impacto ambiental devido à redução das perdas [23].

Entre as desvantagens destacam-se as limitações geométricas, pois quanto maior a peça maior será a sua matriz de compactação e a necessidade de prensas com alta capacidade para a produção e também o seu alto custo inicial de ferramentas [23].

Maiores detalhes sobre o processo de metalurgia do pó podem ser encontrados no Anexo B deste trabalho.

2.5 Materiais magnéticos macios por metalurgia do pó

Os materiais magnéticos revolucionaram a história. Eles são utilizados na

eletrônica, informática e indústrias de telecomunicação. Nas últimas décadas diferentes tipos de materiais magnéticos têm sido utilizados, o ferro puro e suas ligas, como: Fe-Ni, Fe-Ni-P, Nd-Fe-B e Fe-Si, assim como os ferrites moles e duros [28].

Esses materiais, inicialmente aplicados principalmente na indústria eletroeletrônica, disseminam-se também para outros segmentos, como a indústria automobilística, eletrodomésticos, ferramentas elétricas e máquinas elétricas [29; 30].

Utilizar compósitos de materiais magnéticos macios para aplicações magnéticas não é exatamente uma técnica nova. Esta técnica apareceu há mais de 100 anos. Já em 1886, partículas de ferro foram utilizadas na concepção de um núcleo. No entanto, estes compósitos eram raramente utilizados, devido às suas propriedades magnéticas e devido à tecnologia para a fabricação das peças não ser tão desenvolvida.

Estas limitações foram sendo superadas com o passar do tempo e o desenvolvimento de tecnologias para a moldagem dos compósitos vem recebendo crescente melhoria, assim como novos testes de ligas e misturas de materiais, a fim de garantir características magnéticas melhores [31; 32].

O material magnético macio ideal é um isotrópico com alta permeabilidade, baixa coercitividade e elevada indução de saturação. Além do que, estes materiais podem ser facilmente moldados em estruturas tridimensionais, aproveitando ao máximo a matéria-prima [33; 34].

Os materiais magnéticos macios obtidos por metalurgia do pó podem ser divididos em:

- a) Materiais magnéticos macios sinterizados; e
- b) Compósitos magnéticos macios curados.

Nos materiais magnéticos macios sinterizados, as propriedades magnéticas são determinadas pela composição química, densidade e tamanho do grão do sinterizado. Eles apresentam altas densidades de fluxo magnético.

Nos materiais magnéticos sinterizados, a adição de fósforo na matriz de ferro puro, ocasiona o aumento do grão e proporciona o aumento da permeabilidade magnética. Quando utilizado em aplicações onde o campo seja variável no tempo, estes materiais apresentarão grande perda no núcleo.

Os compósitos magnéticos macios curados são basicamente descritos como compósitos de materiais ferromagnéticos, envolvidos por uma camada de filme isolante, seja ele orgânico ou inorgânico, como mostra a representação esquemática na Figura 2.8.

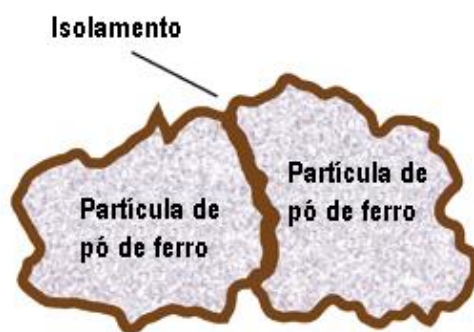


Figura 2. 8 Representação esquemática do SMC [28].

A camada isolante é a principal diferença dos compósitos para o material sinterizado. Ela tem a finalidade de agregar as partículas do ferro, e também serve como material isolante elétrico, colaborando com a redução das perdas no núcleo, o que o torna um material potencial para aplicações eletromagnéticas [3; 35].

Por um longo tempo a metalurgia do pó (P/M) vem produzindo componentes SMC para aplicações em altas frequências. Estes componentes SMC tradicionais consistem geralmente em partículas de ferro distribuídos em uma matriz de materiais orgânicos, que devido sua porosidade distribuída e o seu bom comportamento em altas frequências fez deste material a solução mais eficiente para componentes indutivos em várias aplicações de filtros e conversão de energia [36; 37].

A matriz orgânica pode fornecer positivamente uma alta resistência mecânica e boa resistência para correntes de Foucault nos componentes SMC. No entanto, a desvantagem é a limitação da temperatura de tratamento térmico, restrita a cerca de 200°C até 300°C. Esta temperatura não é suficiente para trazer o relaxamento de tensão completo das partículas de pó deformados, o que resultará em perdas de histerese relativamente elevadas e também retirando uma parte do efeito da boa resistência às perdas por correntes parasitas [32].

Uma alternativa mais atraente é a utilização de um sistema de revestimento de superfície de partícula inorgânica que pode suportar temperaturas elevadas e que permite a otimização do relaxamento da partícula para o mínimo de perdas por histerese possível. Assim, um novo grupo de SMCs começou a ser produzido devido à introdução de novos materiais. Estes materiais não contêm qualquer matriz orgânica que defina as limitações das condições de processamento, tornando possível fabricar componentes com indução de saturação e permeabilidade significativamente maiores com menores

perdas por histerese. Com isto, os SMCs são agora uma alternativa aos aços elétricos em aplicações na faixa de frequência de baixo para médio, tais como máquinas rotativas, sensores e solenóides de comutação rápida [36].

Durante os últimos anos, o interesse por estes materiais aumentaram em uma elevada taxa de crescimento, devido estas novas possibilidades [38].

Neste novo conceito de SMC, as principais vantagens que podem ser obtidos por esta tecnologia são [36]:

- a) Combinação única de saturação magnética e baixas perdas por correntes parasitas;
- b) Fluxo tridimensional (3D); e
- c) Custo de produção eficiente de componente pelo processo P/M.

Os novos materiais SMCs combinados com a oportunidade de modelagem tridimensional e do processo de P/M abrem novas possibilidades na concepção e fabricação de máquinas eletromagnéticas e outros dispositivos. Se cuidadosamente implementado, o conceito SMC pode ajudar a melhorar o desempenho, reduzir as peças, fazer projetos mais integrados, reduzir custos e finalmente utilizando uma técnica amigável ao meio ambiente [28].

As propriedades eletromagnéticas e mecânicas do produto acabado utilizando o SMC, não dependem somente das propriedades do pó em si, mas dependem também da mistura, do lubrificante adicionado e da temperatura de compactação. O tipo de mistura irá também ditar a temperatura máxima do tratamento térmico. É por este motivo que existem diferentes tipos de materiais SMC, com propriedades magnéticas diferentes e que podem ser utilizados em uma variedade de aplicações. Assim, o SMC deve ser processado de acordo com o objetivo final a ser alcançado e sua utilização [28; 39; 43].

2.5.1 Características do compósito magnético macio

As características dos compósitos magnéticos macios apresentam diferenças mecânicas e eletromagnéticas dos materiais ferromagnéticos convencionais.

Como o tratamento térmico deste material é feito pela cura, a resistência mecânica apresentada fica abaixo dos valores atingidos por aços laminados e também pelos materiais magnéticos macios sinterizados. O SMC pode atingir valores de 50 até 150 MPa de ruptura transversal.

O fluxo magnético do SMC é igual nas três dimensões, ou seja, ele é considerado um material 3D. Essa característica isotrópica é uma grande vantagem quando inserida ainda na fase de projeto da máquina.

A máxima permeabilidade relativa no SMC é baixa comparada aos aços laminados. Este valor de permeabilidade ocorre, pois o fluxo magnético tem que atravessar pelo material isolante e poros, que não são ferromagnéticos.

Em motores com ímãs permanentes a permeabilidade relativa alta não é fundamental, assim como os motores universais. Já em máquinas de indução a alta permeabilidade é de suma importância para que se possa manter uma corrente de indução baixa.

A indução magnética do SMC é diretamente proporcional a densidade do compósito. Sendo assim, a indução de saturação de compósitos SMC de altas densidades pode atingir valores próximos aos dos aços laminados.

As perdas nos materiais magnéticos macios podem ser divididas em perdas por ciclo de histerese e perdas por correntes parasitas. Comparados com os aços laminados, o SMC tem perdas maiores por ciclo de histerese e perdas menores por correntes parasitas.

As perdas por curva de histerese aumentam com o aumento da frequência, já as perdas por correntes parasitas possuem dependência quadrática. Se isso for considerado, devido ao aumento da frequência em um determinado momento, as perdas totais serão menores no material SMC do que nos aços laminados. Assim, em aplicações de altas frequências os compósitos SMC apresentam melhores resultados [3; 35].

2.6 Aplicação de materiais magnéticos macios por metalurgia do pó em máquinas elétricas

O material magnético macio ideal seria um isolante elétrico isotrópico com alta permeabilidade magnética, baixa coercividade e alta indução de saturação. Além disso, o material deveria ser fácil de moldar em estruturas tridimensionais, a fim de se aproveitar ao máximo a natureza isotrópica do material.

Atualmente o material magnético macio mais comum utilizado é a chapa de aço, ou ferro, puro ou misturado com elementos como o Silício, por exemplo. Chapas laminadas de aço são as dominantes para aplicações em várias faixas de frequência, por causa das boas propriedades magnéticas e seu baixo custo. Estas chapas são empilhadas,

formando o núcleo magnético dos dispositivos. No entanto, este processo de fabricação possui alguns pontos que necessitam ser melhorados, pois para que se faça a laminação a quantidade gasta de energia é alta e a quantidade das perdas para fabricação das chapas laminadas é grande, especialmente quando se necessita de lâminas com espessuras mais finas. Além disso, a liberdade na concepção de motores mais eficientes é limitada pela restrição bidimensional do empilhamento das chapas [31; 32; 40].

Materiais magnéticos macios por metalurgia do pó (SMCs) se assemelham em muitos aspectos ao material ideal, visto que eles são materiais isotrópicos, constituídos por pequenas partículas de material macio isoladas. A indução de saturação é próxima a de chapas laminadas e as perdas por correntes de Foucault são mais baixas, devido ao menor tamanho de partícula. Estes materiais podem ser utilizados na construção de núcleos magnéticos de máquinas elétricas, possibilitando melhorar as propriedades físicas de interesse e eliminando as tradicionais chapas de aço laminadas. Estes materiais podem ser utilizados na construção dos núcleos de estatores e rotores de máquinas elétricas rotativas em blocos únicos [28; 40].

Novos desenvolvimentos de SMCs se tornaram interessantes para aplicações de máquinas elétricas, combinados com novos projetos e técnicas de produção. Os SMCs têm várias vantagens para esta finalidade, assim como a redução de peso e dimensões dos produtos acabados [33].

Os materiais magnéticos compactados têm boas propriedades magnéticas, especialmente em altas frequências. No entanto, mesmo nas frequências de 50 ou 60 Hz, possui perdas comparáveis aos que utilizam chapas laminadas [31; 41].

A indução de saturação do SMC é bastante elevada e as perdas por correntes de Foucault são muito mais baixas, devido ao menor tamanho de partícula, tipicamente 5-400 μm em comparação com a espessura das lâminas de chapa de aço normalmente 100-1000 μm . Materiais SMC de alta qualidade possuem compressibilidade elevada: quanto mais macia a partícula mais fácil será para alcançar altas densidades de material. As pressões de compactação de um bom SMC são na gama de 600MPa a 800MPa resultando em densidades de componentes tipicamente na gama de 7,3 g/cm³ a 7,5 g/cm³ [32].

Considerando que atualmente o consumo de aços laminados para motores elétricos é muito maior do que o mercado para motores elétricos de partes estruturais feitas a partir de SMCs, este se torna um alvo de grande interesse para a indústria de M/P. No entanto, é desafiador, pois materiais, projetos e toda a fabricação durante

muitos anos foram otimizados para um fluxo bidimensional. Desta forma, um substituto imediato de um núcleo laminado por um SMC resultará na melhor das hipóteses, em um desempenho igual com o mesmo custo. Uma exceção pode ser motores que operam em alta frequência, onde um substituto direto pode resultar em alguns benefícios. A chave para o sucesso, no entanto, encontra-se na utilização da capacidade de fluxo tridimensional do material, nas possibilidades para o *designer* utilizar as novas topologias, com formatos diferenciados e soluções para montagem, além de novos padrões que podem abrir portas para muitos benefícios, incluindo melhor desempenho, redução de tamanho e peso, quantidade reduzida de peças e redução de custos [44].

Um exemplo interessante de progresso com SMC pode ser visto na Figura 2. 9, que ilustra um motor de corrente contínua, sem escovas (BLDC), utilizado em sistemas de freio ABS, produzido pela Asian Seiki Co. Ltd., Japão [45].

O motor obteve significativa redução de dimensões tendo como principais benefícios: a redução de 36% no comprimento axial, redução de 17% de peso, aumento de 8% no fluxo magnético, redução do tamanho do ímã, redução dos custos com fio de cobre, melhoria da transferência de calor e um menor número de peças de montagem [45].

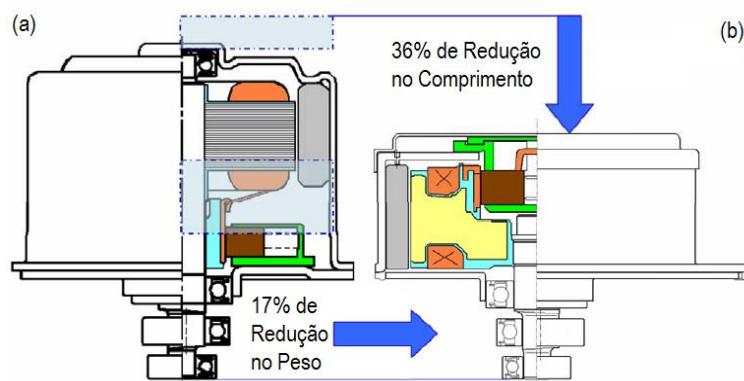


Figura 2. 9 (a) Motor ABS comercial de chapas laminadas; (b) Motor ABS com novo *designer* em SMC [45].

2.7 Somaloy®

A tecnologia Somaloy® é a marca conceito de SMC da empresa Höganäs. A chave desse conceito é produzir componentes com propriedades magnéticas 3D quando moldado na forma final desejada.

A Höganäs desde o início da década de 1990 tem desenvolvido e produzido tipos de SMC Somaloy®, baseado em partículas de ferro puras combinadas com

revestimentos inorgânicos que podem ser moldados em um único passo de compactação para formar componentes com formas complexas e tolerâncias precisas. A fabricação de componentes é baseada no processo de fabricação por metalurgia do pó (P/M). As capacidades magnéticas e a capacidade de molde do Somaloy® abre novas oportunidades em “designer”. A redução de custos pode ser obtida por meio da redução do custo total de matéria-prima, bem como na fabricação mais eficiente e na montagem. A tecnologia Somaloy® atende demandas futuras em matéria de eficiência, custo, desempenho e capacidade de reciclagem, o que a torna uma tecnologia para o futuro.

Atualmente dentro da linha Somaloy®, a Höganäs oferece uma gama de produtos bem completa que garante a função ideal para várias aplicações eletromagnéticas que vão desde CC até centenas de kHz. Cada produto Somaloy® está disponível como um *mix* pronto, que é personalizado para a aplicação específica:

- a) Motores elétricos compactos;
- b) Transformadores / Sistemas de ignição;
- c) Atuadores de comutação rápida / injeção de combustível;
- d) Componentes indutivos; e
- e) Sensores.

Para aplicações em motores, o Somaloy® está disponível em várias formulações, para que possa ser usado em componentes com diferentes níveis de desempenho (Figura 2. 10):

- a) Somaloy 1P: linha base desenvolvida;
- b) Somaloy 3P: visa aplicações em alta permeabilidade e resistência são essenciais;
- c) Somaloy 5P: oferece novas oportunidades em aplicações que requerem baixas perdas; e
- d) Somaloy HR: desenvolvido especificamente para manter baixas as perdas correntes parasitas em grandes seções transversais [32; 46].



Figura 2. 10 Nível de desempenho das diferentes formulações do Somaloy® [46].

A empresa Högans, fabricante da marca Somaloy®, disponibiliza para seus materiais uma folha de dados com as principais características testadas na empresa. Como a característica dos pós depende principalmente de sua forma de processamento, esta folha de dados contém também algumas características de processamento e situação em que foram retirados esses dados.

Na Tabela 2.1 encontram-se as propriedades dos materiais Somaloy® 7001P e Somaloy 7003P disponibilizadas pela empresa fabricante.

Tabela 2. 1 Propriedades dos materiais Somaloy 700 1P e Somaloy 700 3P [49].

Material Base	Somaloy 700 1P	Somaloy 700 3P
Aditivo	0,4% Kenolube	0.3% 3P Lube
Pressão Compactação	800 MPa	800 Mpa
Temperatura Compactação	Ambiente	80 °C
Tratamento Térmico	30 minutos, ar	Otimizado
Densidade	7,45 g/cm ³	7,57 g/cm ³
Resistividade	400 μΩ*m	200 μΩ*m
B@4000 A/m	1,31T	1,37T
B@10000 A/m	1,56 T	1,61T
Hc	210 A/m	217 A/m
Mmax	540	750

Em comparação a outros materiais para este tipo de utilização, o Somaloy® consegue obter uma combinação única de alta indução e baixas perdas no núcleo, apresentado no gráfico da Figura 2. 11.

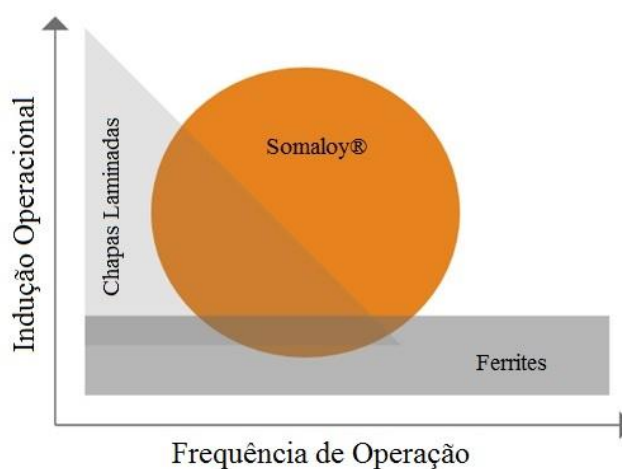


Figura 2. 11 Posicionamento do Somaloy® entre outros materiais quanto Indução \times Frequência [46].

Para que se alcancem as propriedades informadas para cada liga Somaloy®, a empresa fornece as instruções adequadas para o tratamento térmico de cada material. Observando a Tabela 2.1 novamente, pode-se notar que existe diferença entre os tratamentos térmicos sugeridos para o 700 1P e para o 700 3P.

Segundo informações do fabricante, o tratamento térmico utilizado para a cura do material Somaloy 700 1P, é feito ao forno, utilizando ar como atmosfera, com temperatura fixa de 530 °C, durante o tempo de 30 minutos. No caso do Somaloy 700 3P, este processo é mais detalhado, como mostra o gráfico da Figura 2. 12. O processo de cura do Somaloy 700 3P é realizado em duas etapas, onde o tempo e a taxa de aquecimento dependem da densidade ou massa do material a ser curado. Na primeira utilizando atmosfera de ar, a fim de garantir a retirada do lubrificante utilizado e em um segundo momento utilizando atmosfera de nitrogênio para concluir a cura.

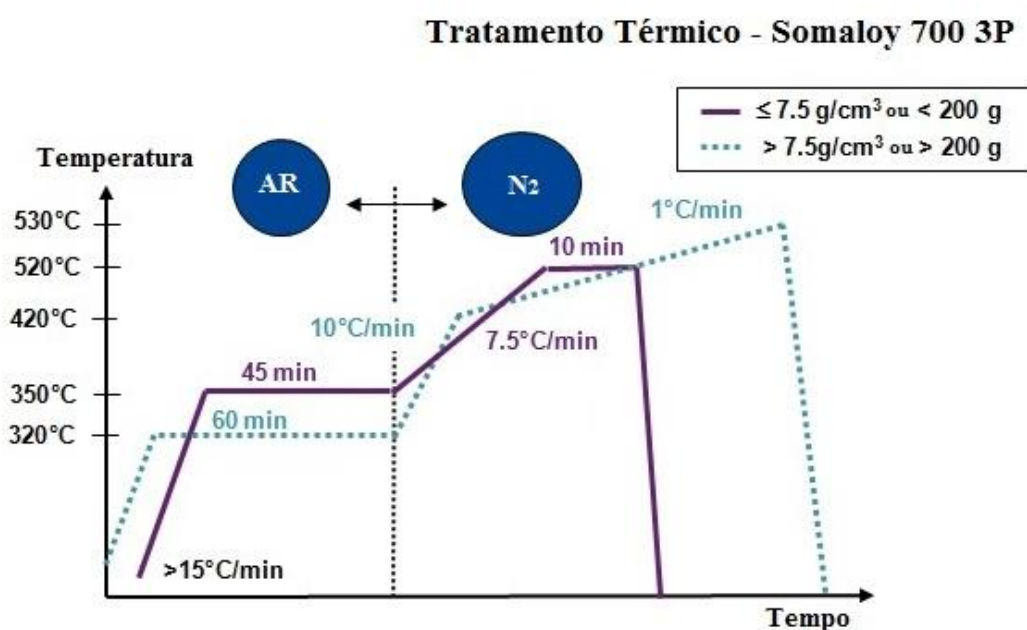


Figura 2. 12 Tratamento térmico para o Somaloy 700 3P fornecido pela fabricante [46].

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental iniciou com o estudo dos materiais que foram escolhidos para os testes no motor CC. Os materiais selecionados foram a liga Fe2%P, produzida no LDTM, a partir dos pós de Ferro (Fe) e do Fosfeto de Ferro (Fe3P) e as ligas Somaloy 700 3P e o Somaloy 700 1P, desenvolvidos e distribuídos pela empresa Höganäs [46].

A caracterização desses materiais foi feita por meio de corpos de prova, que proporcionaram as análises das propriedades físicas e magnéticas de cada material comparando estas com resultados existentes em literatura.

Após os procedimentos de caracterização, elaborou-se uma matriz para compactação do rotor final. Esta matriz foi projetada a partir de um motor padrão, neste caso um motor de corrente contínua, parte constituinte de um eletroventilador comercial, fabricado pela empresa Imobras, de Alto Feliz – RS [47]. Por meio da matriz foram compactados três núcleos do rotor, com os materiais selecionados anteriormente e que ao final passaram por um tratamento térmico e foram enviados para a Imobras para montagem.

Na etapa de montagem, os núcleos passaram pelos processos de empacotamento, fixação ao eixo, bobinamento e montagem na carcaça. Com os três motores já finalizados, estes passaram por testes de desempenho e assim comparados entre si e com o motor base com núcleo a partir de chapas de aço laminadas.

3.1 Ligas utilizadas na confecção dos rotores

Brevemente apresentadas na introdução deste trabalho, três materiais compõem o grupo testado nos núcleos. O primeiro material selecionado para utilização dos testes foi o Fe2%P, liga composta de pó de ferro e dois por cento de pó de fósforo, que obteve maior rendimento para aplicação em núcleos de máquinas elétricas dentre as estudadas em trabalhos anteriores pelo GDER e os outros dois materiais testados, fazem parte dos compósitos magnéticos da família Somaloy, patenteados pela empresa Höganäs: Somaloy 700 1P e Somaloy 700 3P, que foram disponibilizados para a execução dos testes.

No caso da liga Fe2%P, os testes executados no laboratório, apesar de ainda não ter sido testado na topologia de motor CC, mostraram que a adição do fósforo na matriz

do ferro obteve aumento de grão, proporcionando valores altos de indução. Isto gerou interesse para a indústria, visualizando a possibilidade em testar um material de baixo custo e baixa complexidade de produção em seus motores.

As ligas Somaloy 700 3P e o Somaloy 700 1P, desenvolvidos e distribuídos pela empresa Höganäs apresentam a linha 1P que é a linha de base desenvolvida para uso em motores e a linha 3P que apresenta alta resistência e alta permeabilidade [46].

A Tabela 3.1 apresenta os três materiais testados neste estudo.

Tabela 3.1 Ligas utilizadas

Amostra	Liga
1	Somaloy 700 1P
2	Somaloy 700 3P
3	Fe2%P

Os pós empregados como matéria-prima nesta pesquisa foram adquiridos da empresa Höganäs. Conforme certificados do fabricante, o pó de ferro utilizado foi o ASC100.29, com 99,4% da granulometria entre 45 μm e 150 μm e o pó Fe3P apresenta 90% de sua dimensão abaixo de 14,58 μm . Os pós Somaloy 700 1P e Somaloy 700 3P tem 29% de sua granulometria entre 75 μm e 150 μm , 29% entre 150 μm e 212 μm e 39% entre 212 μm e 425 μm .

Pós de ferro sempre utilizam uma pequena quantidade de lubrificante, pois este tem a função de minimizar o atrito durante o processo de compactação dos pós. O lubrificante pode ser utilizado na matriz de compactação, formando uma camada de proteção antes do recebimento do compósito, assim como também pode ser misturado junto aos pós na formação da liga. A inserção do lubrificante nos compósitos serve também para alcançar propriedades mecânicas melhores, pois colabora com o aumento da densidade da peça compactada. Com o objetivo de utilizar dos benefícios do uso dos lubrificantes, todos os pós receberam um percentual de lubrificante em sua composição [23]. Como o foco principal do trabalho não é avaliar a influência dos lubrificantes, quantidades e tipos, nas composições as quantidades utilizadas foram baseadas em referências bibliográficas. Para a liga Fe2%P, foi utilizado 1% do lubrificante estearato de zinco [1; 2] e para o Somaloy®, o lubrificante acrescido foi o Kenolube®, desenvolvido e fornecido pela empresa Höganäs, 0,2% para o 700 3P e 0,4% para o 700 1P [49].

3.2 Matrizes utilizadas para compactação dos corpos de prova

Para a avaliação das propriedades dos compósitos se fez necessário a confecção dos corpos de prova, onde puderam ser avaliados alguns itens que por fim pudessem influenciar na construção do rotor requerido, como por exemplo, expansão ou contração do material. Utilizou-se para isto duas matrizes. A primeira com resultado em formato cilíndrico, com a qual foram obtidas medidas da peça para o levantamento da densidade, após o processo de compactação (peça verde) e na sequência do tratamento térmico (peça curada/sinterizada). A segunda matriz utilizada tem como resultado peças no formato de anel, que servem principalmente para o levantamento da curva de histerese e magnetização do material, fornecendo valores de indução de saturação, permeabilidade magnética e coercitividade. Este formato de amostra serviu também para o levantamento da resistividade dos materiais.

Com as matrizes para a obtenção dos corpos de prova em questão, a técnica utilizada foi a compactação unidirecional de dupla ação, onde os dois punções, superior e inferior, sofrem deslocamento. Este tipo de compactação reduz a zona neutra, região em que os pós sofrem menor influência do processo de compactação, melhorando a distribuição da densidade do compactado [3].

No decorrer deste capítulo apresentam-se as matrizes utilizadas para a confecção dos corpos de prova de interesse.

As Figuras 3.1 e 3.2 ilustram a matriz para obtenção dos corpos de prova na forma de cilindro, que foram utilizados para medição da densidade.

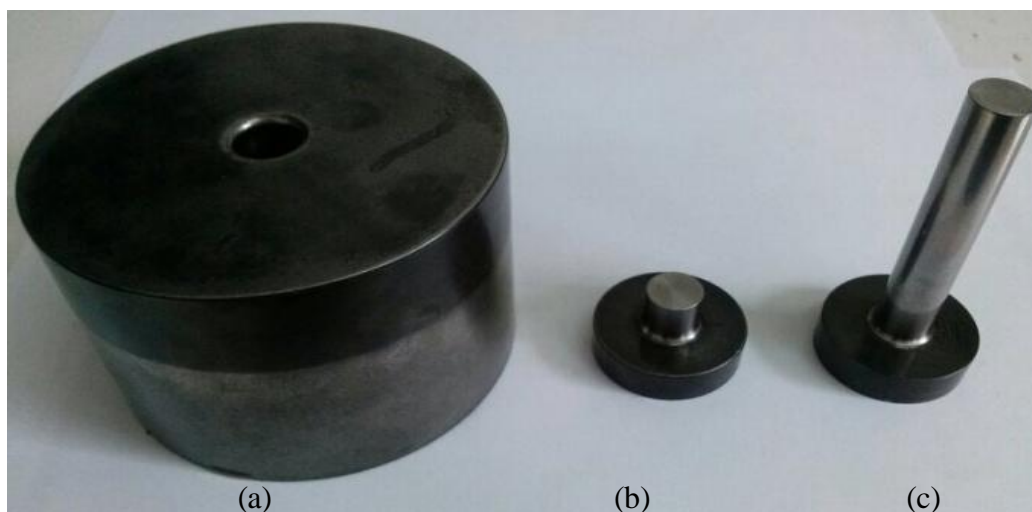


Figura 3. 1 Matrizes para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro: (a) Matriz, (b) Punção superior, (c) Punção inferior.

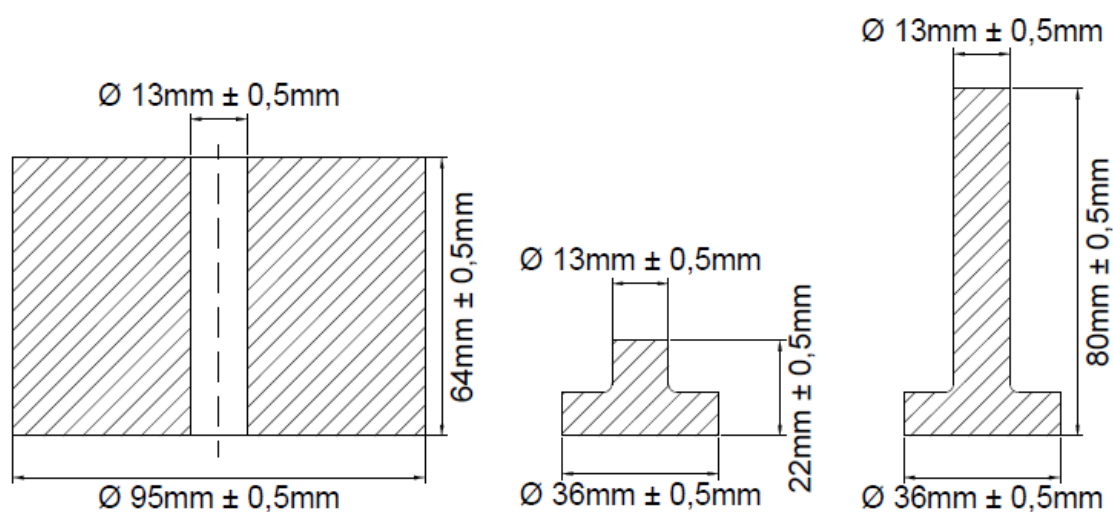


Figura 3. 2 Projeto da matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro.

Enquanto a matriz para obtenção dos corpos de prova na forma de anel pode ser visualizada nas Figuras 3.3 e 3.4, em que os corpos de prova foram utilizados para obtenção das curvas de histerese e magnetização, assim como, para determinação da resistividade elétrica.

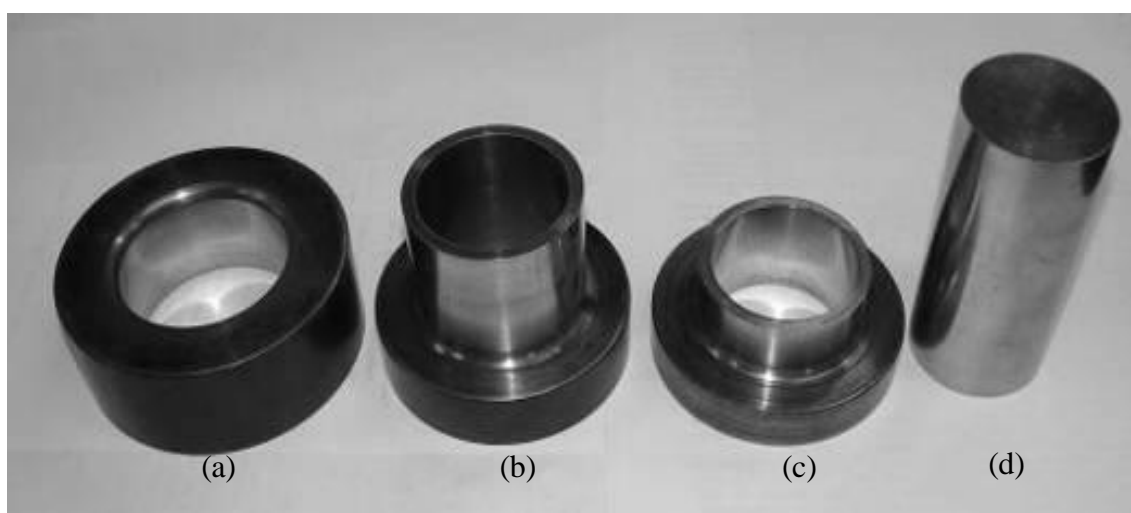


Figura 3. 3 Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel: (a) matriz, (b) punção inferior, (c) punção superior, (d) pino macho.

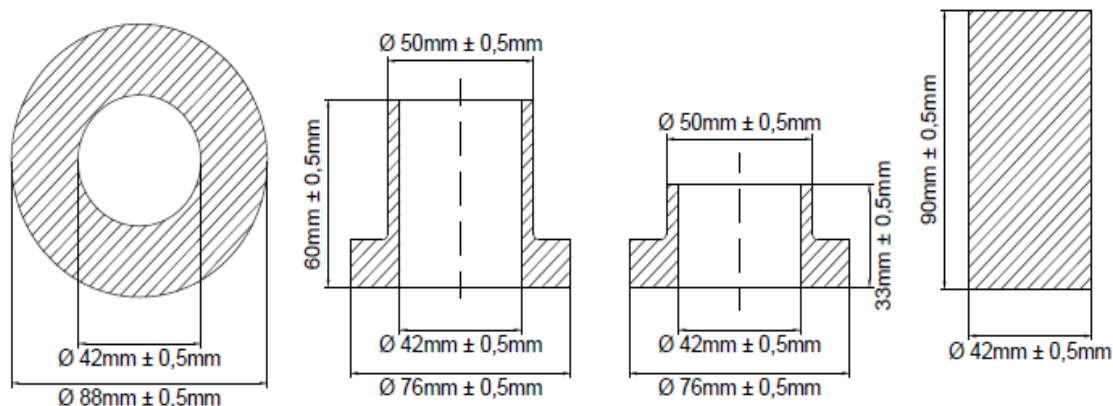


Figura 3. 4 Projeto matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel.

3.4 Obtenção dos corpos de prova dos materiais

Para a obtenção das amostras, utilizaram-se dois formatos de corpos de prova, cilindro e anel, para a obtenção das propriedades físicas, magnéticas e elétricas de interesse. Para cada geometria e liga estudada compactou-se três amostras, sendo que o resultado final apresentado gerou-se a partir da média das três amostras. As propriedades coletadas são:

- a) Densidade do compactado verde e após o tratamento térmico;
- b) Resistividade Elétrica;
- c) Curva de Histerese; e
- d) Curva de Magnetização.

3.3.1 Matéria-prima empregada no estudo

Os pós puros foram separados nas devidas proporções percentuais para cada liga e colocados em misturador convencional do tipo cone durante o tempo médio de uma hora para cada material. Nesse processo o pó de Ferro ASC100.29, adicionado com o pó de Fosfeto de Ferro (Fe₃P) e o lubrificante estearato de zinco, formaram a liga Fe2%P. Nos pós da tecnologia Somaloy® esta etapa serviu somente para a adição do lubrificante.

3.3.2 Compactação dos corpos de prova dos materiais

As ligas previamente misturadas partiram para a etapa de compactação das

amostras em formato cilíndrico (Figura 3.5a), onde a prensa mecânica da marca EKA foi utilizada, com capacidade de 400 kN. Na sequência compactou-se os corpos de provas em forma de anel (Figura 3.5b), utilizando a prensa mecânica da marca EMIC, com capacidade de 600 kN.



Figura 3. 5 Amostras cilíndricas (a) e amostras em anel (b).

Para os compósitos da família Somaloy®, a pressão utilizada na compactação das amostras foi 800MPa, por indicação da própria fabricante [48]. Nas ligas Fe2%P, empregou-se a pressão de 600 MPa, mesma pressão utilizada com sucesso em trabalhos anteriores [1; 2] pois, materiais para aplicações magnéticas via metalurgia do pó são comumente compactados a 600 MPa, o que lhes garante a densidade adequada para sua funcionalidade [23]. De forma resumida, as pressões utilizadas para cada liga estão dispostas na Tabela 3.2.

Tabela 3. 2 Pressões utilizadas na compactação das amostras

Liga	Pressão utilizada (MPa)
Somaloy 700 1P	800
Somaloy 700 3P	800
Fe2%P	600

O cálculo da força a ser utilizada nas prensas, a fim de garantir a pressão desejada, foi definido a partir da área de cavidade da matriz [1; 2], portanto, observou-se o desenho dimensional das matrizes (Tabela 3. 3).

Tabela 3. 3 Forças utilizadas na compactação das amostras

Formato da Amostra	Área (mm ²)	600 MPa Força (kN)	800 MPa Força (kN)
Cilindro	132,73	78,06	104,15
Anel	581,35	342,05	452,11

3.3.3 Tratamento térmico dos corpos de prova

A etapa de tratamento térmico constitui a fase final de consolidação dos pós, onde o material compactado verde é aquecido, sob condições de temperatura, tempo e atmosfera controlados. Nesta etapa o material adquire propriedades de resistência mecânica, dureza e densidade desejadas. Para isso, cada liga possui seus padrões específicos para a etapa de tratamento térmico, pois os padrões utilizados irão definir as propriedades finais desejadas. No caso de ligas comerciais, a fabricante já possui padrões específicos para esta etapa, como é o caso do Somaloy®, visto no item 2.7 deste trabalho.

Desta forma, seguem os parâmetros utilizados para o tratamento de cada material neste trabalho.

Somaloy 700 1P

Para o tratamento térmico do Somaloy 700 1P, este é aquecido utilizando temperatura de 530°C, durante 30 minutos ao forno [48]. Duas amostras cilíndricas do material Somaloy 700 1P podem ser vistas na Figura 3.6a, amostra verde e Figura 3.6b, amostra após o processo de cura.

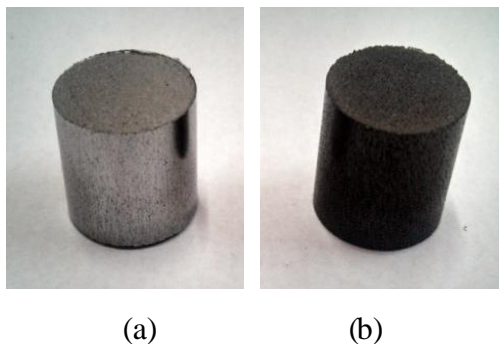


Figura 3. 6 Amostras cilíndricas de Somaloy 700 1P, à esquerda verde e à direita curada

Somaloy 700 3P

No Somaloy 700 3P, a cura do material é feita em forno com atmosfera controlada utilizando dois patamares de temperatura diferentes durante o processo. O primeiro patamar serve para a retirada do lubrificante e a segunda a finalização do tratamento térmico do material em atmosfera de nitrogênio, conferindo a camada de oxidação para a peça. O gráfico da Figura 3.7 apresenta as etapas deste processo.

Tratamento térmico - Somaloy 3P

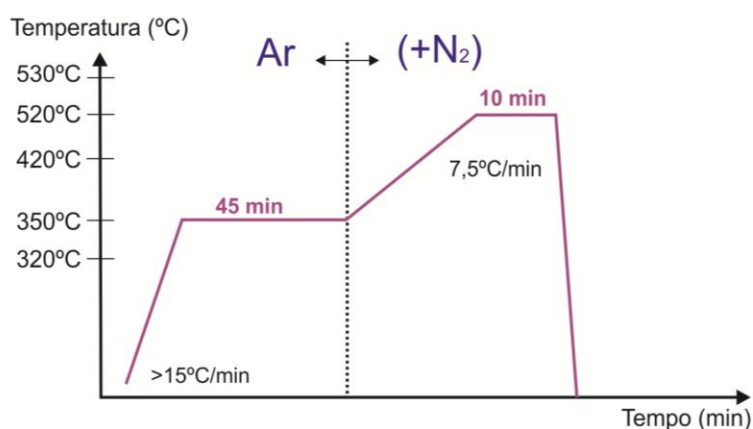


Figura 3.7 Ciclo de tratamento térmico para o Somaloy 700 3P [40].

A cura dos corpos de prova com o material Somaloy 700 3P, foi realizada em forno tubular vertical, com atmosfera controlada em primeiro momento de ar, para a eliminação do lubrificante, e posteriormente de nitrogênio de alta pureza (99,99%) para a finalização do processo de cura. Utilizou-se taxa de aquecimento de 15°C/min até atingir 350°C, permanecendo durante 45 minutos nesta temperatura para eliminação do lubrificante empregado. Após é submetido a uma taxa de aquecimento de 7,5°C/min até atingir 520°C, ficando nesta por 10 minutos.

Fe2%P

O tratamento térmico para esse material realizou-se em forno tubular vertical, com atmosfera inerte de argônio de alta pureza (99,99%), que evita a oxidação durante o processo [1; 2]. A taxa de aquecimento foi de 10°C/min. Empregou-se dois patamares durante o processo térmico de sinterização. O primeiro patamar, a 550 °C, para garantir a extração do estearato de zinco e o segundo a 1150 °C, onde ocorreu a sinterização,

permanecendo nesta temperatura durante 60 minutos. Após, as peças foram mantidas no forno, para resfriamento lento, até a temperatura ambiente [2].

A Figura 3.8 representa o gráfico com o ciclo de tratamento térmico para a liga Fe2%P.

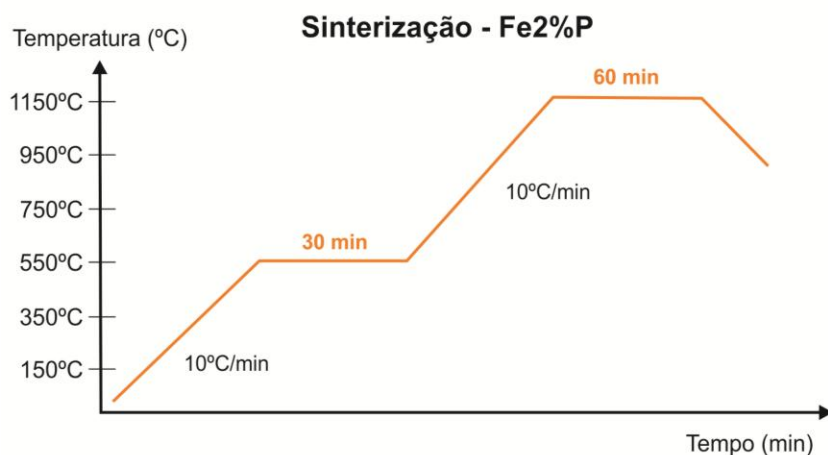


Figura 3. 8 Ciclo de tratamento térmico para a liga Fe2%P [2].

3.4 Obtenção das propriedades físicas e magnéticas dos corpos de prova

A retirada de informações a partir dos corpos de prova de cada material serve principalmente para a análise de propriedades importantes, como densidade, resistividade e curvas magnéticas, que possam interferir no resultado do trabalho. Assim, correções podem ser aplicadas ao processo de confecção da peça final, como também pode ser avaliada a importância dessas propriedades no desempenho do motor.

3.4.1 Densidade dos corpos de prova

Os corpos de prova na forma de cilindro tiveram suas dimensões medidas antes e após o tratamento térmico com o auxílio de uma balança de precisão Marte, modelo AL 500 e de um paquímetro Mitutoyo, precisão 0.01, obtendo-se assim a densidade (g/cm^3) dos corpos de prova (Tabela 3. 4). Este processo se faz necessário para avaliar quaisquer alterações de tamanho e densidade que possa interferir diretamente no projeto da matriz utilizada na confecção das peças do rotor. Caso haja alguma alteração nas peças, como contração ou expansão do material, durante o processo de tratamento, a matriz precisa ser projetada de forma a suprir estas diferenças para que a peça compactada permaneça no tamanho desejado após a passagem do tratamento térmico.

Tabela 3.4 Densidade aparente média a verde e após o tratamento térmico

Material	Densidade verde (g/cm ³)	Densidade após tratamento térmico (g/cm ³)
Somalo y 700 1P	7,32	7,27
Somalo y 700 3P	7,47	7,46
Fe2%P	6,49	6,87

3.4.2 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica dos materiais foi determinada a partir da resistência elétrica obtida para cada uma, com a utilização de um ohmímetro. Para a medição da resistência realizou-se um corte na secção do perímetro dos corpos de prova na forma de anel (Figura 3.9) para a retirada do corpo de prova [50; 51].



Figura 3.9 Corpo de prova para determinação da resistividade.

A resistividade elétrica foi calculada com a Equação 1, a partir da resistência elétrica dos corpos de prova em forma de anel [42; 43].

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} \quad (\text{Equação 1})$$

Considerando:

ρ - Resistividade Elétrica ($\Omega \cdot m$)

R - Resistência (Ω)

l - Comprimento do Anel (m)

A - Área da Seção Transversal (m²)

Para obter os valores de resistência das amostras com os três materiais, utilizou-se um ohmímetro digital DO5, da marca Cropico (Figura 3.10), na realização

dos testes.

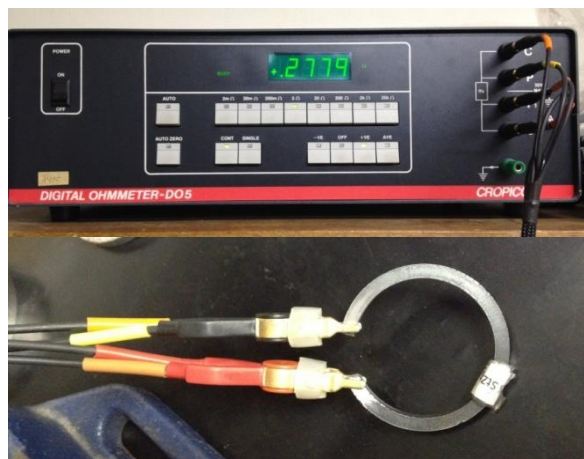


Figura 3. 10 Ohmímetro Digital DO5 (Cropico) utilizado para a obtenção da resistência das amostras.

Os resultados obtidos de resistividade, por meio da Equação 1 estão dispostos na Tabela 3. 5.

Tabela 3. 5 Resistividade média (ρ) dos corpos de prova na forma de anel.

Material	Resistividade média ρ ($\Omega.m$)
Somaloy 700 1P	14,10E-06
Somaloy 700 3P	10,13E-06
Fe2%P	0,3945E-06

3.4.3 Propriedades magnéticas dos materiais empregados no estudo

Para a obtenção da curva de histerese e magnetização, referenciou-se a norma ASTM A773/A 773M-01 [52], que discorre sobre o método padrão de ensaio para a determinação das propriedades magnéticas básicas de um material, a partir de um corpo de prova em forma de anel.

Neste teste, foram confeccionados os anéis de Rowland (Figura 3.11), a partir dos corpos de prova em forma de anel, após o tratamento térmico. O anel de Rowland consiste, basicamente, em um anel isolado (Fig. 3.11a) coberto uniformemente por uma bobina magnetizadora (Fig. 3.11b). Inicialmente os anéis foram isolados com fita isolante e, em seguida, bobinados com fio de cobre AWG 26 (0,41mm de diâmetro).

Posteriormente, isolou-se novamente com fita adesiva e bobinados com fio de cobre AWG 23 (0,57mm de diâmetro).



Figura 3. 11 (a) Anel isolado com fita; (b) Anel completamente bobinado.

Com os anéis prontos, o procedimento se seguiu conectando-os ao equipamento Remagraph-Remacomp C-710, da marca Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH, que tem suas principais partes integrantes demonstradas na Figura 3.12, onde se observa o equipamento (fig. 3.12a), os conectores de entrada (fig. 3.12b) e o *software* de aquisição dos dados (fig. 3.12c) e foi utilizado para aquisição da curva de magnetização e curva de histerese das amostras. Abaixo listados os dados de entrada para a obtenção das curvas:

- a) Massa (g);
- b) Diâmetros interno e externo (mm);
- c) Altura e espessura (mm);
- d) Densidade do material (g/cm^3); e
- e) Número de espiras do primário e secundário (N1 e N2).

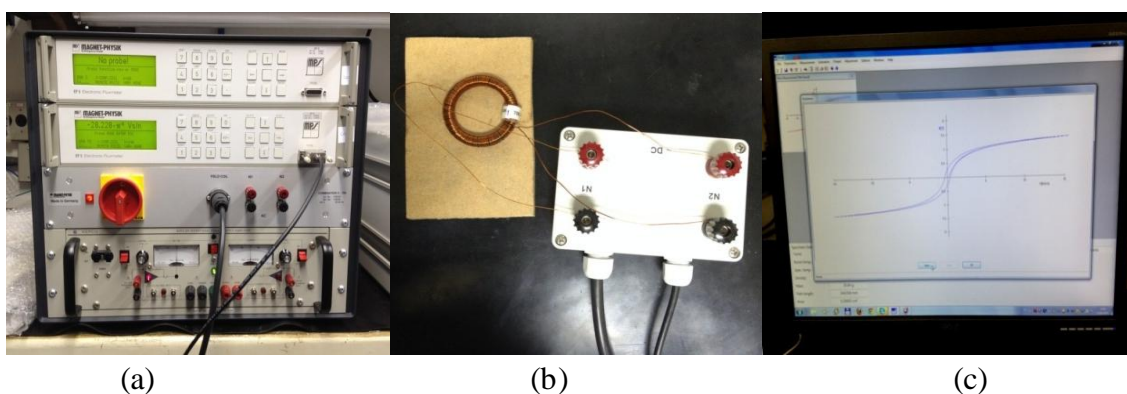


Figura 3. 12 Equipamento Remagraph-Remacomp C-710.

Com as curvas obtidas, foi possível a retirada de dados magnéticos importantes

dos materiais como a indução de saturação, magnetismo remanente, força coercitiva, as perdas por histerese e a permeabilidade máxima. A indução de saturação ou indução máxima pode ser visualizada a partir dos valores de campo (H) onde a indução tende a permanecer constante ou com declividade quase nula [15; 16].

A Figura 3. 13 apresenta uma das curvas de histerese obtida com as amostras em anel. A curva apresentada se trata do material Somaloy 700 1P.

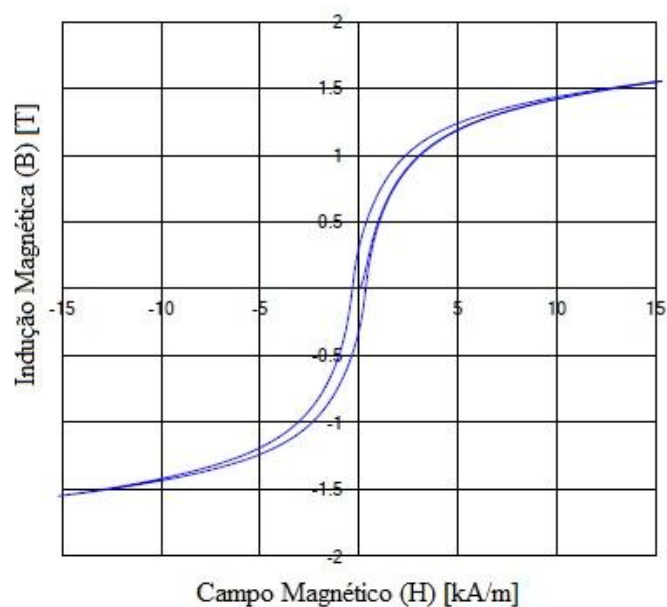


Figura 3. 13 Curva de histerese Somaloy 700 1P.

Com a curva de histerese é possível a retirada de valores de indução de saturação, magnetismo remanente e força coercitiva. A indução também pode ser visualizada na curva de magnetização do material, representada na Figura 3.14.

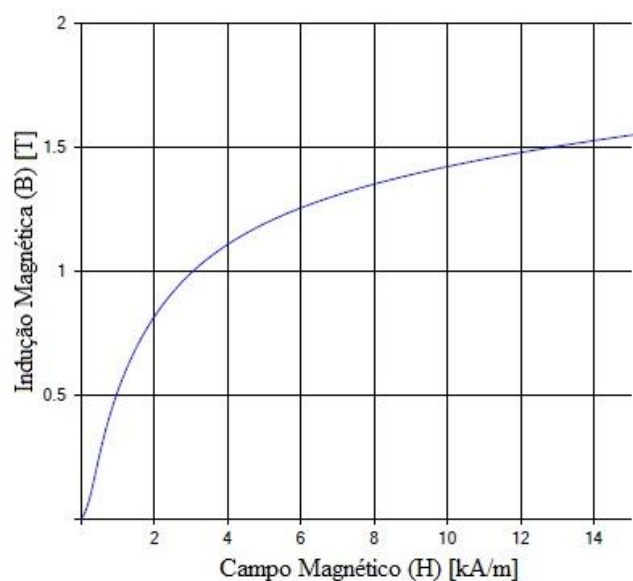


Figura 3. 14 Curva de magnetização Somaloy 700 1P.

Outra curva importante obtida com este procedimento é a curva de permeabilidade magnética do material, representada na Figura 3.15.

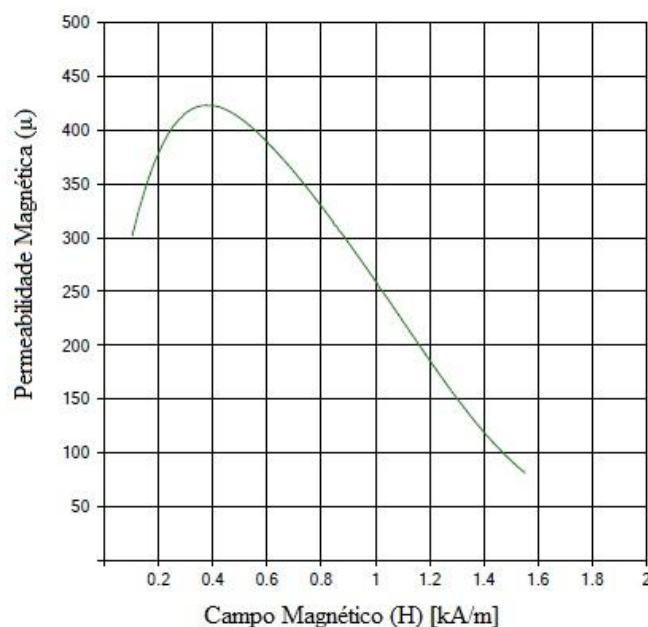


Figura 3. 15 Curva de permeabilidade magnética Somaloy 700 1P.

A permeabilidade máxima se encontra no ponto da curva de magnetização onde a relação de B e H é máxima, ou seja, o maior ponto na curva de magnetização, sendo designada por $\mu_{\text{máx}}$.

3.5 Projeto da máquina elétrica proposta

Para realização deste estudo, considerou-se como base um motor elétrico da empresa Imobras, que é parte integrante de um eletroventilador comercial da empresa (Figura 3.16). As características de montagem foram respeitadas, sendo utilizado o mesmo procedimento padrão da empresa nos motores com os novos materiais, a fim de avaliar o desempenho dos materiais em estudo.

Em relação ao aspecto dimensional, foram utilizados para os testes a mesma carcaça, estator, escovas e o eixo do motor. Respeitando o dimensionamento do motor comercial foram utilizados os mesmos dados de bobinagem. O número de espiras por Slot de 44 espiras com fio esmaltado 24 AWG, 0,2051 mm².

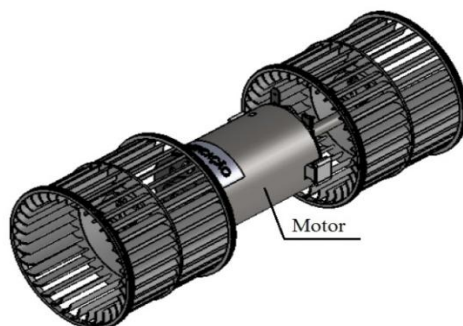


Figura 3. 16 Imagem ilustrativa eletroventilador, Imobras 24V, CC.

Na Figura 3.17, podem ser observados os aspectos dimensionais do eletroventilador utilizado como base para a construção dos novos motores. A massa aproximada do eletroventilador é de 1,050 kg.

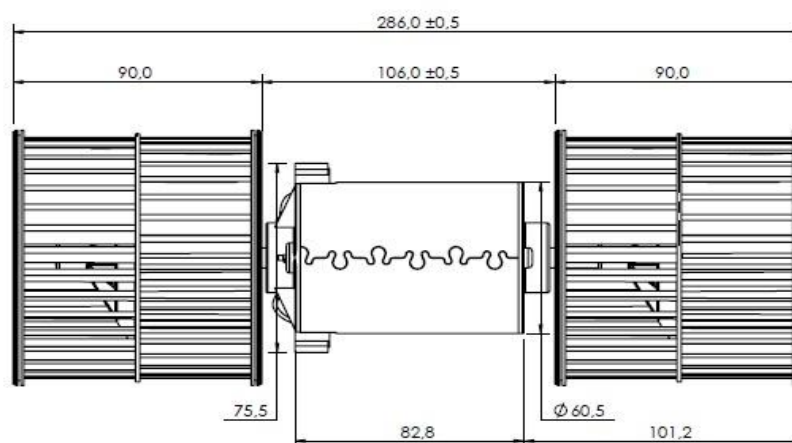


Figura 3. 17 Desenho técnico eletroventilador, Imobras 24V, CC.

Na Tabela 3.6 podem ser observadas informações sobre a pressão, vazão e corrente do eletroventilador disponibilizada pela empresa fabricante, utilizando 27V como tensão de teste.

Tabela 3. 6 Pressão (mmCA); vazão (m³/h) e corrente (A) do eletroventilador.

Pressão (mmCA)	Vazão (m ³ /h)	Corrente (A)
25	580	5,5
20	620	6
15	680	6,4
10	720	6,8
5	760	7
0,5	830	7,5

Ainda pode ser observado na Figura 3. 18, o motor em corte, com suas partes

constituintes: carcaça, estator e núcleo do rotor, assim como dados de tensão e rotação nominais do motor.

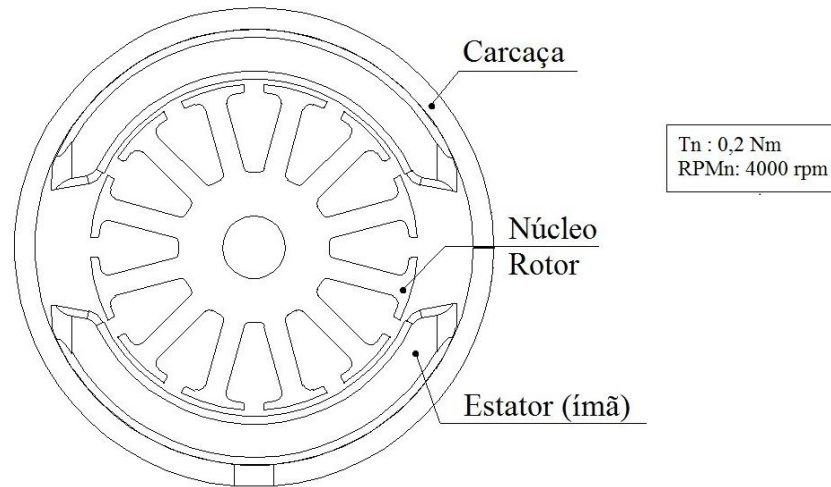


Figura 3. 18 Desenho técnico do motor em corte.

3.5.1 Projeto das matrizes

O projeto da matriz de compactação é uma etapa muito importante dentro do processo, pois desta matriz é confeccionado o núcleo rotor nas dimensões finais. Assim, todas as medidas devem ser respeitadas. Outro ponto importante para este projeto são as características dos compósitos que serão compactados. Fatores como contração ou expansão do material após o tratamento térmico, por exemplo, fazem com que a matriz seja projetada de forma a abranger essas diferenças, para que a peça final possa ser mantida no tamanho exato de projeto ($\pm 7,89\%$).

Considerando o núcleo do rotor, foram retiradas as medidas de uma estrela de aço de sua composição (Figura 3.19)

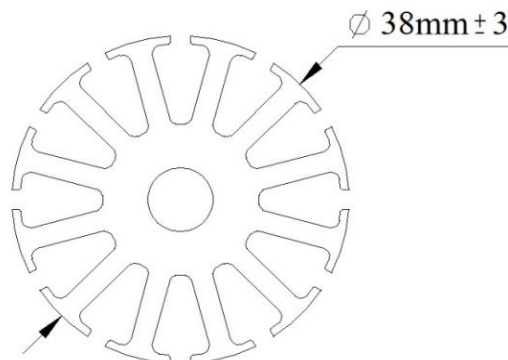


Figura 3. 19 Estrela de aço do motor base.

Com o tamanho da estrela de aço e considerando que não houve contração ou

retração nas amostras dos materiais que pudessem comprometer o resultado final, visto na Tabela 3. 4, após os processos de fabricação, a matriz de compactação dos núcleos foi projetada.

Respeitando a altura final do núcleo rotor montado, com 30mm, a matriz foi projetada para fabricar peças, com aproximadamente 10mm de altura, para que na montagem fossem utilizadas 3 peças na formação do núcleo.

Na Figura 3.20, pode ser observado o projeto dimensional da matriz do núcleo rotor.

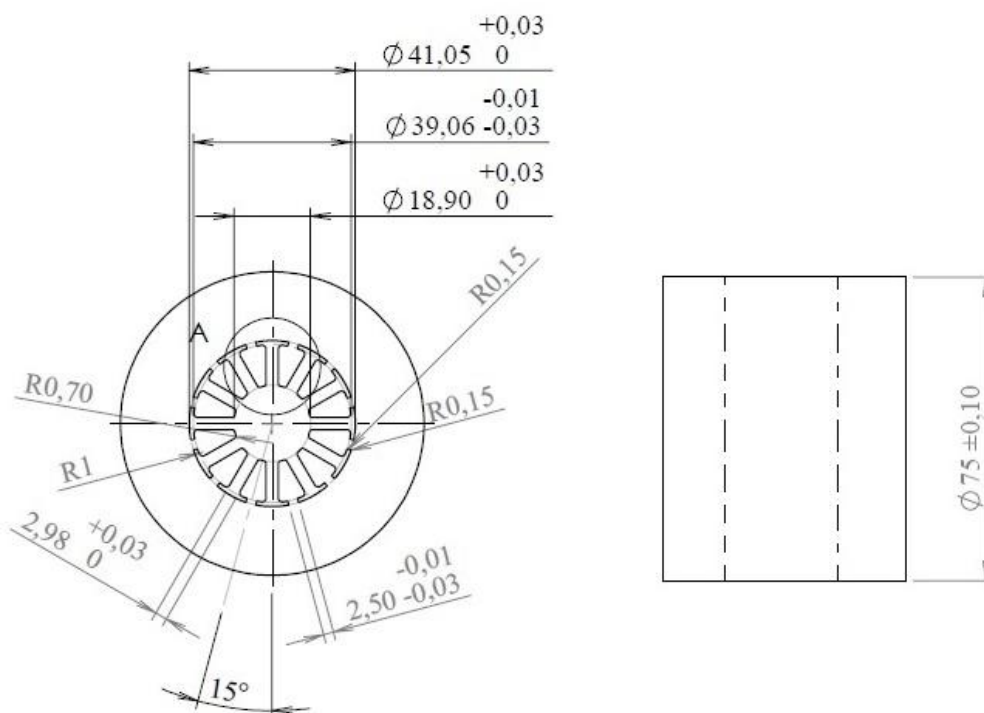


Figura 3. 20 Projeto dimensional da matriz para compactação do núcleo rotor.

O material definido para a fabricação da matriz foi o aço AISI M2, que em função do balanceamento químico apresenta alta temperabilidade, alta tenacidade, alta resistência ao desgaste e excelentes propriedades de corte.

Este material é amplamente aplicado em brocas, machos, fresas comum e tipo caracol, facas, brochas, alargadores, pentes de laminação de rosca entre outros e indicado para fabricação de matrizes e punções de trabalho a frio.

Após o processo de usinagem e retífica foram aplicados à matriz, tratamentos térmicos de têmpera e revenimento do material, conferindo-lhe o aumento da resistência mecânica. Obteve-se a matriz da Figura 3.21b e os punções inferior (Figura 3.21a) e superior (figura 3.21c).

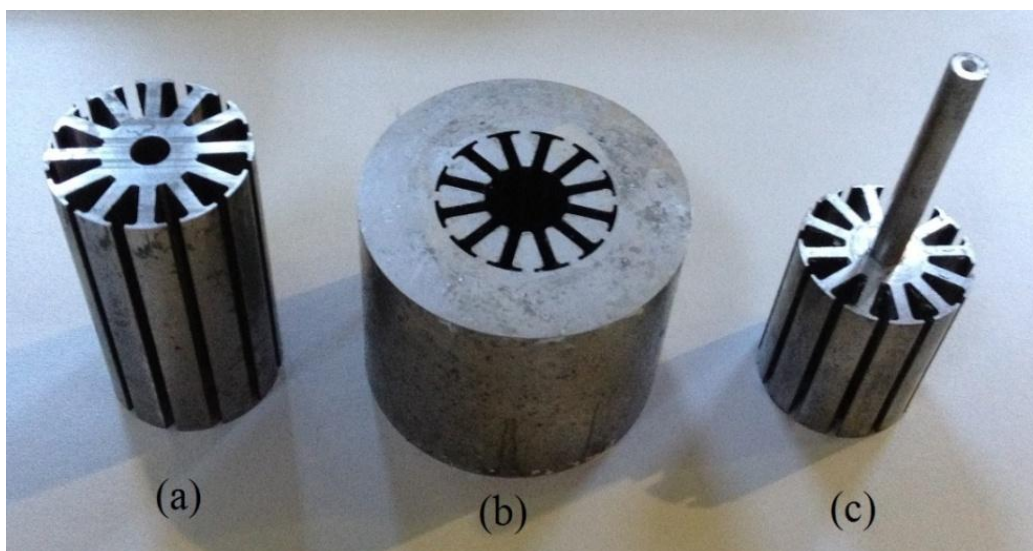


Figura 3. 21 Punção inferior (a); matriz para confecção do núcleo rotor (b); punção superior (c).

3.5.2 Compactação

A compactação das peças do rotor, para garantir a força necessária, realizou-se na prensa mecânica, marca EMIC, com capacidade de 600 kN. A pressão utilizada para as compactações foram as mesmas dos corpos de prova, 800MPa para o Somaloy® e 600MPa para o Fe2%P. A Figura 3.22 apresenta a compactação na matriz.



Figura 3. 22 Compactação na matriz do núcleo do rotor.

Novamente, a fim de garantir a pressão desejada para os materiais a força de compactação utilizada na prensa foi definida a partir da área de cavidade da matriz, neste caso, a área do núcleo do rotor (Tabela 3. 7).

Tabela 3. 7 Forças utilizadas na compactação do núcleo rotor.

Área do núcleo do Rotor (mm²)	600 MPa Força (kN)	800 MPa Força (kN)
701,95	415	550

Para a montagem do núcleo são necessárias três peças compactadas de 10mm de cada material, para alcançar os 30mm da altura do rotor. Assim, compactaram-se quatro peças, sendo que uma ficou como reserva. A peça compactada sendo retirada da matriz é apresentada na Figura 3.23.



Figura 3. 23 Peça compactada sendo retirada da matriz.

3.5.3 Tratamento térmico

O tratamento térmico das peças seguiu os mesmos passos do tratamento das amostras, descrito no item 3.3.3 deste trabalho e o resultado final do tratamento pode ser visto na Figura 3.24, onde estão dispostas as peças ainda verdes e as peças já com o tratamento térmico, apresentando uma tonalidade mais escura, dos materiais Somaloy 700 3P (fig. 3.24a), Somaloy 700 1P (fig. 3.24b) e liga Fe2%P (fig. 3.24c).



Figura 3. 24 Compactado verde (esquerda) e após tratamento térmico (direita) para os materiais utilizados

3.5.4 Montagem da máquina proposta

A montagem final da máquina elétrica foi executada na empresa Imobras, seguindo o seguinte processo: prensagem do pacote no eixo (fig. 3.25 a, b), isolamento do pacote (fig.3.25 c,d), posicionamento do coletor (fig. 3.25 e), bobinamento (fig. 3.25 f), solda, retífica e balanceamento (fig. 3.25 g), e por fim a montagem na carcaça do motor padrão (fig. 3.25 h).

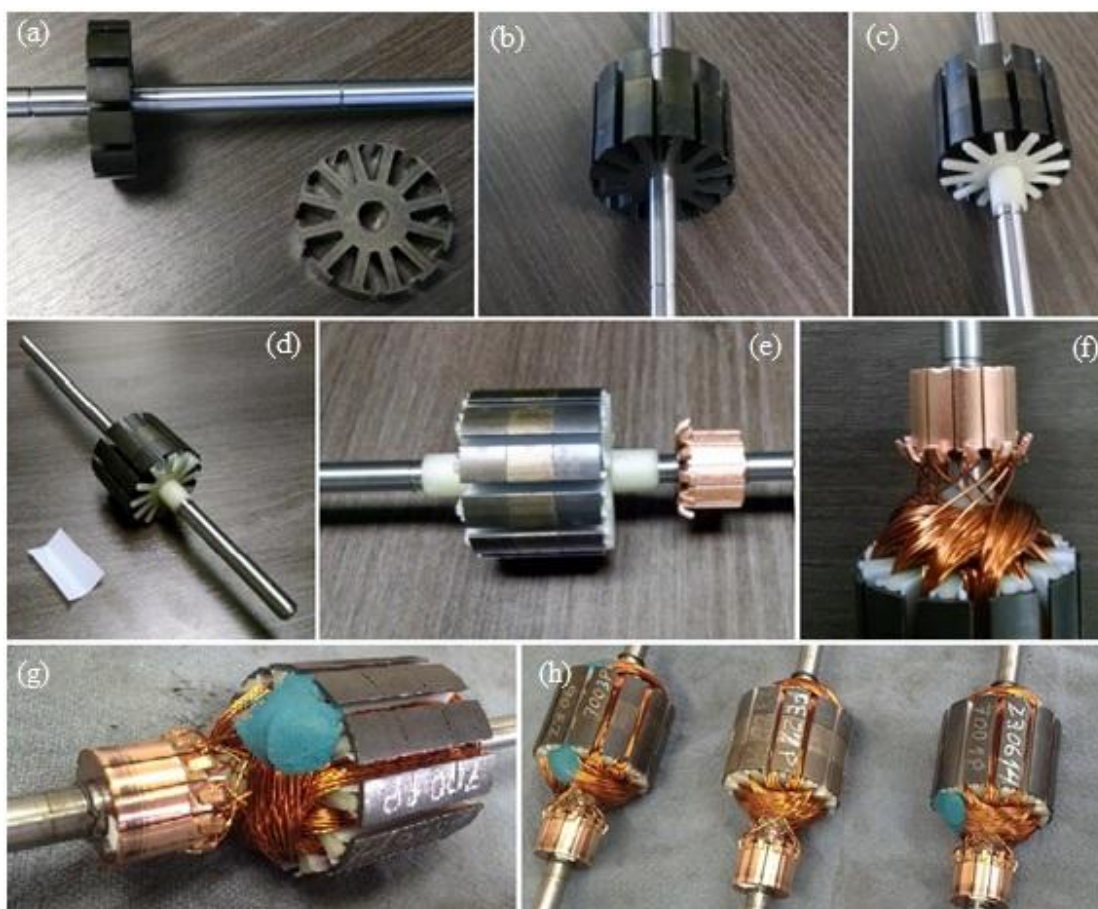


Figura 3.25 Prensagem do pacote no eixo (a, b), Isolamento do pacote (c, d), Posicionamento do coletor (e), Bobinamento (f), Núcleos finais balanceados (g, h).

3.5.5 Ensaio da máquina

Os ensaios para análise dos rotores foram realizados na empresa Imobras, na cidade de Alto Feliz/RS, de acordo com os ensaios padronizados de produção da empresa para os seus motores.

Para validação das amostras foram realizados ensaios de torque, ensaio a vazio e gerador, do qual foram retiradas as características de torque, rotação, potência, eficiência, corrente, assim como as perdas e indução das máquinas.

Um dos testes efetuados foi o teste em bancada com dinamômetro MAGTROL, programado via *software*, que pode ser observado na Figura 3.26. Neste ensaio são avaliados os dados de rotação, torque, potência e corrente do motor.

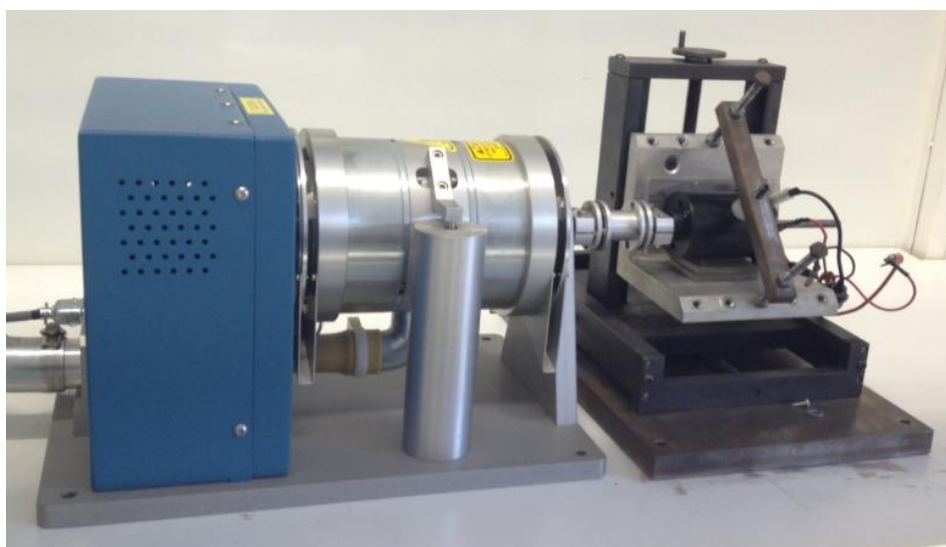


Figura 3. 26 Teste em bancada dos motores (Dinamômetro).

Outro ensaio realizado foi o ensaio da máquina como gerador, que pode ser visualizado na Figura 3.27. Neste ensaio são coletados os dados de tensão e rotação do motor, que posteriormente são utilizados para os cálculos da velocidade angular e indução do motor.

Com o teste de desempenho, a obtenção de dados importantes foi possível, como a indução, as perdas totais, divididas entre as perdas por ciclo de histerese, as perdas no aço ou perdas por correntes parasitas e as perdas nas escovas, a rotação máxima atingida e a rotação nominal dos motores, assim como também a corrente nominal e a eficiência obtida por cada um dos motores, que relacionam todos os dados acima.

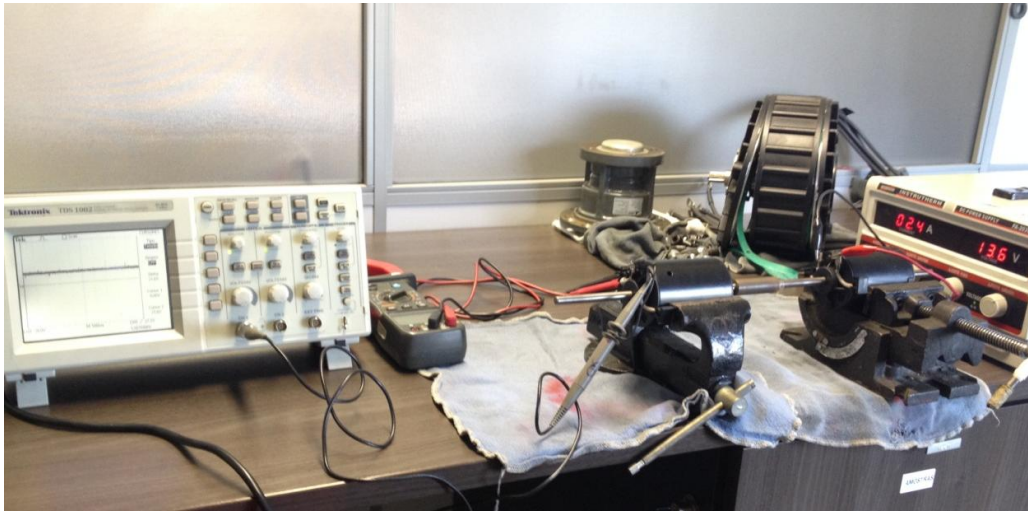


Figura 3. 27 Teste em bancada dos motores (Ensaio Gerador).

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada a discussão em relação aos resultados obtidos no trabalho, de forma que possam ser avaliados e discutidos. Esta proposta pode ser dividida em duas partes: estudo do material e estudo da máquina.

O estudo do material descreve a análise dos resultados obtidos com a confecção das amostras, destacando as propriedades alcançadas no processo e o estudo da máquina faz referência ao desempenho dos motores avaliados com cada um dos materiais utilizados na construção dos rotores.

4.1 Estudo do material

De acordo com as dimensões obtidas a partir dos corpos de prova cilíndricos, observou-se que a densidade dos corpos de prova das ligas Somaloy® não tiveram variação expressiva, ou seja, menores que 1% após o tratamento térmico. A liga Fe2%P apresentou aumento de 5% em sua densidade após a sinterização, devido à presença do Fósforo na composição, que promove a formação de fase líquida quando o material é sinterizado.

Os valores obtidos na densidade do material Somaloy® ficaram abaixo do valor disponibilizado pelo fabricante em seus materiais para os dois casos, tanto com o material 700 1P com 2,42% de diferença, quanto para o 700 3P com diferença de 1,45% (Tabela 4.1).

Tabela 4. 1 Comparação da densidade medida no material com a densidade fornecida pela fabricante (Somaloy®)

Material	Densidade medida (g/cm³)	Densidade Literatura (g/cm³) [46]
Somaloy 700 1P	7,27 ± 0,03	7,45
Somaloy 700 3P	7,46 ± 0,03	7,57

O teste de resistividade elétrica apresentou-se dificultoso nas ligas Somaloy® e isto se deve ao tipo de amostra utilizada. Neste teste utilizou-se a amostra em forma de anel, formato utilizado como padrão dentro do LdTM para este fim, devido às matrizes existentes. Neste tipo de amostra é realizado um corte no anel, onde são conectados os cabos para medição.

Para a liga Fe2%P, o resultado de trabalhos anteriores foi atingido [1 ; 2], mas para o Somaloy 700 3P e Somaloy 700 1P os resultados obtidos mostraram-se diferentes dos valores apresentados pela fabricante, sendo que os valores resultantes dos testes ficaram abaixo do indicado pela empresa fabricante (Tabela 4. 2).

Considerando que para o Fe2%P o resultado atingiu o valor esperado com este procedimento, conclui-se que para materiais microencapsulados como é o caso do Somaloy®, este não seria o procedimento correto a ser utilizado, considerando que o corte aplicado na amostra possa ter rompido o revestimento isolante das partículas desses materiais, trazendo fragilidade a eles [7]. A maneira como a fabricante realiza esse procedimento não foi divulgada, mas entende-se com esses resultados que devam ser produzidos blocos inteiros para a realização do teste, com a produção de uma nova matriz de compactação.

Tabela 4. 2 Comparação da resistividade medida no material com a resistividade fornecida pela fabricante (Somaloy®)

Material	Resistividade média medida (ρ) ($\Omega.m$)	Resistividade média literatura (ρ) ($\Omega.m$) [2,46]
Somaloy 700 1P	14,10E-06	400E-06
Somaloy 700 3P	10,13E-06	200E-06
Fe2%P	0,3945E-06	0,358E-06

Em relação às propriedades magnéticas (Tabela 4. 3), os três materiais obtiveram alta indução de saturação, com valores superiores a 1,5T. Para o valor da força contrária necessária para desmagnetizar o material, a coercitividade, observou-se que as ligas Fe2%P e Somaloy 700 3P, apresentaram comportamentos semelhantes, somente para o Somaloy 700 1P que o valor de Hc apresentou ser superior. Os valores encontrados para magnetismo remanente, que representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado ($H=0$) e permeabilidade magnética, apresentaram maior diferença entre os materiais. Nestes dois itens o Fe2%P, obteve valores maiores. Uma vez que o material é mais “permeável” magneticamente, o alinhamento de seus domínios magnéticos é realizado com mais facilidade e esta por sua vez colabora para a redução dos valores da força coercitiva, que é a força contrária necessária para desmagnetizar totalmente o material.

A baixa permeabilidade do Somaloy® em comparação ao Fe2%P está

relacionada com a camada de revestimento isolante que aumenta a distribuição de entreferro, resultando em uma permeabilidade mais baixa.

Tabela 4. 3 Comparação das propriedades magnéticas encontradas

	Somaloy 700 1P	Somaloy 700 3P	Fe2%P
Indução de Saturação [B] (T)	1,54	1,54	1,5
Magnetismo remanente [Br] (T)	0,312	0,126	0,982
Força coercitiva [Hc] (KA/m)	0,337	0,242	0,211
Perdas por histerese (kJ/m ³)	2	1,5	1,5
Permeabilidade Máxima [μ]	424	408	1784

A permeabilidade magnética é uma grandeza característica de cada material e mensura o campo magnético em seu interior.

Em comparação com a permeabilidade máxima divulgada pela empresa fabricante do material Somaloy®, o valor medido nas amostras ficou abaixo do esperado, como observado na Tabela 4.4. Este resultado pode estar relacionado com o processamento do material em pó, principalmente com relação à inserção dos lubrificantes, que ocasiona resultados diferenciados de acordo com o tipo e quantidade utilizados [39]. Para a divulgação do resultado ideal do Somaloy 700 3P, a fabricante utilizou o lubrificante Lube®, de propriedade da empresa, produzido para melhorar as qualidades deste material específico. Outro motivo também aplicável está relacionado com o tipo de matriz que foi utilizada na compactação. Para que a matriz deste trabalho pudesse ser utilizada em todos os materiais a compactação foi realizada a frio, já a fabricante para a compactação do Somaloy 700 3P, utiliza matriz aquecida.

Tabela 4. 4 Comparação permeabilidade medida \times permeabilidade literatura (Somaloy®)

Material	Permeabilidade máxima medida (μ_{max})	Permeabilidade máxima literatura (μ_{max})
Somaloy 700 1P	424	540
Somaloy 700 3P	408	750

4.2 Comparativo do motor elétrico CC proposto

Com os resultados obtidos com o teste de desempenho dos três rotores

construídos com o processo de metalurgia do pó, pode-se comparar com o desempenho da máquina comercial, com núcleo de chapas laminadas. Esta comparação dos quatro motores é visualizada na Tabela 4. 5.

Um dos pontos importantes a serem observados com os resultados são as perdas por correntes parasitas nos motores utilizando o Somaloy®, que ficaram abaixo do valor obtido no motor comercial que é de 4,24W. Já com o núcleo de Fe2%P, as perdas no aço foram maiores, 24,30W. A grande diferença entre os valores de perdas dos materiais testados está na camada isolante presente no Somaloy®, que colabora com o aumento da resistividade reduzindo as perdas do núcleo da mesma forma que a laminação das chapas de aço. As correntes parasitas, em função da baixa resistividade corroboram com a diminuição do rendimento do motor, outro ponto importante a ser analisado com o teste dos motores. Os motores com Somaloy® obtiveram resultados de eficiência muito próximos ao comercial que é de 73%. O motor com rotor de material 700 3P obteve 69% de eficiência e o motor com rotor de material 700 1P alcançou 73% de eficiência, como o de chapas. A liga Fe2%P, ficou abaixo do comercial, atingindo 53% de eficiência.

Tabela 4. 5 Desempenho dos motores em comparação a máquina convencional

	Chapas	700 3P	700 1P	Fe2%P
Indução (T)	0,44	0,41	0,42	0,39
Perdas Histerese (W)	10,79	10,83	14,82	18,67
Perdas C. Parasitas (W)	4,24	3,16	1,09	24,30
Perdas Escovas (W)	7,60	5,50	8,00	4,42
Rotação Máxima (RPM)	5327	5303	5467	5221
Rotação Nominal (RPM)	4584	4609	4732	4467
Corrente Nominal – In (A)	5	5,3	5,2	6,6
Torque - Tn (Nm)	0,2	0,2	0,2	0,2
Eficiência - EFFn (%)	73	69	73	53
Tensão (V)	27	27	27	27

Uma melhor análise entre os materiais pode ser visto nos gráficos, iniciando pelo gráfico da Figura 4. 1 que relaciona a potência de saída em função do torque do motor.

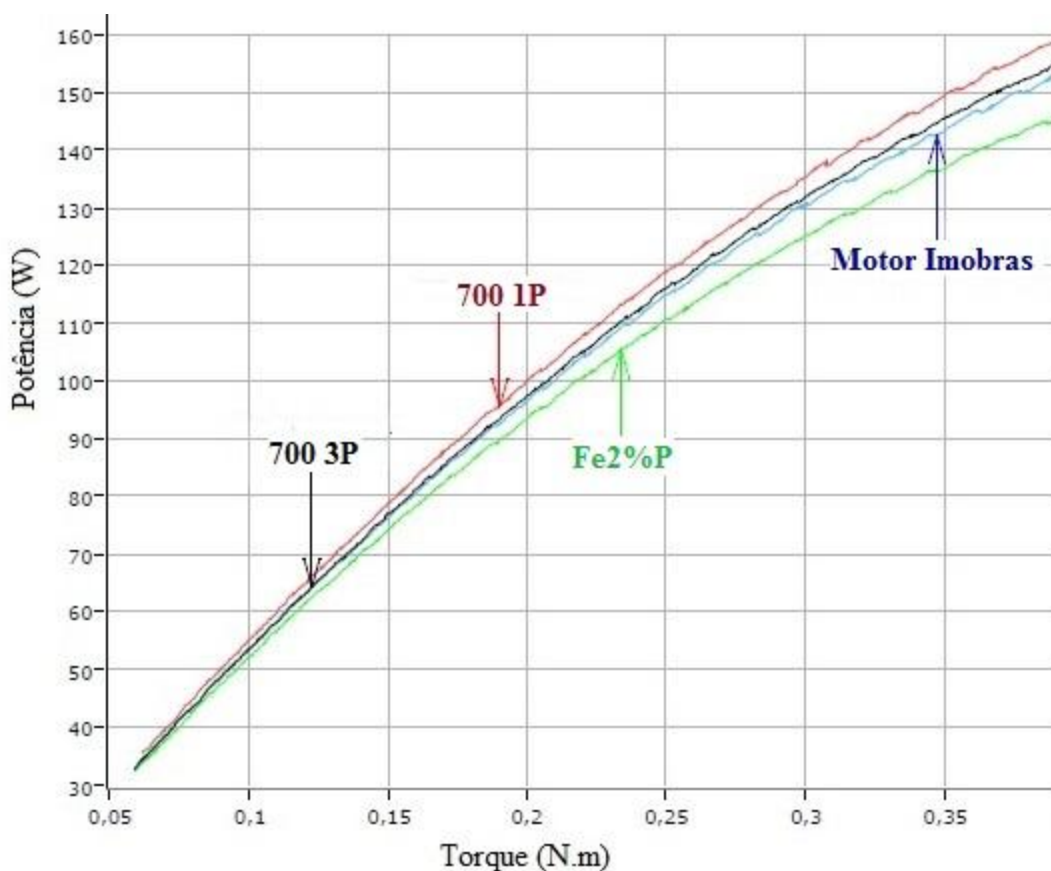


Figura 4. 1 Correlação entre potência e torque

Nesta relação pode ser observado que os motores se comportaram de forma semelhante considerando o torque nominal do motor em 0,2 N.m.

No gráfico da Figura 4. 2, onde pode ser observada a correlação entre Corrente e Torque dos motores testados, observa-se que tanto o Somaloy 700 3P quanto o Somaloy 700 1P, permaneceram com o comportamento de corrente semelhante com o comercial em função do aumento do torque. Considerando o torque nominal de 0,2N.m, os motores com o Somaloy® assim como o de chapas laminadas, referenciado no gráfico como Motor Imobras, têm a corrente próximo aos 5A, já o motor com a liga Fe2%P necessita de uma corrente maior, de 6,5A para manter o mesmo torque de 0,2N.m, comparado com os outros motores.

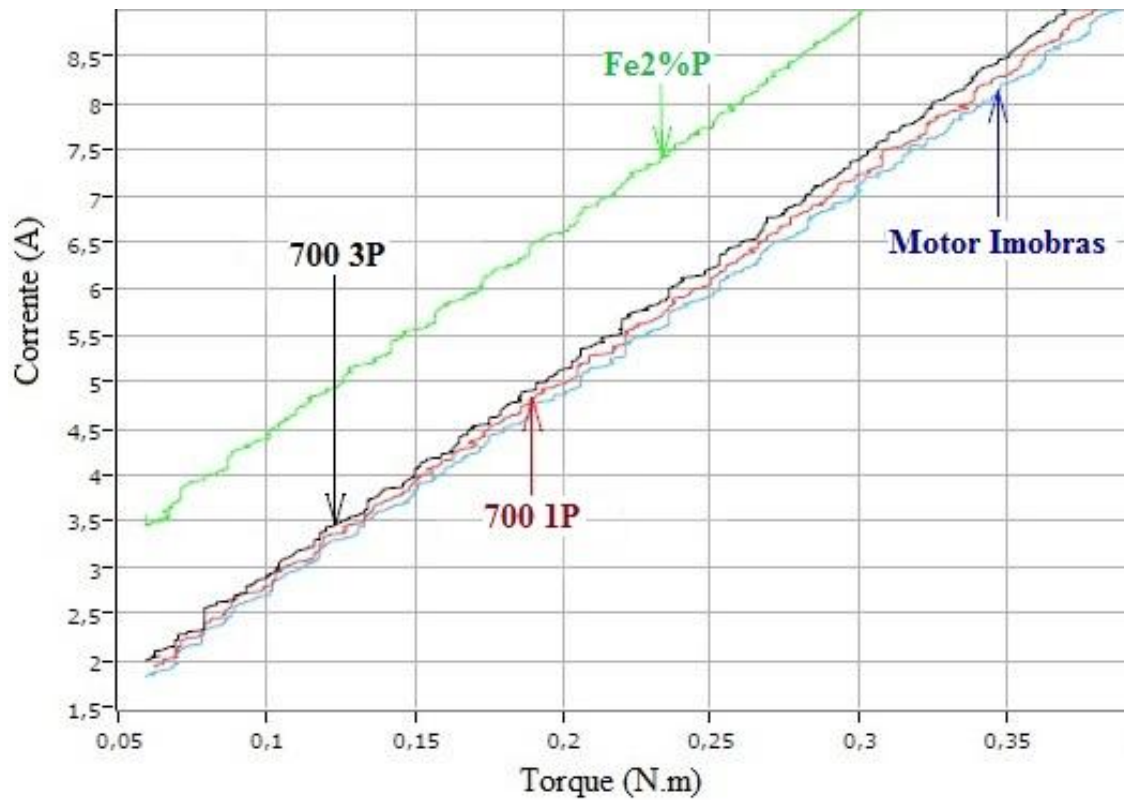


Figura 4. 2 Correlação entre corrente e torque

No gráfico da Figura 4. 3, que relaciona as perdas totais no motor com o aumento da rotação, pode-se observar o distanciamento da liga Fe2%P dos demais materiais, que continuaram semelhantes às chapas.

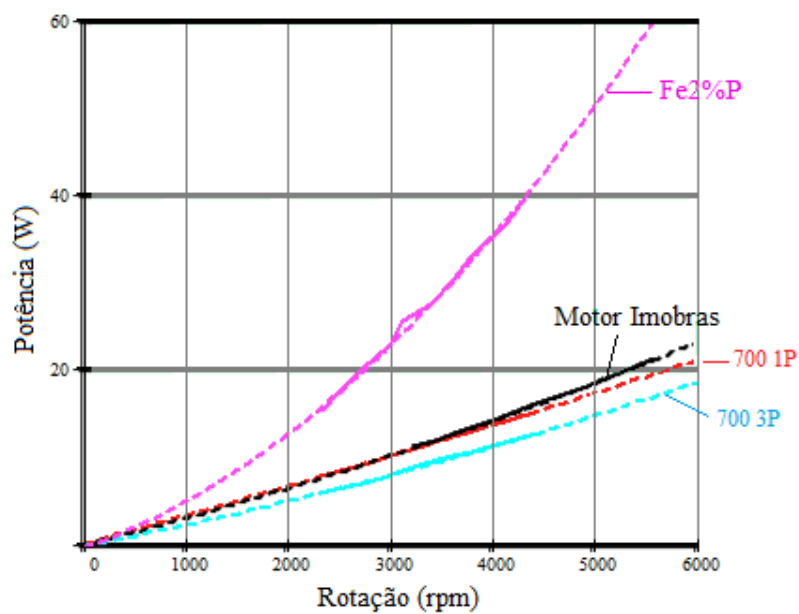


Figura 4. 3 Relação entre as perdas com o aumento do torque.

Considerando a rotação nominal do motor, o motor com a liga Fe2%P dissipa praticamente 20W a mais de potência do que o motor comercial e os produzidos com a liga Somaloy®.

Todos esses valores refletem na eficiência do motor, que pode ser avaliado com o gráfico da Figura 4. 4.

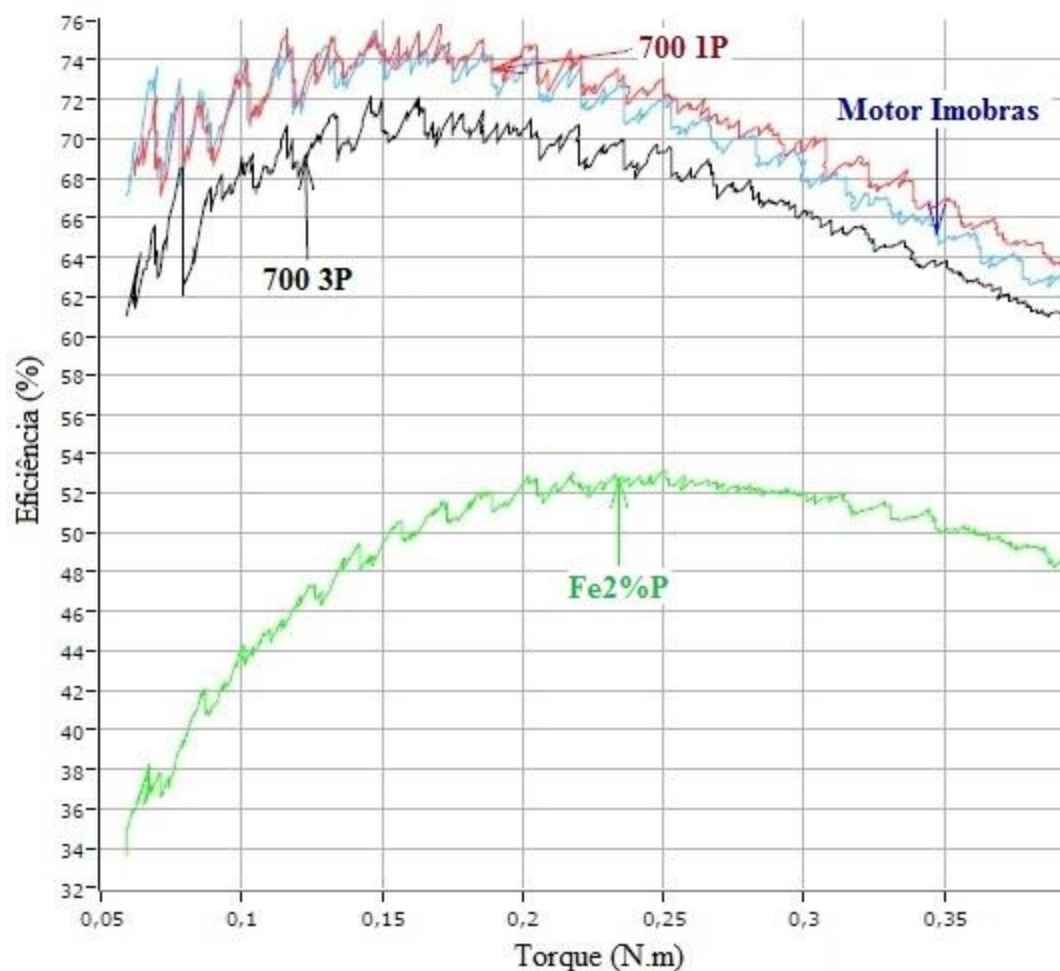


Figura 4. 4 Relação entre a eficiência dos motores com o aumento do torque.

A baixa eficiência em relação aos demais motores pode ser justificada pela não existência de isolamento entre os grãos da liga Fe2%P, causando a baixa resistividade no material e aumentando principalmente as perdas por correntes parasitas no motor.

5. CONCLUSÕES

Nesta dissertação foi apresentado o desenvolvimento e análise de um motor de corrente contínua em que o núcleo do rotor original, produzido por chapas laminadas, foi substituído por materiais produzidos a partir do processo de metalurgia do pó.

Por meio do desenvolvimento deste trabalho foi possível analisar as características dos compósitos magnéticos macios, apresentados pelas ligas Somaloy 700 1P e Somaloy 700 3P, da empresa Höganäs AB e a liga Fe2%P.

A análise em fase amostral dos materiais foi utilizada para o levantamento das propriedades físicas e magnéticas, onde foi possível a comparação com valores obtidos na literatura, seja com trabalhos anteriores como também com a fabricante do material.

Em dois momentos, os valores medidos para a liga Somaloy®, ficaram inferiores ao indicado pelo fabricante. A resistividade encontrada chega a ser quase 30 vezes menor do que a esperada. Esta discrepância provavelmente está relacionada com o tipo de amostra utilizada para o teste, tendo em vista que muitas falhas ocorreram no material durante sua preparação para o teste.

Outro valor que deve ser considerado foi a permeabilidade magnética, que obteve valor menor do que a indicada pela fabricante. Esta diferença pode estar diretamente relacionada com o processo utilizado para a obtenção da peça final, ou seja, para este trabalho o processo utilizado foi a compactação a frio, para que a matriz projetada pudesse ser utilizada para todos os materiais, assim como o lubrificante que não foi o mesmo utilizado pela empresa para a divulgação dos valores ideais. Tendo em vista que as propriedades do material final não dependem apenas da característica do pó SMC, mas dependem principalmente do seu processo de obtenção e mistura como quantidade e tipo de lubrificante utilizado, do tipo de compactação e por fim do tratamento térmico, pode-se concluir que o material SMC pode ser moldado de acordo com as propriedades finais que se deseja. Menores quantidades de lubrificante e maior temperatura de tratamento térmico em geral melhoram as propriedades magnéticas, mas também resultam em menor torque.

Quanto à liga Fe2%P, obteve eficiência menor do que os demais materiais. Esta dificuldade decorrente devido à falta da camada isolante e proporcionando o aumento das perdas por correntes parasitas e que pode ser melhorada com a isolação das partículas de pó de ferro.

Com os motores devidamente montados, ensaios de torque, vazio e gerador foram realizados na empresa Imobras, Alto Feliz/RS, para a aquisição das características de torque, rotação, potência, eficiência, corrente, assim como as perdas e indução das máquinas. Os resultados obtidos foram comparados com os valores do mesmo motor produzido com as chapas de aço laminadas convencionais.

Para uma substituição imediata de núcleos, ou seja, utilizar o mesmo motor comercial substituindo o material utilizado na fabricação do rotor, o material Somaloy® mostrou características semelhantes ao núcleo com chapas laminadas, porém não se torna prático quando a performance praticamente se iguala. A principal característica a ser aproveitada em um SMC, como o Somaloy®, por exemplo, é o seu fluxo tridimensional. Desta forma, o fluxo magnético pode ser aproveitado igualmente nas três dimensões, Para que isto ocorra esta característica precisa ser inserida em projeto. O projeto do motor que utiliza chapas de aço não se beneficia desta característica.

A modificação da máquina para que essa e outras características possam ser mais bem aproveitadas podem aumentar o rendimento do motor, assim como também reduzir seu tamanho. Se isto for considerado, a substituição das chapas laminadas pelo compósito SMC trará muitos benefícios ao projeto.

6. SUGESTÕES PARA 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:

- Confecção de novas matrizes para amostras do tipo blocos, onde a medida de resistividade se tornaria muito mais confiável para o material SMC, que sofre alterações quando existe a necessidade de cortes.

- Teste de técnicas para a criação da camada isolante para a liga Fe2%P em laboratório, capazes de reduzir as perdas por correntes parasitas apresentada por este.

- Inserir as vantagens oferecidas pelo SMC em uma nova topologia de motor, a fim de garantir maior eficiência destes materiais em relação às chapas de aço laminadas e assim se beneficiar com redução de custos.

- Uma análise econômica, para conferir após o bom desempenho da substituição de material, a viabilidade da mudança de produção da indústria.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PAULETTI, P. **Construção e análise do desempenho de um motor de indução trifásico com núcleo produzido via metalurgia do pó.** Dissertação. PPGE3M: UFRGS, 2012.
- [2] BITTENCOURT, S. D. **Caracterização de Ligas Magnéticas Sinterizadas para Aplicação em Núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas.** Dissertação. PPGE3M: UFRGS, 2012
- [3] LEWIS, J. A. **Desenvolvimento de Compósitos Magnéticos Macios Utilizados em Núcleos de Máquinas Elétricas.** Dissertação. PPGE3M. UFRGS, 2012.
- [4] CERVA, L.L. **Desenvolvimento de uma máquina síncrona com ímas permanentes e núcleo sinterizado utilizada em aerogerador.** Tese. PPGE3M. UFRGS, 2014.
- [5] BORBA, M. et al. **Development of a rotor from powder metallurgy and permanent magnets fo a sychronous machine used in wind turbines.** Tailandia - Bangkok: Sustainable Development Conference, 2014.
- [6] DA CAS, R. L. R. et al. **Desenvolvimento de um Motor Universal para Furadeira com Núcleos do Rotor e Estator a Partir da Liga Sinterizada Fe1%P.** In: CONFERENCIA INTERNACIONAL DE METALURGIA DO PÓ, IV, 2014, Porto Alegre.
- [7] HULTMAN L.O.; JACK A.G. **Soft magnetic composites - motor design issues and applications.** Proceedings of the International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, p. 194-204, 2004.
- [8] SHOKROLLAHI, H; JANGHORBAN, K. **Soft magnetic composite materials (SMCs).**Journal of Materials Processing Technology, p. 1-12, 2007.
- [9] KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores.** Editora Globo: 2006. 667p.
- [10] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr. C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas:** com introdução à eletrônica de potência. 6. ed. Bookman, 2006. 648 p.
- [11] DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** LTC, 1994. 568 p.
- [12] WEG. **Motores Elétricos:** Guia de Especificação. Rev. 12, 2013. 68p.
- [13] CARVALHO, G. **Máquinas Elétricas:** Teoria e Ensaio. 4. ed. Érica, 2011. 264 p.
- [14] NASAR, S. A. **Máquinas Elétricas.** São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1984. 216p.
- [15] KRAUS, J. D.; CARVER, K. R. **Eletromagnetismo.** Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 780 p.

- [16] JILES, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. London: Chapman and Hall, 1998. 440 p.
- [17] CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. 4. ed. Mcgraw-Hill, 2003. 770 p.
- [18] RICHARDSON, D. V. **Rotating Electric Machinery and Transformer Technology**. 4. ed. Universidade de Michigan: Prentice Hall, 1996. 731p.
- [19] DIAS, M. M. **Construção de uma máquina síncrona de relutância trifásica com rotor de material magnético macio sinterizado**. 1999, 62 p. Tese. PPGE3M. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- [20] 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, p. 379-381, 2003.
- [21] LANDGRAF, F. J. G.; SCOZ, L. C. A separação de perdas elétricas como critério de avaliação de processamento de aços elétricos. **Metalurgia & Materiais**, p. 436-438, 1995.
- [22] LANDGRAF, F. J. G. **Propriedades Magnéticas de aços para fins elétricos**. Aços: perspectivas para os próximos 10 anos. Rio de Janeiro: 2002. p.109-128.
- [23] CHIAVERINI, V.; **Metalurgia do Pó: Técnica e Produtos**. 4. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001.
- [24] GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A metalurgia do Pó: Alternativa Econômica com Menor Impacto Ambiental**. São Paulo: Editora Metallum Eventos Técnicos, 2009. 320 p.
- [25] 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.
- [26] ASM HANDBOOK. **Powder Metal Technologies and Applications**. Vol. 7. ASM International. 2000.
- [27] UPADHYAYA G. S. **Powder Metallurgy Technology**. Cambridge International Science Publishing, 2002. 160 p.
- [28] HULTMAN L.O.; JACK A.G. **Soft magnetic composites - motor design issues and applications**. Proceedings of the International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, p. 194-204, Princeton, NJ, USA. 2004.
- [29] CREMONEZI, A. **Materiais Magnéticos Moles**. A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental. Metallum Eventos Técnicos, São Paulo, p. 79-84, 2009.
- [30] 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, p.741-744, 1990.

[31] KRAUSE, R.F.; BULARZIK, H.; KOKAL, H.R. A New Soft Magnetic Material for ac and dc Motor Applications. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 6, p.710-712, 1997.

[32] PENNANDER, L. **Recent Development of Soft Magnetic Composite Materials and its Application.** Presented at ISMB, Int. Symposium of Magnetic Bearings 2014, in Linz, Austria, on August 13, 2014

[33] ISHIKAWA, T. et al. **Design of a DC Motor Made of Soft Magnetic Composite Core by the Experimental Design Method.** IEEE Transactions on Magnetics; v. 48, n. 11, p. 3132 -3135, 2012.

[34] GUO, Y. et al. **Core Loss Calculation for Soft Magnetic Composite Electrical Machines.** IEEE Transactions on Magnetics, v. 48, n. 11, p. 3112 -3115, 2012.

[35] KROGEN, O. **An exploration of alternative geometries and materials for induction motors.** Ph.D. Thesis. Department of Electrical and Electronic Engineering University of Newcastle, England, 2000.

[36] HULTMAN, L.; ANDERSSON, O. **Advances in SMC Technology – Materials and Applications.** Presented at EURO PM2009 in Copenhagen, Denmark on October 13, 2009.

[37] LI, Y., et al. **Magnetic Properties Measurement of Soft Magnetic Composite Materials Over Wide Range of Excitation Frequency.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 48, n. 1, 2012.

[38] SVENSSON, L. et al. Soft magnetic moldable composites: Properties and applications. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 324, p. 2717-2722, 2012.

[39] JANSSON, P. **Processing Aspects of Soft Magnetic Composites.** Presented at EURO PM2000 in Munich, Germany on October, 2000.

[40] YE, Z. **Modelling and experimental analysis of core losses of smc components.** Presented at World Congress PM2014 in Orlando USA, on May 22, 2014.

[41] BUREŠ, R., et al. **Microstructure and Fracture of Magnetic Composites with Vitroperm Addition.** Powder Metallurgy Progress, v.12, n. 3, p. 181-186, 2012.

[42] KOLLÁR, P. et al. Power loss separation in Fe-based composite materials. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 327, p. 146-150, 2013.

[43] SLUSAREK, B. et al. Characteristics of power loss in soft magnetic composites a keyfor designing the best values of technological parameters. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 581, p.699-704, 2013.

- [44] BAYRAMLI, E., GOLGELIOGLU, O., ERTAN, H. B. Powder metal development for electrical motor applications. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 161, p. 83-88, 2005.
- [45] PENNANDER L., JACK, A.; **Soft magnetic iron powder material AC properties and their application in electrical machines**, Magn. Mater., Euro PM, 2003.
- [46] AB, Höganäs. **Soft Magnetic Composites**. Disponível em: <<http://www.hoganas.com/en/Segments/Somaloy-Technology/>>. Acesso em: 20 nov. 2014.
- [47] IMOBRAS. **Imobras Motores Elétricos**. Disponível em: <<http://www.imobras.ind.br>>. Acesso em: 20 nov. 2014.
- [48] COLTON, J. S. **Metal Powder Processing**. Georgia Institute of Technology, ME 4210: Manufacturing Processes and Engineering, 2009. 29 p.
- [49] HÖGANÄS AB. **Component processing**. Sweden, 2013. 34 slides.
- [50] GUSSOW, M. **Eletricidade Básica**. 2. ed. Makron Books, 1997. 566 p.
- [51] BERNARDI, L. O.; PANTANO, R. Medição da resistividade elétrica em condutores metálicos. **Revista Intellectus**, n. 19, p. 55-69, 2012.
- [52] NORMA ASTM A773/A 773M-01 - Standard Test Method for Direct Current Magnetic Properties of Low Coercivity Magnetic Materials Using Hysteresigraphs
- [53] DIAS, M. M. et al. Materiais magnéticos produzidos por metalurgia do pó. São Paulo: **M & M - Metalurgia e Materiais**, v. 55, n. 483, p. 625-625, 1999.
- [54] LENEL, F. V. Magnetic Applications. **Metals Handbook**, v. 7, p. 638-641, 1984.
- [55] SMITH, L. **A Knowledge-based System for Power Metallurgy Technology**. Bury St Edmunds: Professional Engineering Publishing Limited, 2003. 174 p.
- [56] BRANDBURY, S. **Powder Metallurgy Equipment Manual**. New Jersey: ISBN, 1986.
- [57] DIAS, M. M. **Obtenção de Ímãs de Ferrita de Estrôncio Anisotrópicos**. Dissertação. PPGE3M: UFRGS, Porto Alegre-RS, 1996.

ANEXOS

ANEXO A - GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS ENVOLVIDAS NO ESTUDO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

O estudo apropriado das máquinas elétricas se inicia pela compreensão das principais grandezas físicas relacionadas com o eletromagnetismo.

A.1. Campo, indução e fluxo magnético

Campo Magnético (\mathbf{H}): De acordo com a Lei de Ampère uma carga elétrica em movimento ou corrente elétrica \mathbf{I} produz, além do campo elétrico, um campo magnético \mathbf{H} [15; 16; 19].

$$\oint \bar{H}d\bar{l} = \int_s \mathbf{J}ds = I \quad (\text{Equação 1})$$

onde \mathbf{H} é o campo magnético [A/m], $d\bar{l}$ é o comprimento infinitesimal [m], \mathbf{J} é a densidade de corrente [A/m²], ds é um elemento infinitesimal de superfície [m²] e I é a corrente elétrica [A]. No sistema CGS \mathbf{H} é expresso em Oersted [Oe] tal que [16; 19]:

$$0,01256 \text{ Oe} = 1 \text{ A/m}$$

Densidade de Fluxo ou Indução Magnética (\mathbf{B}): Um campo magnético \mathbf{H} induz fluxo magnético ou indução magnética \mathbf{B} , que se relacionam através da permeabilidade magnética do meio μ tal que [15; 16]:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} = \mu_o\mu_r\mathbf{H} = \mu_o\mathbf{H} + \mathbf{J}_s \quad (\text{Equação 2})$$

onde \mathbf{B} é a indução magnética [T], μ é a permeabilidade magnética do meio [H/m], μ_r é a permeabilidade magnética relativa [adimensional], μ_o é a permeabilidade magnética do vácuo [$4\pi \times 10^{-7}$ H/m] e \mathbf{J}_s é a polarização de magnetização [T]. No sistema CGS \mathbf{B} é expresso como Gauss [G] tal que [15; 16]:

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

Para a maioria dos materiais \mathbf{B} e \mathbf{H} tem mesma direção e sentido (meios isotrópicos) e μ é um escalar. Em alguns cristais \mathbf{B} pode não ter a mesma direção de \mathbf{H} (meios anisotrópicos) e μ é um tensor [15; 19].

Fluxo Magnético Total (ϕ): Para \mathbf{B} uniforme e superfície plana o fluxo magnético total ϕ perpendicular à superfície pode ser escrito como [15; 16]:

$$\phi = BA \quad (\text{Equação 3})$$

onde ϕ é o fluxo magnético total [Wb], \mathbf{B} é a indução magnética [T] e \mathbf{A} a área da seção, transversal às linhas de fluxo [m^2]. Quando as linhas de indução magnética não são perpendiculares à área \mathbf{A} , a Equação 3 fica [15; 16]:

$$\phi = BA \cdot \cos \alpha \quad (\text{Equação 4})$$

onde α é o ângulo entre a perpendicular a área \mathbf{A} e a direção de \mathbf{B} . Se \mathbf{B} não for uniforme sobre uma área, a Equação 4 se generaliza de tal forma que [15; 16]:

$$\phi = \iint B \cdot \cos \alpha \cdot ds \quad (\text{Equação 5})$$

A.2. Permeabilidade magnética relativa

A permeabilidade magnética do meio é representada como [15;16]:

$$\mu = \mu_r \mu_o \quad (\text{Equação 6})$$

A Tabela 1 relaciona algumas substâncias com suas respectivas permeabilidades magnéticas relativas. Deve-se salientar que a permeabilidade magnética relativa não é constante para alguns materiais, principalmente os ferromagnéticos e, neste caso, a tabela apresenta os valores máximos [15,19].

Permeabilidade relativa de alguns materiais [15]

Substância	Grupo	μ_r (Adimensional)
Bismuto	diamagnético	0,99983
Prata	diamagnético	0,99998
Cobre	diamagnético	0,999991
Água	diamagnético	0,999991
Vácuo	não- magnético	1

Ar	paramagnético	1,0000004
Alumínio	paramagnético	1,00002
Paládio	paramagnético	1,0008
Pó de permalloy 2-81	ferromagnético	$1,3 \times 10^2$
Cobalto	ferromagnético	$2,5 \times 10^2$
Níquel	ferromagnético	$6,0 \times 10^2$
Ferroxcube 3	ferromagnético	$1,5 \times 10^3$
Aço doce	ferromagnético	$2,0 \times 10^3$
Ferro (0,2% de impurezas)	ferromagnético	$5,0 \times 10^3$
Permalloy 78	ferromagnético	$1,0 \times 10^5$
Supermalloy	ferromagnético	$1,0 \times 10^6$

Da Tabela 1 pode-se concluir o seguinte [17,45,46]:

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

Outros tipos de materiais são os *antiferromagnéticos*, *ferrimagnéticos* e *superparamagnéticos* [15; 19].

A.3. Curva de histerese

Se um material for colocado dentro de uma bobina na qual circula uma corrente elétrica **I**, um campo magnético **H** será gerado no interior desta bobina, e o material irá sofrer uma indução magnética **B**. Se o material for diamagnético ou paramagnético poucas linhas de fluxo magnético serão induzidas e a relação **BxH** será aproximadamente linear. Se o material for ferromagnético muitas linhas de fluxo serão induzidas (fenômeno de magnetização) e a relação **BxH** apresenta as características de uma curva conforme a Figura 2. 5. Observa-se que esta curva possui uma histerese sendo, portanto, denominada de *curva de histerese* ou *ciclo de histerese*. Os materiais que possuem características magnéticas semelhantes às mostradas pela curva da Figura 2. 5 são conhecidos como *materiais magnéticos* [15,16,19]

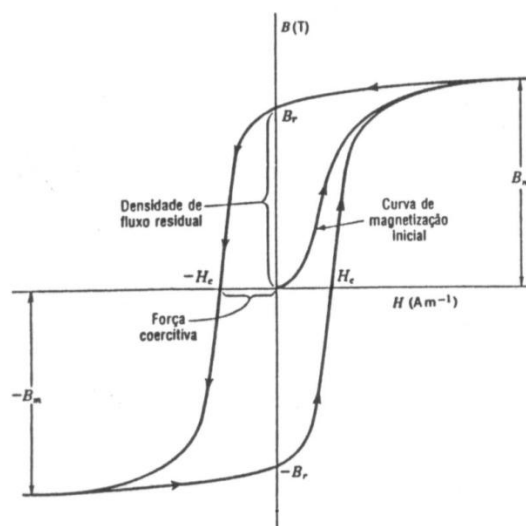


Figura A1 - Ciclo de histerese para um material magnético[15]

O ponto em que a curva corta o eixo de \mathbf{B} , no quadrante superior esquerdo, é denominado de *magnetismo remanente* e representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado ($\mathbf{H} = 0$). O magnetismo remanente máximo é denominado de *retentividade* \mathbf{B}_r . O ponto em que a curva corta o eixo de \mathbf{H} no mesmo quadrante é denominado de *força coercitiva* e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o material ($\mathbf{B} = 0$). O campo desmagnetizante máximo é denominado de *coercitividade* \mathbf{H}_c . Outro fator importante na identificação dos materiais magnéticos é o produto energético $\mathbf{BH}_{m\acute{a}x}$ [J/m^3] e está associado com a densidade de energia armazenada num material magnético[15].

A Figura 2. 6 mostra dois ciclos de histerese, um largo que representa um *material magnético duro* também conhecido como ímã permanente (geralmente materiais ferrimagnéticos) e um estreito que representa um *material magnético macio* (geralmente materiais ferromagnéticos)[15,16,19].

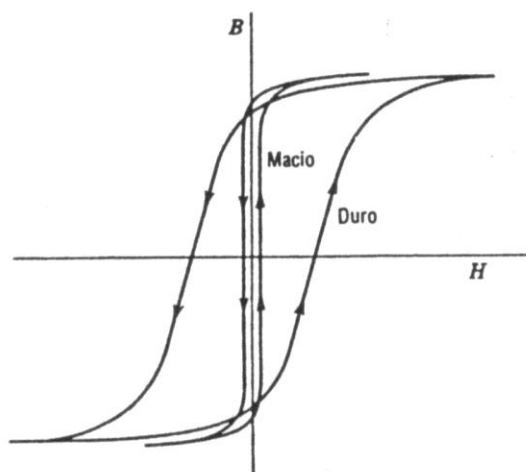


Figura A2 - Ciclo de histerese para materiais magnéticos duros e macios [15]

A.4. Magnetização

Uma curva típica de um material magnético é mostrada na Figura 2. 7(a). Para fins de comparação, esta figura mostra quatro linhas tracejadas, correspondendo às permeabilidades relativas constantes, μ_r , de 1, 10, 100 e 1000. A Figura 2. 7(b) apresenta um gráfico de permeabilidade relativa como função do campo H aplicado. A permeabilidade relativa máxima se encontra no ponto da curva de magnetização onde a relação de B e H é máxima, sendo designada por $\mu_{m\acute{a}x}$ [15].

Quando o valor de H é aumentado, o de B aumenta rapidamente a princípio e depois mais lentamente. Quando aplicados valores elevados de campo magnético a curva tende a ficar assintótica. Esta condição é chamada de saturação magnética. Assim, a curva de magnetização inicial pode ser dividida em duas seções: (1) a seção íngreme e (2) a seção plana, estando o ponto P no lugar superior da parte íngreme, conforme mostra a Figura 2. 8. A seção íngreme corresponde à condição de fácil magnetização, enquanto a seção plana de difícil magnetização [15,16,19].

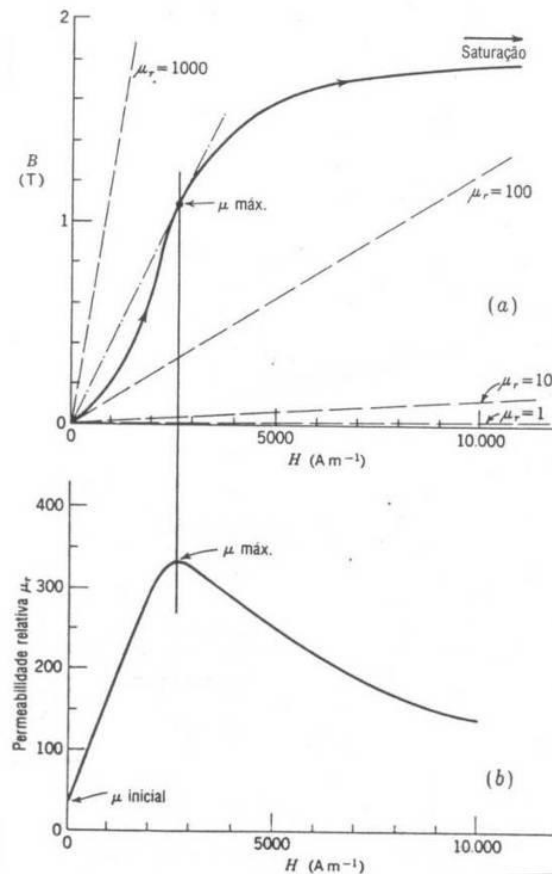


Figura A3 - (a) Curva de magnetização, (b) Relação entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado [15]

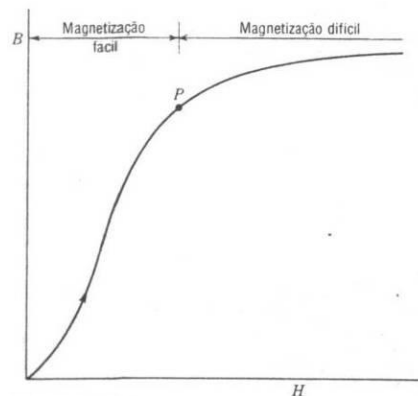


Figura A4 - Regiões de magnetização fácil e difícil da curva de magnetização inicial [15]

Para se compreender o fenômeno da magnetização, pode-se tomar em consideração um fragmento de um material magnético. Este fragmento, geralmente, não consiste de um único cristal ou grão, mas de agregados de grãos que por sua vez se dividem nos domínios

magnéticos, de acordo com a Figura 2. 9 (a). Os domínios se orientam de tal forma que a energia seja mínima, ou seja, os domínios adjacentes estão com polaridade contrária, diminuindo a energia no campo magnético, e tendo como consequência uma magnetização total nula. Com a aplicação de um campo magnético H conforme Figura 2. 9(b), alguns domínios com polaridade opostas ou perpendiculares ao campo aplicado, tornam-se instáveis e giram rapidamente para outro sentido de fácil magnetização, na mesma direção do campo ou bem próximo a este. Aumentando-se mais o campo aplicado como indicado na Figura 2. 9(c), todos os domínios alinham-se na direção do campo. Entretanto, este aumento de magnetização é mais difícil e podem ser necessários campos muito fortes para a saturação plena ser obtida [15,53,54].

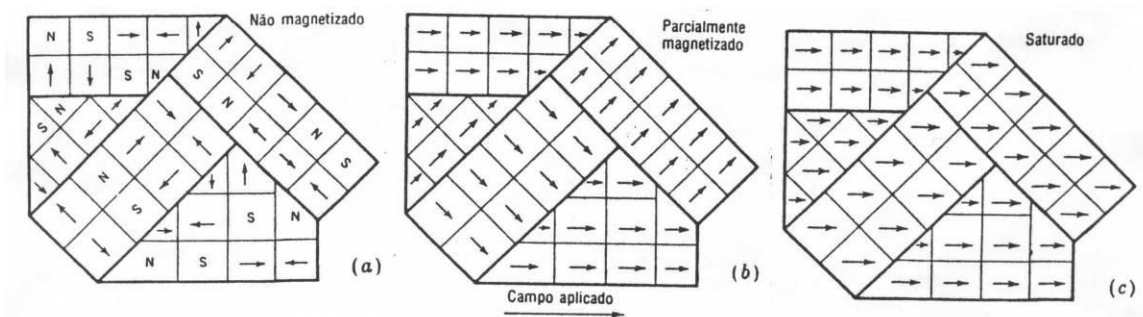


Figura A5 - Estágios de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo [15]

A.5. Relutância e Força Magnetomotriz

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

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathfrak{F}}{\Phi} = \frac{l}{\mu A} \quad (\text{Equação 7})$$

onde \mathfrak{R} é a relutância magnética [Ae/Wb], $\mathfrak{F} = \mathbf{fmm}$ a força magnetomotriz [Ae], μ a permeabilidade magnética do meio [H/m], l comprimento [m] e A a área da secção transversal [m²].

ANEXO B - METALURGIA DO PÓ

B.1. Introdução

A metalurgia do pó é um processo de fabricação de peças metálicas, não metálicas e cerâmicas. O uso da metalurgia do pó teve seu início no século passado com a produção industrial de metais de alto ponto de fusão, que não disponibilizavam de equipamentos de fundição apropriados. Mesmo após a disponibilização dos fornos de fusão, estes tiveram pouco impacto na produção feita por metalurgia do pó, por não atingirem a fina estrutura de grão e a ductilidade obtida com a sinterização.

Este processo vem se desenvolvendo em uma taxa crescente, sendo que atualmente já é considerado consolidado e maduro. A metalurgia do pó é hoje considerada como uma técnica avançada, econômica e ecológica.

O que difere este processo dos convencionais é a ausência de fase líquida ou presença apenas parcial da fase líquida durante o processo. É um processo que permite a produção de peças com formas definitivas ou praticamente definitivas, pode ser utilizada na obtenção de peças em grandes quantidades, além de ter o mesmo grau de dificuldade para peças simples ou complexas.

A metalurgia do pó está presente na fabricação de várias peças, e sua maior aplicação está na indústria automotiva, mas também pode ser vista em cerâmica, materiais de fricção, contatos elétricos, filtros metálicos, materiais magnético e inúmeras outras.

Entre os benefícios deste processo, podemos destacar:

- Eliminação ou minimização da usinagem;
- Eliminação ou minimização de refugo;
- Desenvolvimento de ampla variedade de ligas, não possíveis por outros processos de manufatura;
- Facilidade na produção de peças mais complexas;
- Baixo nível de consumo de energia;
- Menor impacto Ambiental.

Os processos básicos que envolvem a metalurgia do pó são: Obtenção dos pós, Mistura, Compactação e Sinterização. [24,55]

O processo se inicia com a separação do material, que é quantificado e misturado. Depois disso, os pós são submetidos a uma pressão pré-determinada, a

temperatura ambiente por meio de matrizes, cujo formato geralmente corresponde ao produto final.

Para a finalização do processo o material já compactado é exposto a um tratamento térmico, abaixo do ponto de fusão da liga metálica utilizada e com temperatura e atmosfera controladas. [23,24]

Na figura abaixo podem ser visualizadas as etapas de um processo de fabricação por metalurgia do pó convencional.

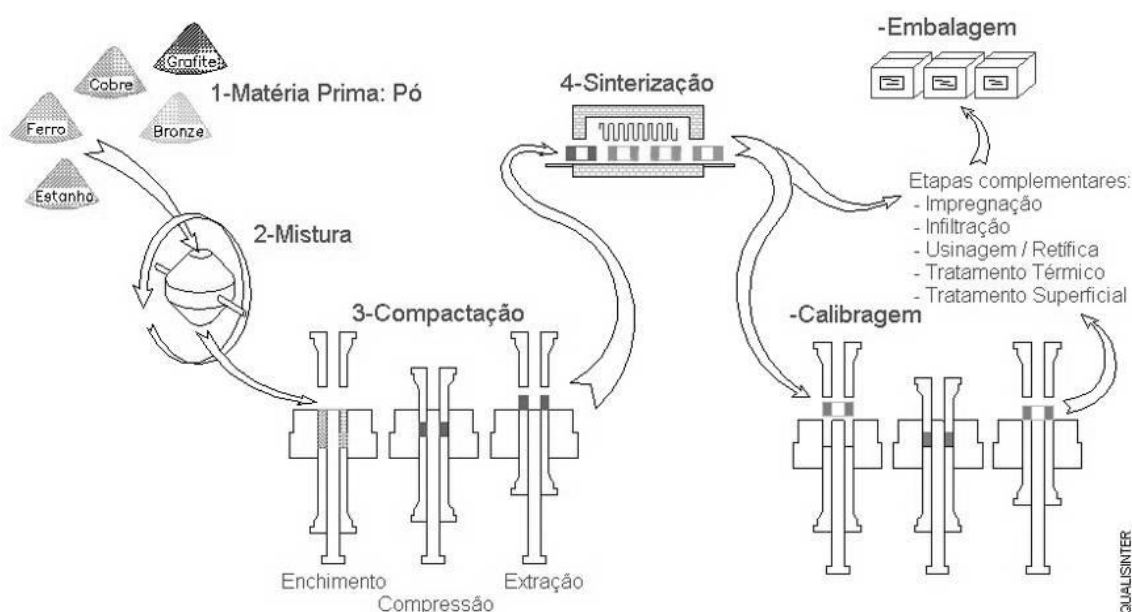


Figura B1- Representação esquemática do processo de metalurgia do pó [25]

B.2. Obtenção dos Pó

A obtenção dos pó é realizada por uma série de processos, em função das propriedades do material (resistência mecânica, ponto de fusão e composição química) e das características que a aplicação requer do mesmo. Entre as características mais importantes dos pó metálicos estão a forma, o tamanho e a distribuição granulométrica das partículas. Os vários métodos de obtenção de pó metálicos conduzem a diversas formas, tamanhos, distribuição e outras características dos mesmos, sendo imprescindível o domínio do processo de obtenção e caracterização da matéria-prima para se chegar a uma peça final que atenda os quesitos de engenharia [4,25].

O processo de obtenção dos pó depende do conjunto de propriedades do material e das características desejadas, em função da aplicação pretendida. Entre os métodos mecânicos para obtenção de pó, o mais difundido e largamente utilizado é a

moagem, efetuada gerada 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 2. 1 ilustra um modelo do equipamento moinho de bolas [25]

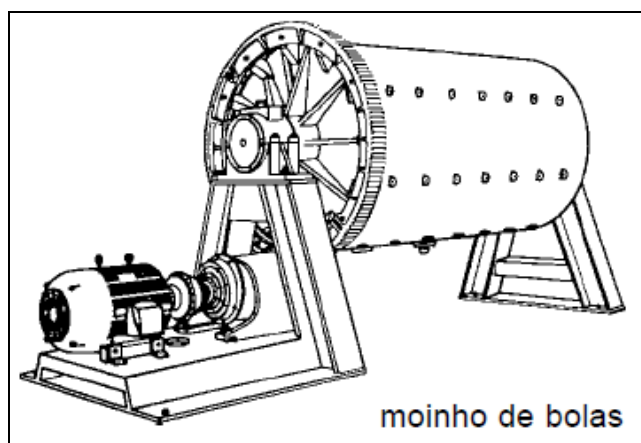


Figura B2- Moinho de Bolas. [25]

B.2. Mistura

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. [56]

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.

Na figura abaixo, podemos visualizar dois tipos de misturadores, o de cone duplo (a) e o de dupla concha ou “V” (b).

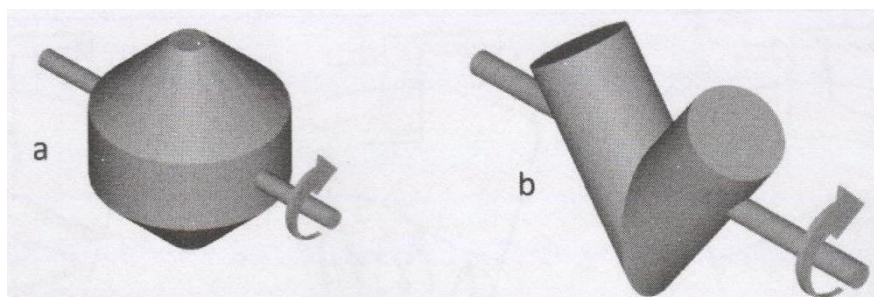


Figura B3 - Misturadores. [24]

B.3. Compactação

A etapa de compactação consiste na aplicação de uma pressão sobre a mistura dos pós e tem por objetivo a conformação do pó na forma final, ou praticamente final da forma projetada.

Com a pressão aplicada sobre os pós, as partículas entrarão no contato necessário, que dá a peça uma resistência mecânica necessária para o seu manuseio posterior.

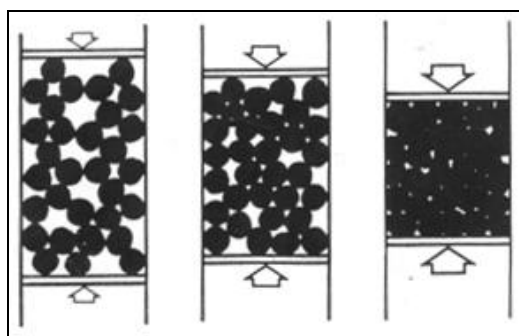


Figura B4 – Representação da pressão aplicada sobre os pós.[57]

A compactação é feita com prensas mecânicas ou hidráulicas, os processos de compactação mais utilizados são a compactação unidirecional de ação simples ou de ação dupla, a compactação isostática, laminação de pós, extrusão e forjamento de pré-formas sinterizadas. Podendo ser executados a quente ou a frio.

Dentre essas técnicas, a mais utilizada é a compactação em matriz de duplo efeito, que pode ser vista na figura a seguir. Após a etapa de compactação, o produto é chamado de compactado verde. [4,23]

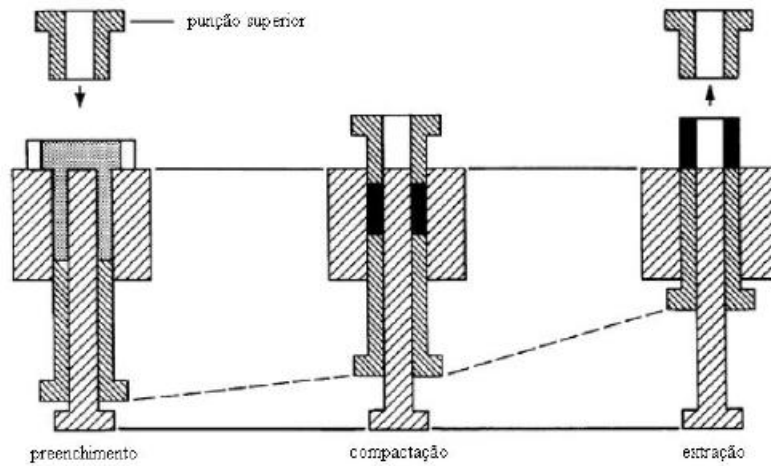


Figura B5 – Sequencia de compactação de duplo efeito [26]

B.4. Sinterização

A etapa de sinterização é a parte fundamental da metalurgia do pó, porque constitui a fase final de todo o processo, onde as partículas sofrerão a ligação entre si.

A sinterização consiste no aquecimento do compactado verde em temperaturas elevadas, mas abaixo do ponto de fusão do principal constituinte da liga metálica utilizada, na ordem de $2/3$ a $3/4$ da temperatura de fusão da liga considerada. Esta etapa é feita sob o controle da temperatura, tempo e atmosfera, garantindo que o compactado já com as partículas interligadas, adquiram as características desejadas de dureza, densidade e resistência mecânica. [4,23]