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

DESENVOLVIMENTO DE UM ROTOR POR METALURGIA DO PÓ A SER UTILIZADO EM UM MOTOR UNIVERSAL

ROBERTO LUIS RIBEIRO DA CAS

Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2015

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

DESENVOLVIMENTO DE UM ROTOR POR METALURGIA DO PÓ A SER UTILIZADO EM UM MOTOR UNIVERSAL

ROBERTO LUIS RIBEIRO DA CAS
Prof. Esp. Tecngº Automação Industrial

Trabalho realizado no Laboratório de Transformação Mecânica 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. Lírio Schaeffer

Banca Examinadora:

_____
Prof. Dr. Roderval Marcelino, UFSC

_____
Prof. Dr. Vilson Gruber, UFSC

_____
Prof. Dr. Eng. Moises de Mattos Dias, ICET / FEEVALE-RS

_____
Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho, em especial:

Ao Prof. Dr. Lírio Schaeffer por sua orientação e cortesia.

Ao Prof. Dr. Moisés de Mattos Dias pela prestatividade, colaboração e apoio técnico nos conceitos e experimentos.

Ao Prof. MSc. Carlos Ferreira, Diretor da Faculdade SATC pelo incentivo e disponibilização da estrutura da faculdade.

Aos funcionários do LdTM que auxiliaram.

Aos amigos e familiares pelo apoio incondicional.

SUMÁRIO

SUMÁRIO 5
LISTA DE FIGURAS 7
LISTA DE TABELAS 9
LISTA DE SÍMBOLOS 11
1. INTRODUÇÃO 10
1.1 OBJETIVO GERAL 11
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 12
2.1 Materiais Magnéticos por Metalurgia do Pó 12
2.2. Aplicação da M/P em Núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas 12
2.3. Motores universais e aplicação em furadeiras manuais 14
2.3.1 Aspectos construtivos de motores universais 16
2.3.2. Princípio de funcionamento de um motor universal 17
2.3.3. Aplicação em furadeiras elétricas manuais 19
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL 20
3.1. Projeto da máquina elétrica 20
3.2. Simulação dos campos magnéticos nos núcleos do motor 22
3.3. Montagem do motor 26
3.3.1 Projeto e fabricação da matriz 26
3.3.2. Obtenção do núcleo do rotor: compactação, sinterização e usinagem. 27
3.3.2.1 Compactação 27
3.3.2.2 Sinterização 28
3.3.2.3 Usinagem 29
3.3.3. Bobinamento e montagem da máquina 30
3.4. Ensaios da máquina em bancada 31
3.4.1 Medição de resistência ôhmica 35
3.4.3 Ensaio a vazio 36
3.4.4 Ensaio de variação de carga com tensão constante 37
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS 42
5. CONCLUSÕES 45
6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS 46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 47

ANEXOS 51
ANEXO A - PROCESSOS DA METALURGIA DO PÓ PARA OBTENÇÃO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS SINTERIZADOS 51
ANEXO B - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS 56
ANEXO C - GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS ENVOLVIDAS NO ESTUDO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS 66
ANEXO D - MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS 72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparativo entre processos de fabricação de peças metálicas. 10
Figura 2 - Foto de motor elétrico universal comercial. 15
Figura 3 - Características de motor elétrico universal comercial. 15
Figura 4 - Motor elétrico universal. 16
Figura 5 - Sistema de comutação de furadeira elétrica manual. 17
Figura 6 - Esquemático de funcionamento de um motor universal. 18
Figura 7 - Curva de torque x velocidade em função da corrente (esquemático). 19
Figura 8 - Furadeira elétrica manual. 19
Figura 9 - (a) Furadeira e (b) Motor universal montado na furadeira KR505. 20
Figura 10 - Foto do rotor (esquerda) e estator(direita) desmontados. 21
Figura 11 - Foto dos núcleos do eixo, rotor e estator desmontados e sem as bobinas. 21
Figura 12 - Projeto mecânico do rotor do motor universal de furadeira. 21
Figura 13 - Vistas dos núcleos do estator, rotor e eixo do motor universal de furadeira. 22
Figura 14 - Esquema de ligação do motor 23
Figura 15 - Núcleo introduzido no FEMM 4.2. 23
Figura 16 - Fluxo magnético no motor com material laminado. 24
Figura 17 - Fluxo magnético no motor com a liga Fe1%P sinterizado. 24
Figura 18 - Comparativo entre o torque das ligas simuladas. 25
Figura 19 - Comparativo entre densidade de fluxo máximo das ligas simuladas. 25
Figura 20 - Projeto dimensional do punção superior(a), matriz(b) (cavidade) e punção inferior(c). 26
Figura 21 - Matriz para compactação do molde bruto para rotor do motor universal de furadeira. 27
Figura 22 - Peças compactadas. 27
Figura 23 - Curva de Sinterização: 1250°C por 1h, taxa de 10°C/min. 28
Figura 24 - Peça após sinterização. 28
Figura 25 - Foto do núcleo do rotor após a usinagem por eletroerosão. 29
Figura 26 - Foto do rotor sinterizado montado no eixo antes da bobinagem. 30
Figura 27 - Foto do rotor sinterizado montado no eixo, bobinado e balanceado. 30
Figura 28 - Foto da máquina montada. 31
Figura 29 - Foto da bancada de testes 01 (variação de tensão de entrada). 32
Figura 30 - Foto da bancada de testes 02 (variação de carga com tensão constante). 33

Figura 31 - Foto da bancada de testes 03.....33
Figura 32 - Acoplamento de engrenagem similar ao utilizado na furadeira. 34
Figura 33 - Gráfico n (amarelo) x torque (laranja) do motor original, carga aplicada 0,5, 1, 1,5, 2 e 3Nm. 39
Figura 34 - Gráfico n (amarelo) x torque (laranja) do motor com rotor sinterizado, carga aplicada 0Nm (acoplado ao eixo do motor).....39
Figura 35 - Gráfico n (amarelo) x torque (laranja) do motor com rotor sinterizado, carga aplicada 0,5Nm. 39
Figura 36 - Gráfico n (amarelo) x torque (laranja) do motor com rotor sinterizado, carga aplicada 1Nm. 40
Figura 37 - Gráfico n (amarelo) x torque (laranja) do motor com rotor sinterizado, carga aplicada 1,5Nm. 40
Figura 38 - Gráfico de variação de potência elétrica medida(consumida) e torque com a velocidade no motor original. 41
Figura 39 - Gráfico de variação de potência elétrica medida (consumida) e conjugado com a velocidade no motor com rotor sinterizado. 41
Figura 40 - Dimensões de motor elétrico de indução comercial. 42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre torque e densidade de fluxo máximo. 25
Tabela 2 - Medição de resistência total. 36
Tabela 3 - Ensaio com rotor bloqueado. 36
Tabela 4 - Ensaio a vazio. 37
Tabela 5 - Ensaio de variação de carga com tensão constante. 38

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AWG	Escala Americana de Cabos (American Wire Gauge)
FEEVALE	Federação de Estabelecimentos de Ensino Superior em Novo Hamburgo
FEMM	Finite Element Method Magnetics
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica – UFRGS
M/P	Metalurgia do Pó
SATC	Sociedade de Assistência aos Trabalhadores do Carvão
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

Bm	Indução de saturação ou máxima indução	[T]
Br	Retentividade magnética ou magnetização remanente	[T]
d	Diâmetro	[d]
FP	Fator de Potência	[Kvar]
h	Altura	[h]
H	Campo magnético	[A/m]
Hc	Coercitividade magnética ou força coercitiva	[A/m]
I	Corrente Elétrica	[A]
In	Corrente nominal	[A]
Ip	Corrente de partida	[A]
Ip/In	Razão entre Corrente de partida / Corrente nominal	
m	Metro	[m]
mm	Milímetro	[mm]
n	Velocidade em rotações por minuto	[rpm]
n1	Número de dentes da engrenagem menor	[n1]
n2	Número de dentes da engrenagem maior	[n2]
P	Potência Ativa	[W]
PA	Potência Aparente	[VA]
p	Número de polos	
kg	Kilograma	[Kg]
rpm	Rotações por minuto	[rpm]
R	Resistência elétrica	[Ω Ohm]
T	Densidade de Fluxo Máximo	[Tesla]
V1	Velocidade tangencial da engrenagem menor	[rpm]
V2	Velocidade tangencial da engrenagem maior	[rpm]
Vca	Tensão elétrica em corrente alternada	[Vca]
μr	Permeabilidade relativa	[μr]
ρ	Resistividade elétrica	[Ω.m]

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um núcleo do rotor de um motor universal a partir dos processos da metalurgia do pó (M/P). O rotor desta máquina, cujo núcleo é originalmente fabricado em chapas laminadas, foi substituído por um rotor com núcleo em bloco maciço, mantendo-se as demais partes como eixo e escovas. A partir de simulações no software FEMM e dados existentes referentes ao desempenho de ligas metálicas sinterizadas como Fe-P, Fe-Si e Fe-Ni, foi selecionado o Fe1%P, que apresentou os melhores resultados para a aplicação na máquina elétrica em questão. Foram feitas simulações relacionadas às características eletromagnéticas e a partir dos resultados obtidos puderam-se fazer comparações entre um rotor convencional, fabricado com núcleo de chapas laminadas e o rotor com o núcleo maciço fabricado utilizando-se a metalurgia do pó. As etapas de fabricação consistem em mistura da liga, compactação, sinterização e forma final através de eletroerosão. A máquina foi montada utilizando a estrutura de um motor de furadeira manual comercial, mantendo-se todas as partes da máquina original com exceção do núcleo do rotor, e posteriormente foi testada em bancada, comparativamente a uma máquina convencional para análise dos resultados. Foi possível a substituição do rotor oriundo de placas laminadas por um rotor oriundo de metalurgia do pó. Os resultados dos ensaios com a máquina fabricada comprovaram que a liga Fe1%P é, comparativamente ao núcleo de chapas convencional, tecnicamente inferior para a fabricação de motores universais. Utilizando a liga Fe1%P seu rendimento foi de 7% contra 27% do motor convencional assim como torque e demais parâmetros ficaram abaixo do motor padrão.

Palavras-chave: Metalurgia do Pó; Materiais magnéticos macios; Núcleo de máquinas elétricas; Máquinas elétricas; Motor Universal.

ABSTRACT

The main objective of this work was the development of a rotor core of a universal motor from the processes of powder metallurgy (M/P). The rotor of this machine, whose core is originally manufactured in laminated plates, was replaced by a rotor core with solid block, keeping the other parts like shaft and brushes. From the software FEMM simulations and existing data regarding the performance of sintered alloys such as Fe-P, Fe-Si and Fe-Ni, was selected Fe1%P, which showed the best results for application in electric machine in question. Simulations were made related to the electromagnetic characteristics and from the results of comparisons could be made between a conventional rotor, made of rolled core and the solid core rotor is manufactured using powder metallurgy. The manufacturing steps comprise of mixing the alloy, compacting, sintering and final form by electro erosion. The machine structure was assembled using a hand drill motor trade, keeping all parts of the original machine except the rotor core, and thereafter the machine was tested on bench, compared to a conventional machine to analyze the results. It was possible to replace the rotor coming from a rotor laminated plates derived from powder metallurgy. The results of the tests made with the machine shown that the alloy Fe1% P is compared to a conventional core plates, technically inferior to manufacture universal motors. Using the league Fe1%P its yield was 7% versus 27% of the conventional engine as well as torque and other parameters were below the standard engine.

Keywords: Powder Metallurgy; Soft magnetic materials; Core electrical machinery; Electrical Machines, Universal Motor.

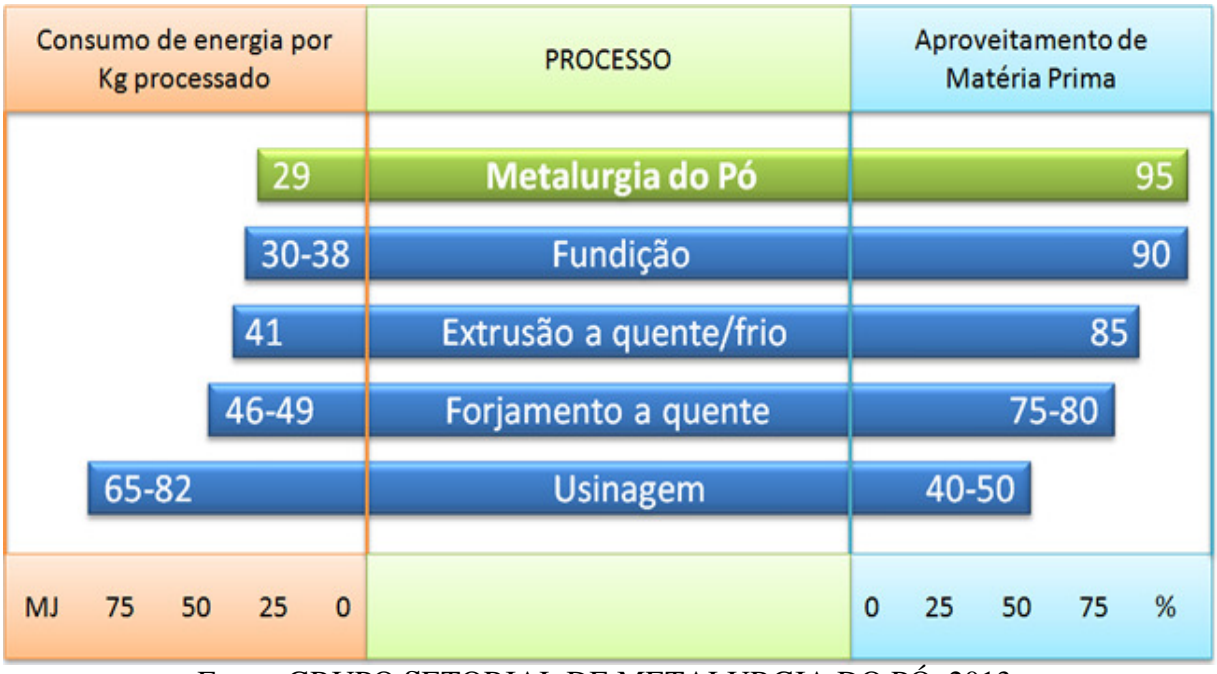
1. INTRODUÇÃO

Em se tratando de máquinas elétricas rotativas, na sua grande maioria os núcleos do estator e do rotor são fabricados com chapas de aço baixo carbono laminadas e isoladas eletricamente (PELEGRINI, 2011).

A maioria das inovações nestas máquinas é relacionada ao método de acionamento, com a constante evolução da eletrônica de potência e capacidade de processamento dos acionamentos eletrônicos, a partir de máquinas elétricas rotativas tradicionais como o motor de indução trifásico é possível obter desempenho equivalente a máquinas que utilizam novos materiais como as de ímãs permanentes na sua concepção.

A pesquisa de novos materiais e processos de fabricação para substituir as chapas de aço baixo carbono laminadas busca melhores características como eficiência na conversão de energia elétrica em mecânica e menor custo de fabricação pela simplificação do processo. Conforme a figura 1, a metalurgia do pó é o processo que apresenta maior aproveitamento de matéria prima e menor consumo de energia por kg processado, desta forma a sua viabilidade depende diretamente do custo da matéria prima. Esta é uma área a ser explorada e potencialmente o próximo passo na evolução destas máquinas.

Figura 1 - Comparativo entre processos de fabricação de peças metálicas.



Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2013.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo a construção de um motor universal utilizando material maciço no núcleo do rotor. Foram feitas comparações de suas características e desempenho em relação ao convencional por meio de simulações da máquina elétrica do motor universal pelo software de elementos finitos FEMM versão 4.2. Foram comparadas com a chapa de Fe puro as ligas com a mistura de Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe5%Si e Fe-50%Ni. Foi aproveitada a experiência e estrutura do Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM da UFRGS, que vem desenvolvendo pesquisas na área de Metalurgia do Pó M/P.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo dois se apresenta os fundamentos teóricos sobre os materiais magnéticos macios por metalurgia do pó, descrevendo as principais ligas sinterizadas e suas características. Em seguida são descritas aplicações destas ligas em máquinas elétricas rotativas e posteriormente faz-se uma descrição do funcionamento dos motores universais e aplicação em furadeiras elétricas manuais.

No capítulo três, confirmando estudos anteriores, pelas simulações da máquina elétrica do motor universal proposta pelo software de elementos finitos FEMM versão 4.2, os resultados da liga Fe1%P apresentaram os valores mais próximos de torque e densidade de fluxo em relação aos núcleos de chapas de aço baixo carbono laminadas (BITTENCOURT, 2009).

Selecionada a liga, é apresentado o procedimento de montagem do rotor como obtenção do núcleo, etapas de prensagem, sinterização e usinagem por eletro erosão.

No capítulo quatro realizou-se a análise dos resultados obtidos na bancada de testes, bem como comparativo com a máquina convencional.

No capítulo cinco realizou-se a conclusão, resumindo os resultados, conceitos abordados e discussão das possibilidades de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Magnéticos por Metalurgia do Pó

Os materiais magnéticos obtidos por M/P são classificados em “macios” ou “duros”. Os duros são utilizados em ímãs, pois apresentam magnetização permanente, e os macios em aplicações eletromagnéticas, pois apresentam magnetismo somente com a aplicação de um campo eletromagnético externo (CAPUS, 1998) (GUTFLEISCH, 2011).

Compósitos magnéticos macios podem ser descritos na forma de partículas em pó ferromagnético rodeado por uma película isolante elétrica. São normalmente fabricados pela M/P por compactação convencional combinado com novas técnicas, como dois passos de compactação, a compactação quente, multi-passo e recozimento seguido de um tratamento térmico a uma temperatura relativamente baixa.

Estes materiais compósitos oferecem vantagens sobre os núcleos de aço laminados tradicionais em boa parte das aplicações. As propriedades únicas incluem baixa perda de corrente de Foucault, relativamente baixa perda total no núcleo em médias e altas freqüências, possibilidades de melhoria das características térmicas, design flexível e montagem de máquinas e baixo custo de produção (SHOKROLLAHI, 2007).

2.2. Aplicação da M/P em Núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas

Materiais magnéticos macios sinterizados de alta resistividade elétrica, elevada permeabilidade relativa, baixa coercitividade e alta indução de saturação, obtidos através dos processos da M/P 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 (DIAS, 1999) (PERSSON, 1995) (JACK, 1995).

Materiais sinterizados obtidos a partir de ligas de material magnético macio, com ferro e outros constituintes como, por exemplo, fósforo, silício e níquel podem ser utilizados na construção dos núcleos de estatores e rotores de máquinas elétricas rotativas em blocos únicos (JACK, 1997) (SILVA, 2003) (FRAYMAN, 1998) (ANISIMOVA, 1990).

Materiais magnéticos macios para aplicações em corrente alternada (ac) são os materiais da família do ferro, como as ligas ferro-silício e ferro-níquel, comumente utilizadas na produção de componentes elétricos. Devido à natureza isotrópica das peças magnéticas macias por M/P, fatores no projeto como empilhamento de chapas laminadas não são apropriadas para a redução das perdas totais. O sucesso da aplicação depende da forma, das dimensões das peças e das propriedades dos materiais. Atualmente, a produção de peças com

ligas ferro-silício e ferro-níquel por M/P é um processo industrial, no qual as propriedades magnéticas são ajustadas por parâmetros bem definidos como a pressão de compactação, tempo e temperatura de sinterização. Contudo, os processos da M/P permitem o uso de elementos, ligas e sistemas além da esfera dos tradicionais materiais magnéticos macios. Um exemplo comum de material magnético macio é a liga ferro-fósforo com 0,8% de fósforo, que resulta em peças isotrópicas as quais, independente da forma ou tamanho possuem propriedades magnéticas equivalentes ao pacote de chapas de aço laminadas. A adição de fósforo melhora não somente as propriedades magnéticas macias do ferro, assim como, das ligas ferro-silício (DIAS, 1999) (ANISIMOVA, 1990).

Novos materiais magnéticos macios têm sido desenvolvidos para aplicações em motores ac (corrente alternada) e cc (corrente contínua). Os componentes do motor são construídos a partir dos processos da metalurgia do pó, em contraste ao método tradicional do empacotamento de chapas laminadas. Estes novos materiais oferecem muitas vantagens na manufatura. Também, devido as suas baixas perdas por correntes parasitas, possuem boas propriedades magnéticas em altas frequências. Componentes fabricados com estes novos materiais magnéticos têm demonstrado desempenho comparável para frequências maiores que 60 Hz, em relação aos motores construídos com pacotes de chapas de aço laminadas. A perda total mais baixa do núcleo com material sinterizado em elevadas frequências se deve às correntes induzidas menores (DIAS, 1999) (ANISIMOVA, 1990).

No processo de obtenção das chapas de aço laminadas para confecção de muitos dispositivos (motores, pequenos transformadores), as mesmas são estampadas, temperadas e empilhadas para os processos de construção do núcleo magnético dos dispositivos. Este processo de fabricação gera custos elevados, além de uma quantidade excessiva de sobras, em torno de 40%, no momento em que as chapas são estampadas (DIAS, 1999) (BAS, 2003).

O mercado para motores com ímãs permanentes de velocidade variável está aumentando. Nestes motores o núcleo do rotor é construído com chapas de aço laminadas e os ímãs são fixados neste núcleo. Frequências tão altas quanto 800 Hz estão sendo utilizadas. Com o aumento destas frequências, as perdas nos núcleos de aço aumentam, reduzindo a eficiência dos motores e limitando as faixas de operação (DIAS, 1999) (BAS, 2003).

Os componentes sinterizados, com relação à dependência da frequência das perdas do núcleo, possibilitam construir um componente magnético que apresente uma dependência quase linear de perda no núcleo com a frequência, ao invés da dependência quase quadrada de perda do núcleo com a frequência, como é típico na maioria dos aços laminados. Os dispositivos construídos com material sinterizado apresentam perdas menores quando

submetidos a frequências maiores que 400 Hz. Uma vez que motores com ímãs permanentes de velocidade variável operam a frequências até 800 Hz é possível obter-se uma melhor eficiência nestes dispositivos (DIAS, 1999) (BAS, 2003).

Assim, pode-se destacar que pesquisas estão sendo realizadas com o objetivo de substituir os tradicionais pacotes de chapas laminadas por blocos maciços sinterizados (PERSSON, 1995) (JACK, 1995) (JACK, 1997) (SILVA, 2003) (FRAYMAN, 1998) (BAS, 2003). Salienta-se que para baixas frequências (60 Hz) as perdas ainda são maiores nos materiais sinterizados, contudo, para frequências maiores que 400 Hz, os materiais sinterizados apresentam um desempenho aproximado aos núcleos de chapas laminadas (DIAS, 1999) (BAS, 2003).

Em resumo, a aplicação atual é para pequenos componentes com baixo custo ou que trabalhem com altas frequências (CAPUS, 2002).

2.3. Motores universais e aplicação em furadeiras manuais

Chama-se motor universal um tipo de motor de funciona tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada. Na verdade, um motor universal é um motor CC com excitação série, ou seja, um motor CC cujos enrolamentos de campo e de armadura estão conectados em série, podendo, portanto ser alimentado por uma única fonte, que pode ser contínua ou alternada monofásica (HONDA, 2006).

Devido as suas características de facilidade de variação da velocidade e tamanho compacto seu emprego é na maior parte em aplicações residenciais e comerciais, como secador de cabelo, liquidificador, máquina de costura e furadeira elétrica manual (STOREY, 2013).

Vantagens:

- ✓ Facilidade de variação da velocidade;
- ✓ Elevada potência e torque em tamanho compacto;

Desvantagens:

- ✓ Menor vida útil e maior necessidade de manutenção em relação a outros motores devido ao comutador e escovas que se desgastam;
- ✓ O faiscamento da comutação nas escovas gera radio interferência e ruído (STOREY, 2013).

Especificamente em furadeiras manuais, destaca-se a elevada potência e torque em tamanho compacto, características fundamentais para garantir a portabilidade. Nesta aplicação a desvantagem de faiscamento e interferência são minimizadas, devido ao seu uso esporádico.

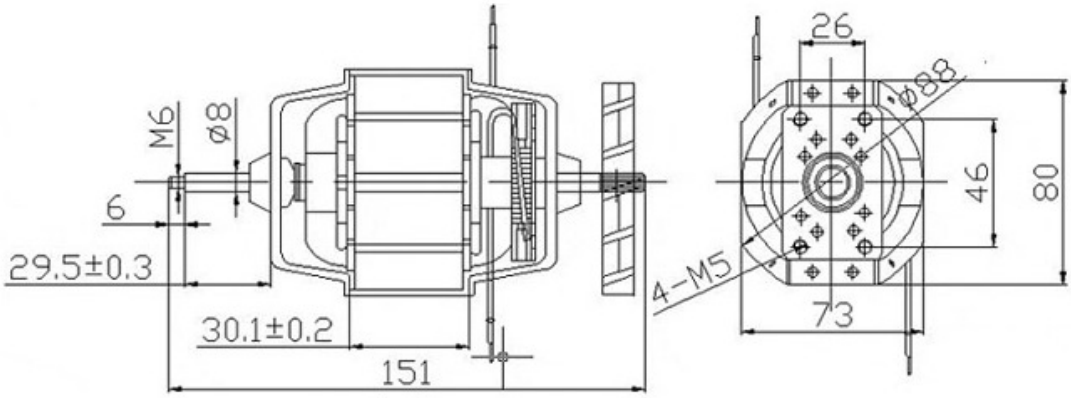
A figura 2 é um exemplo de motor universal comercial, utilizado em ferramentas elétricas manuais como furadeira, lixadeira, compressor de ar, cortador de grama, entre outros. Na figura 3 é relacionada a potência de 456W e o rendimento de 50,5%, ou seja, somente aproximadamente metade da energia elétrica consumida da rede é entregue como potência mecânica (HUAMING ELECTRIC MOTOR, 2013).

Figura 2 - Foto de motor elétrico universal comercial.

Fonte: HUAMING ELECTRIC MOTOR, 2013.

Figura 3 - Características de motor elétrico universal comercial.

Dimensões mecânicas



Dados técnicos

Modelo	Tensão (V)	Frequência (Hz)	A vazio			Com carga			Potência de entrada (W)	Potência de saída (W)	Eff (%)
			Velocidade (RPM)	Corrente (A)	Potência (W)	Velocidade (RPM)	Torque (N.m)	Corrente (A)			
UC88-30	220	50/60	18200	0.572	125	7365	0.299	2.207	456	230.6	50.5

Fonte: HUAMING ELECTRIC MOTOR, 2013.

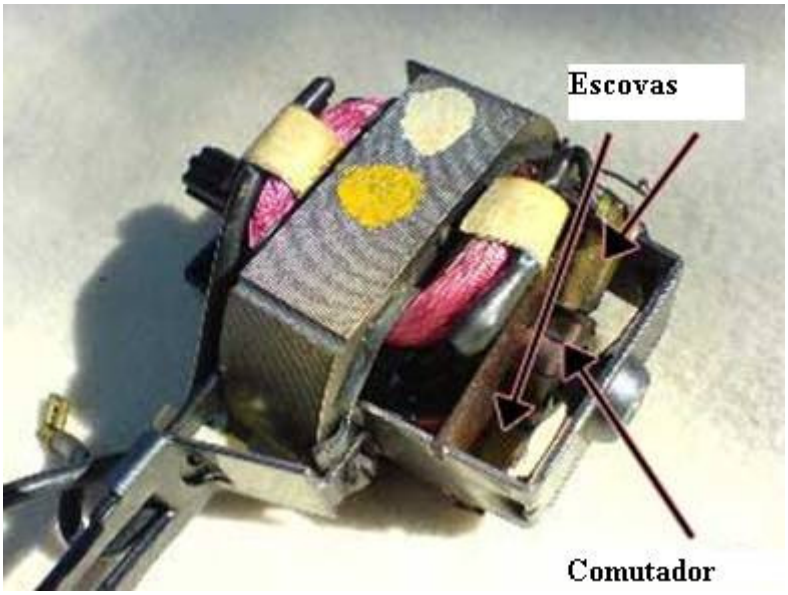
2.3.1 Aspectos construtivos de motores universais

As principais partes de um motor universal são:

- ✓ Armadura ou Rotor: **e**m um motor, a armadura recebe a corrente proveniente de uma fonte elétrica externa e isto faz a armadura girar. Por isso, esta parte do motor também é conhecida como rotor.
- ✓ Comutador: são responsáveis por alternar a corrente que passa pela armadura. O comutador é constituído por placas de cobre curvadas e fixadas, isoladamente, no eixo da armadura.
- ✓ Estator: a função do enrolamento de campo dentro do motor tem o objetivo de produzir a força magneto-motriz necessária para a geração do fluxo magnético necessário.
- ✓ Escovas: são conectores de grafite fixos, montados sobre molas para permitir que deslizem (escovem) sobre o comutador (HONDA, 2006).

O estator é composto de uma estrutura ferromagnética com polos salientes aos quais são enroladas as bobinas que formam o campo, ou de um ímã permanente. A figura 4 mostra o desenho de um motor universal (HONDA, 2006).

Figura 4 - Motor elétrico universal.



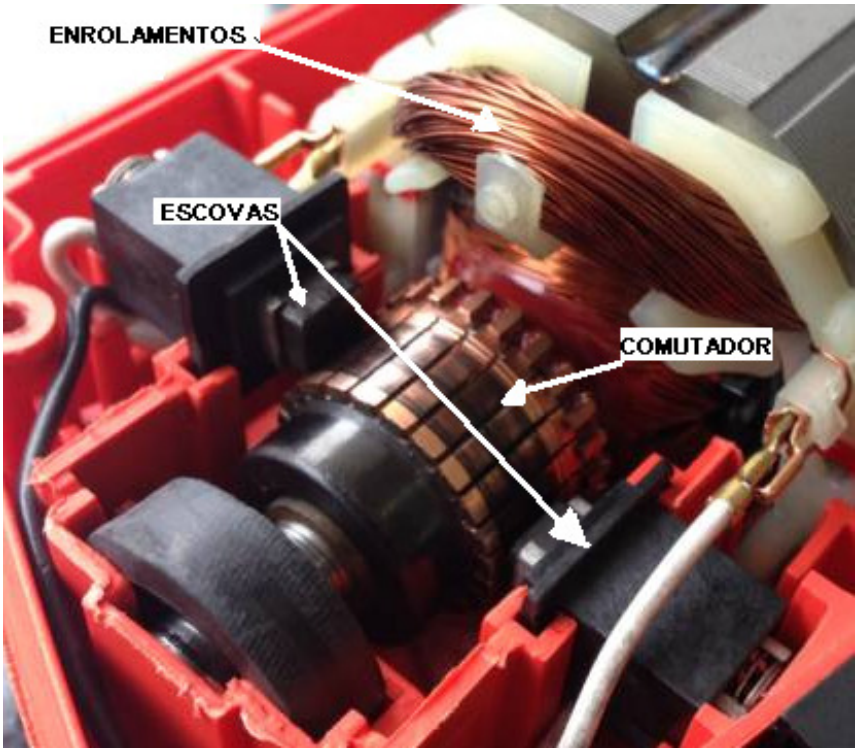
Fonte: STOREY, 2013.

O rotor é um eletroímã constituído de um núcleo de ferro com enrolamentos em sua superfície que são alimentados por um sistema mecânico de comutação (figura 4). Esse sistema é formado por um comutador, solidário ao eixo do rotor, que possui uma superfície cilíndrica com diversas lâminas às quais são conectados os enrolamentos do rotor; e por escovas fixas, que exercem pressão sobre o comutador e que são ligadas aos terminais de

alimentação. O propósito do comutador é o de inverter a corrente na fase de rotação apropriada de forma a que o conjugado desenvolvido seja sempre na mesma direção (HONDA, 2006).

Os enrolamentos do rotor compreendem bobinas com determinado número de espiras. As bobinas são inseridas em sulcos com espaçamento igual ao da distância entre dois polos do estator, de modo que quando os condutores de um lado estão sob o polo norte, os condutores do outro devem estar sob o polo sul. As bobinas são conectadas em série através das lâminas do comutador, com o fim da última conectado ao início da primeira, de modo que o enrolamento não tenha um ponto específico (HONDA, 2006).

Figura 5 - Sistema de comutação de furadeira elétrica manual.



Fonte: BLACK & DECKER, 2013.

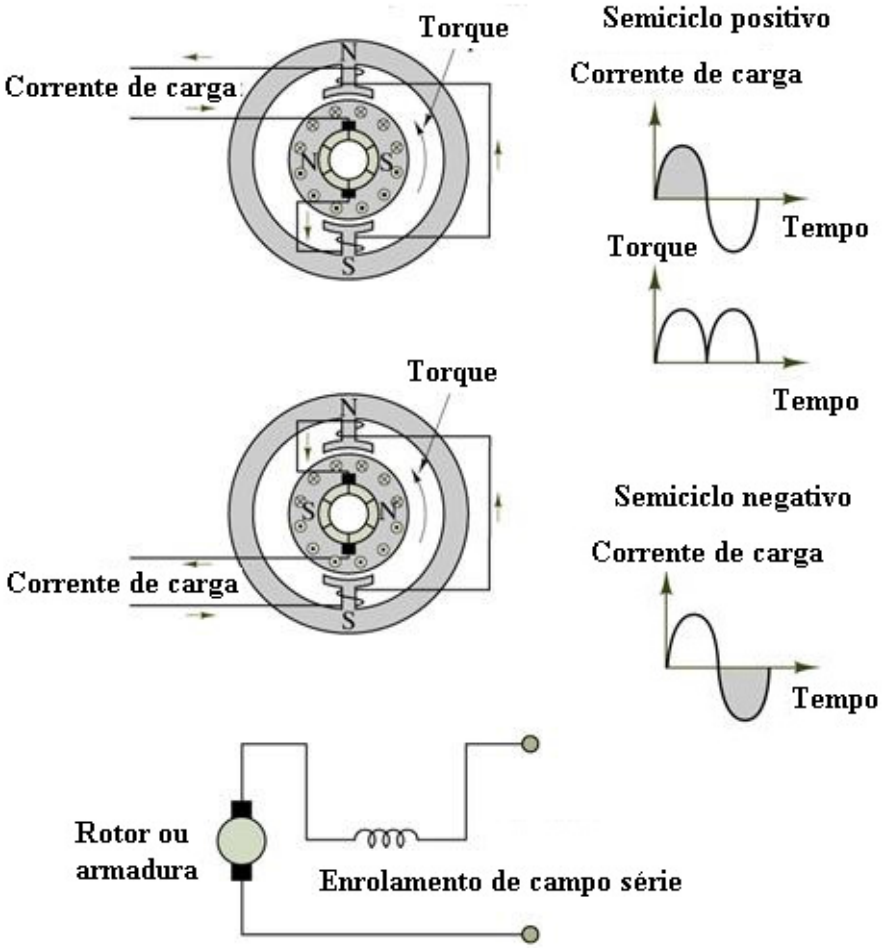
2.3.2. Princípio de funcionamento de um motor universal

A figura 6 mostra de maneira simplificada o funcionamento do motor universal.

Esse motor quando alimentado por tensão alternada senoidal monofásica as correntes de campo e de armadura são as mesmas (enrolamentos estão em série) e quando uma muda sua polaridade, a outra muda ao mesmo tempo. Em outras palavras, o sentido do fluxo produzido pelo campo e o sentido da corrente de armadura mudam ao mesmo tempo, mantendo o sentido da força eletromagnética e, portanto do torque (HUAMING ELECTRIC MOTOR, 2013).

A função do comutador é trocar periodicamente (duas vezes a cada volta) o sentido da corrente na armadura de tal modo a garantir que o torque tenha sempre o mesmo sentido (horário, por exemplo) e impeça que a armadura fique parada em uma posição de equilíbrio. A razão pela qual é necessário comutar a corrente de armadura pode ser mais bem compreendida com a ajuda da figura 6 (HUAMING ELECTRIC MOTOR, 2013).

Figura 6 - Esquemático de funcionamento de um motor universal.

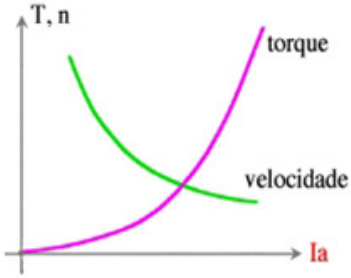


Fonte: USTUDY INITIATIVE, 2013.

Sem o mecanismo da comutação, a espira da armadura iria estacionar na posição vertical, que é uma posição de equilíbrio. Quando a espira passa por uma posição de equilíbrio, o comutador muda a corrente, mudando também o sentido do torque e evitando que a espira volte para a posição de equilíbrio (HUAMING ELECTRIC MOTOR, 2013).

Os motores universais possuem características de desempenho muito interessantes, o que determina o tipo de aplicação em que é usado. Essas características estão mostradas na figura 6, em que se apresentam as curvas de torque e de velocidade em função da corrente de armadura (HUAMING ELECTRIC MOTOR, 2013).

Figura 7 - Curva de torque x velocidade em função da corrente (esquemático).



Fonte: USTUDY INITIATIVE, 2013.

Os motores universais possuem elevado torque em baixa rotação, para certo valor de corrente de armadura. Essa característica torna os motores universais adequados para acionamento, em corrente alternada, de vários eletrodomésticos (liquidificadores, aspiradores de pó, furadeiras), bem como acionamento de veículos elétricos de transporte de massa (trens, carros elétricos, metrôs).

Podem a vazio apresentar uma velocidade elevada, necessitando de um sistema de engrenagens apropriado para que isto não ocorra (USTUDY INITIATIVE, 2013).

2.3.3. Aplicação em furadeiras elétricas manuais

Motores universais, devido ao elevado torque que apresentam em baixa rotação, são utilizados em liquidificadores, aspiradores de pó, furadeiras, entre outros (SILVA, 2013).

Uma furadeira é uma máquina que tem como função principal a execução de furos. Outras operações, tais como alargamento e rebaixamento, também podem ser realizadas. As furadeiras possuem um sistema de alavanca ou um motor que aplica uma rotação a uma ou mais brocas que são responsáveis pela remoção do material (ABNT NBR 17094, 2013). A figura 8 ilustra uma furadeira elétrica manual comercial (FAMASTIL, 2013).

Figura 8 - Furadeira elétrica manual.

Fonte: FAMASTIL, 2013.

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Projeto da máquina elétrica

O motor universal selecionado para este estudo foi o de uma furadeira elétrica manual padrão de mercado e de fabricação nacional, modelo KR505 do fabricante Black & Decker, conforme figura 9 (a) e (b).

Foram adquiridas duas furadeiras novas para servir como base para os parâmetros (o fabricante não informou dados como torque, rotação nominal e corrente nominal), e outra furadeira de mesmo modelo, porém já usada para aproveitar a estrutura do rotor que não seria objeto de estudo e sinterizada, como o eixo e coletor (escovas).

Para diminuir a influência da qualidade do fio, bobinagem e montagem do rotor no comparativo, uma vez que um motor montado e bobinado em fábrica apresenta diferenças em comparação ao bobinado manualmente, um rotor de motor novo também foi desmontado e rebobinado.

Figura 9 - (a) Furadeira e (b) Motor universal montado na furadeira KR505.

(a) (b)

Fonte: BLACK & DECKER, 2013.

Principais características técnicas:

- ✓ Voltagem: 220V;
- ✓ Potência de entrada de energia: 480W;
- ✓ Velocidade mínima sem carga: 2800rpm;
- ✓ Tamanho do mandril: 3/8” (10mm) (BLACK & DECKER, 2013).

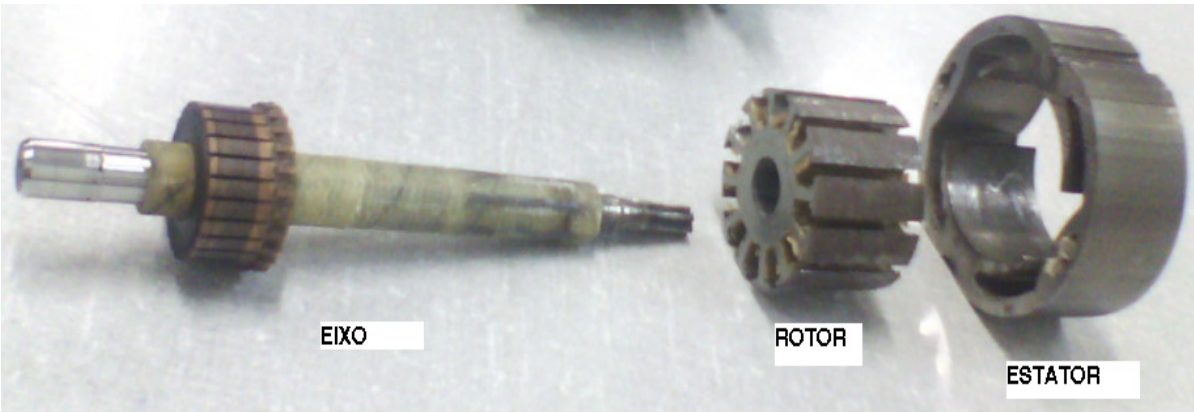
Efetuou-se o desmonte da máquina (figura 10) e encaminhado para execução do projeto mecânico do rotor.

Figura 10 - Foto do rotor (esquerda) e estator(direita) desmontados.

Fonte: Arquivo pessoal.

Para a contagem do número de espiras e extração das medidas foram retiradas as bobinas e separados os núcleos do rotor e eixo, sendo que o eixo será inserido no novo rotor sinterizado (figura 11).

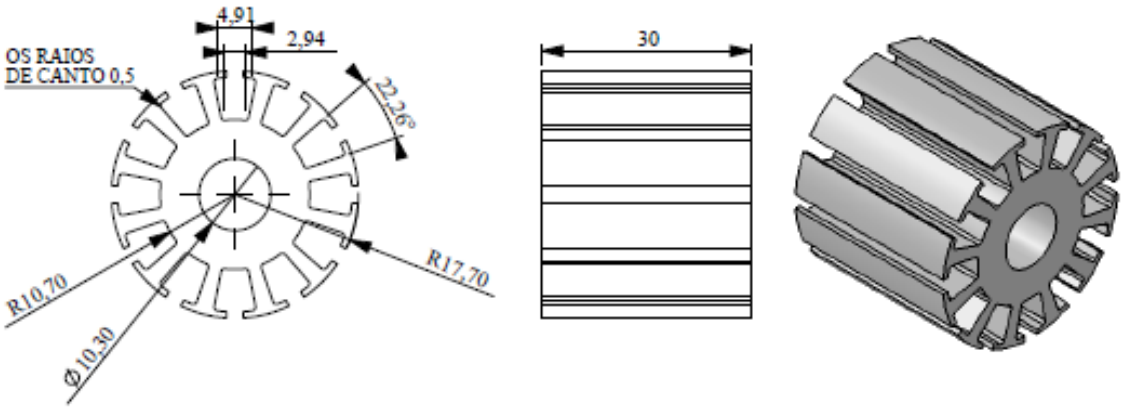
Figura 11 - Foto dos núcleos do eixo, rotor e estator desmontados e sem as bobinas.



Fonte: Arquivo pessoal.

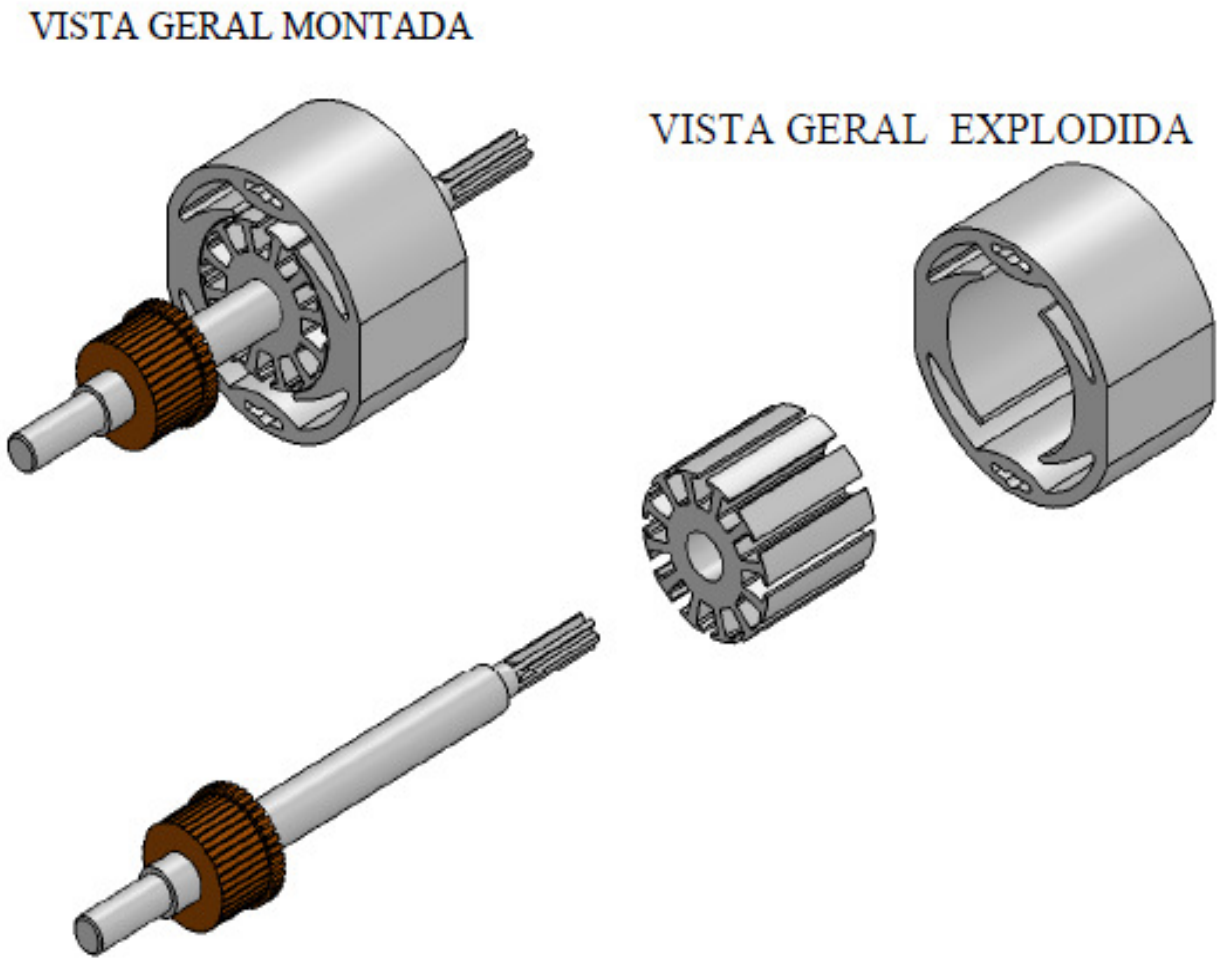
As vistas em perspectiva dos núcleos podem ser observadas na figura 13, e o projeto mecânico dimensional e detalhado do rotor na figura 12.

Figura 12 - Projeto mecânico do rotor do motor universal de furadeira.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 13 - Vistas dos núcleos do estator, rotor e eixo do motor universal de furadeira.



Fonte: Arquivo pessoal.

3.2. Simulação dos campos magnéticos nos núcleos do motor

Para a simulação dos campos magnéticos nos núcleos do motor universal foi utilizado o software FEMM 4.2, sendo que os resultados obtidos estão na tabela 1 e figuras 15 e 16. A simulação do material magnético foi realizada a partir do projeto dimensional do motor, tendo como base uma corrente de 2,18A e considerando-se um estator de 02 polos, esquema de ligação da figura 14 e dados das bobinas retiradas do motor original:

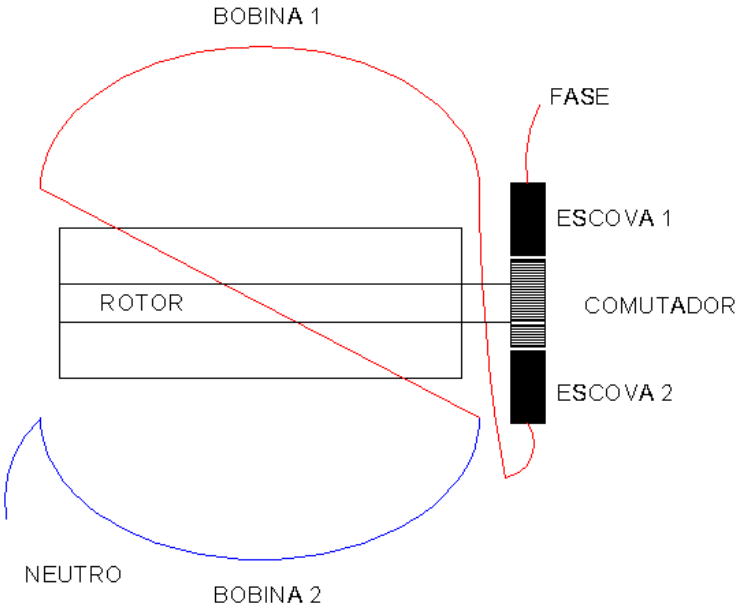
a. Rotor: Fio 30AWG 32 espiras, passe 6.
b. Estator: Fio 26AGW 192 espiras.

A figura 15 representa o núcleo do motor introduzido no software FEMM 4.2, onde:

1. Primeira bobina do estator;
2. Segunda bobina do estator;
3. Eixo do rotor;

4. Núcleo das bobinas do rotor;
5. Espaço “vazado” no estator para fixação na furadeira.

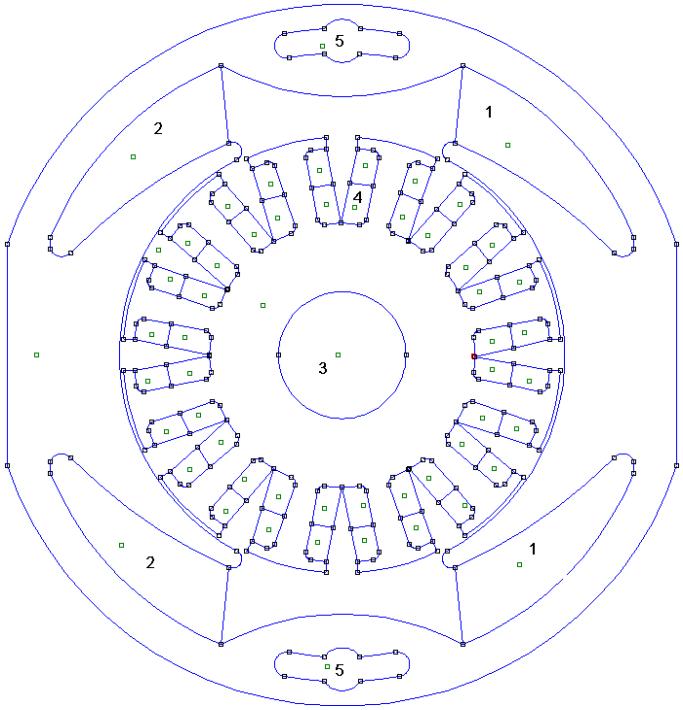
Figura 14 - Esquema de ligação do motor



Fonte: Arquivo pessoal.

Nas figuras 16 e 17 são apresentados os resultados fornecidos para as linhas de fluxo magnético nos núcleos do rotor e do estator do motor, verificou-se que não existem zonas de saturação elevadas nos núcleos do motor, o que torna o projeto viável em termos de campos magnéticos.

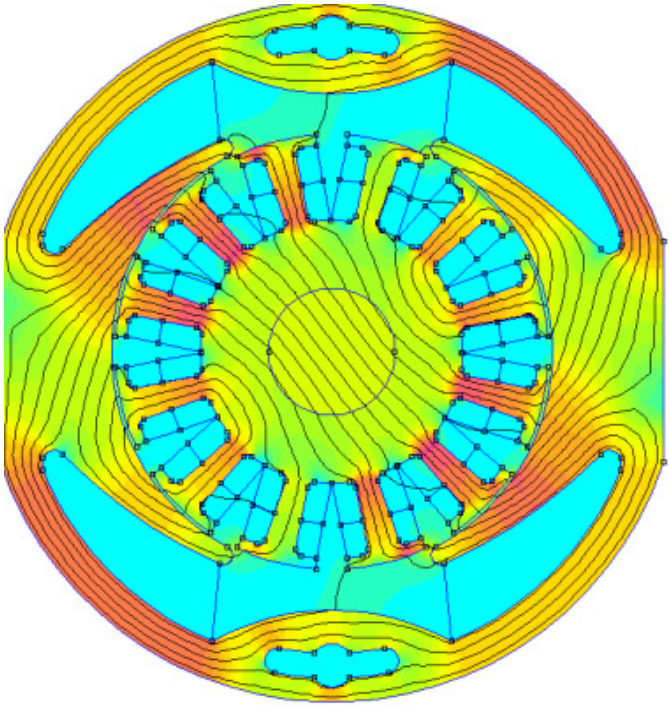
Figura 15 - Núcleo introduzido no FEMM 4.2.



Fonte: Arquivo pessoal.

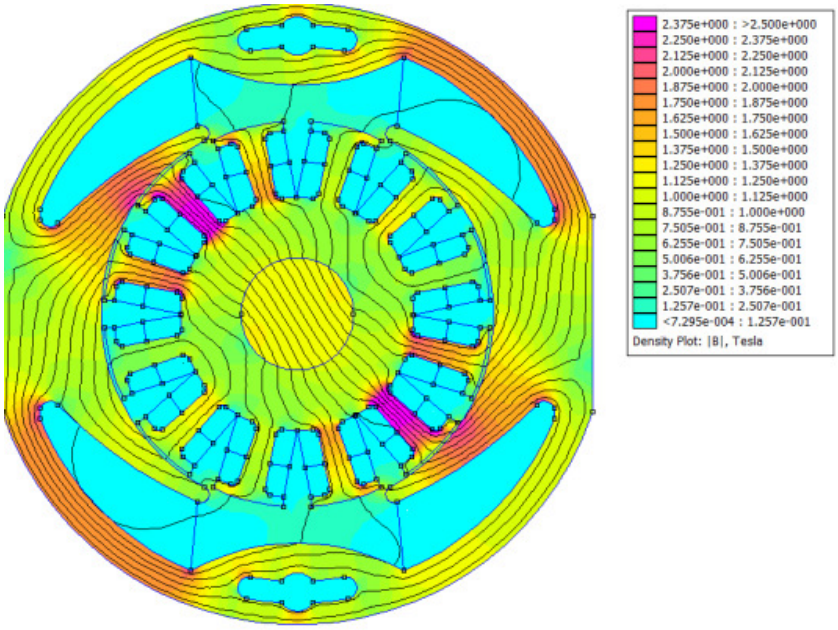
A simulação do torque realizada em software de elementos finitos FEMM 4.2 gera valores instantâneos e estáticos para determinada posição relativa entre o alinhamento dos núcleos do rotor e estator, os valores encontrados na tabela 1 e resumidos nas figuras 18 e 19 mostram o torque máximo encontrado e a densidade de fluxo máximo em diversas posições entre rotor e estator.

Figura 16 - Fluxo magnético no motor com material laminado.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 17 - Fluxo magnético no motor com a liga Fe1%P sinterizado.



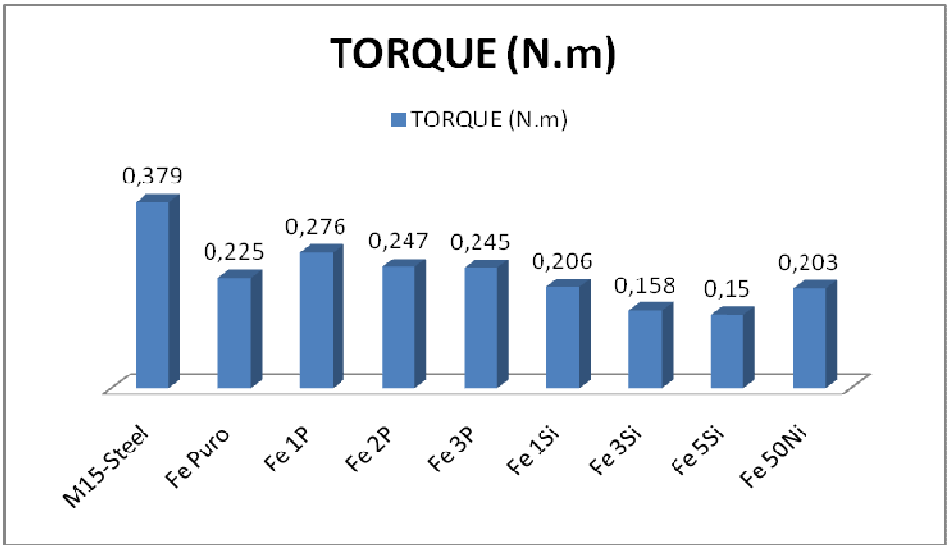
Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 1 - Comparativo entre torque e densidade de fluxo máximo.

Núcleo	Torque (N.m)	Densidade de Fluxo Máximo (T)
Chapas (M15-Steel)	0,379	2,25
Fe (puro)	0,225	2,69
Fe1%P	0,276	3,07
Fe2%P	0,247	3,69
Fe3%P	0,245	3,09
Fe1%Si	0,206	2,77
Fe3%Si	0,158	2,34
Fe5%Si	0,15	2,35
Fe50%Ni	0,203	2,78

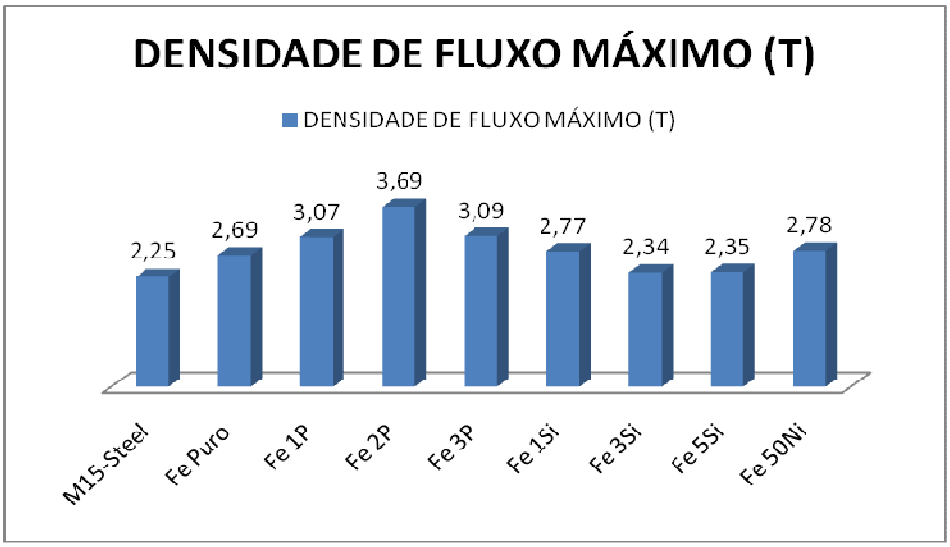
Fonte: (BITTENCOURT, 2009)

Figura 18 - Comparativo entre o torque das ligas simuladas.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 19 - Comparativo entre densidade de fluxo máximo das ligas simuladas.



Fonte: Arquivo pessoal.

O material Fe1%P foi o escolhido para a fabricação do rotor deste trabalho, foi o que apresentou maior torque, densidade de fluxo próxima as demais ligas e seu custo de fabricação significativamente inferior, uma vez que o custo da usinagem por eletroerosão para este material é menor.

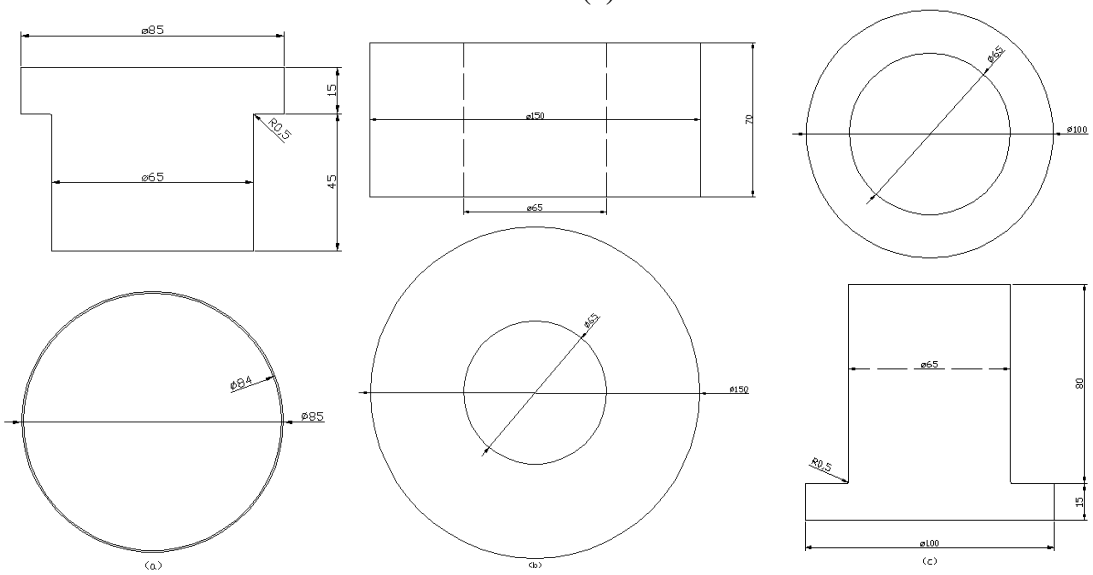
Além das propriedades magnéticas, conforme estudos anteriores (dados nas tabelas do ANEXO B) o Fe1%P mostra-se adequado do ponto de vista das propriedades mecânicas.

3.3. Montagem do motor

3.3.1 Projeto e fabricação da matriz

Para a fabricação do núcleo rotor utilizando material sinterizado foi fabricada uma matriz cuja cavidade permitisse a compactação de blocos cilíndricos em forma de tarugos, que posteriormente foram usinados para a forma final. Optou-se por este processo devido a complexidade de fabricar uma matriz com saliências e reentrâncias para que a peça resultante ficasse da forma do rotor desejado. A fotografia da matriz utilizada para compactação dos tarugos está representada na figura 21, e na figura 20 pode-se observar o punção inferior (c), punção superior (a) e a matriz (b) (cavidade).

Figura 20 - Projeto dimensional do punção superior(a), matriz(b) (cavidade) e punção inferior(c).



Fonte: Arquivo pessoal.

O material escolhido para a fabricação da matriz foi o aço 1045, pois segundo a literatura possui uma boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura, sendo utilizado na fabricação de componentes de uso geral onde seja necessária uma resistência

mecânica superior a dos aços de baixo carbono convencionais. Aplicado principalmente em eixos em geral, pinos, cilindros, ferrolho, parafusos, grampos, braçadeiras, pinças, cilindros, pregos, colunas, entre outros. Após o processo de usinagem e retífica obteve-se a matriz da figura 21.

Figura 21 - Matriz para compactação do molde bruto DO rotor do motor universal de furadeira.

Fonte: Arquivo pessoal.

3.3.2. Obtenção do núcleo do rotor: compactação, sinterização e usinagem.

3.3.2.1 Compactação

A compactação dos tarugos foi realizada no Ldtm, e a força aplicada de 600 MPa 225 ton. As peças após a compactação são mostradas na figura 22.

Figura 22 - Peças compactadas.

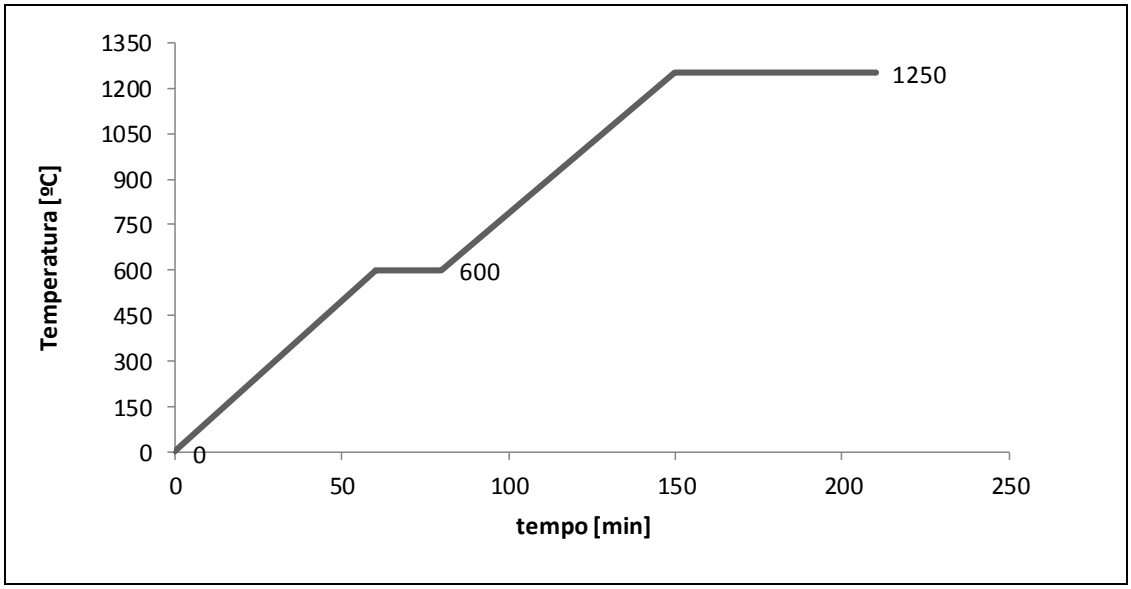
Fonte: Arquivo pessoal.

3.3.2.2 Sinterização

A sinterização foi realizada em empresa terceirizada (Tecsinter) em um forno industrial tipo mufla, em atmosfera controlada com gás marrom 75% nitrogênio e 25% de Hidrogênio, sendo que o resfriamento do material sinterizado deu-se no próprio forno.

O tratamento térmico foi de acordo como mostra o gráfico da figura 23, que relaciona a evolução da temperatura do interior da câmara em função do tempo.

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



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 24 - Peça após sinterização.

Fonte: Arquivo pessoal.

Após a sinterização (peça da figura 24) foram realizadas as medições para obter a densidade, o peso foi medido utilizando uma balança de precisão marca Marte, modelo AL 500 e as dimensões com paquímetro fabricante Mitutoyo, precisão 0.01mm:

- Peso = 680g
- Diâmetro = 64,37mm
- Altura = 34,35mm

Considerando a fórmula:

$$d = \frac{m}{V}$$

Onde:

- d = densidade [g/cm³];
- m = massa [g];
- V = volume [cm³].

A =∏ r^2 = 3,1415 x $3,2185^2$ = 32,65 cm^3

V = A x h = 3,435 x 32,65= 112,153 cm^3

$$d = \frac{m}{V} = \frac{680}{112,153} = 6,07\,g$$

Obteve-se uma densidade de: 6,07 g/cm^3

3.3.2.3 Usinagem

A usinagem do tarugo pelo processo de eletroerosão foi realizada em empresa terceirizada (Delmaq), o núcleo do rotor acabado está na figura 25.

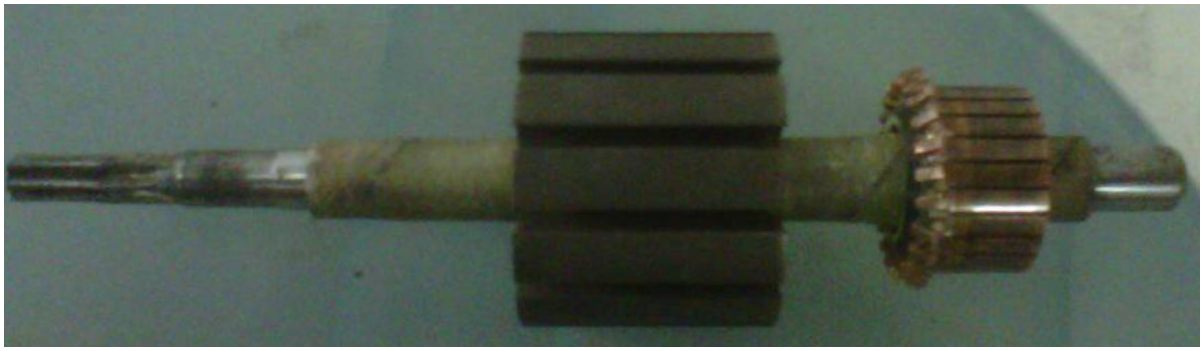
Figura 25 - Foto do núcleo do rotor após a usinagem por eletroerosão.

Fonte: Arquivo pessoal.

3.3.3. Bobinamento e montagem da máquina

O primeiro passo da montagem foi inserir o núcleo sinterizado no eixo do motor original, aproveitando as escovas e acabamento. O resultado é mostrado na figura 26.

Figura 26 - Foto do rotor sinterizado montado no eixo antes da bobinagem.



Fonte: Arquivo pessoal.

O processo de bobinamento foi executado em empresa terceirizada especializada. A sequência basicamente consiste em:

1) Confecção das bobinas, com bitola de fio e número de espiras retirado do original;
2) Instalação do material isolante nas ranhuras;
3) Inserção das bobinas;
4) Solda das pontas das bobinas no coletor, obedecendo ao passe retirado do motor original;
5) Balanceamento do rotor;
6) Aplicação da resina isolante que também fixa as espiras no núcleo para que não se soltem durante o funcionamento;
7) Medições e ensaios.

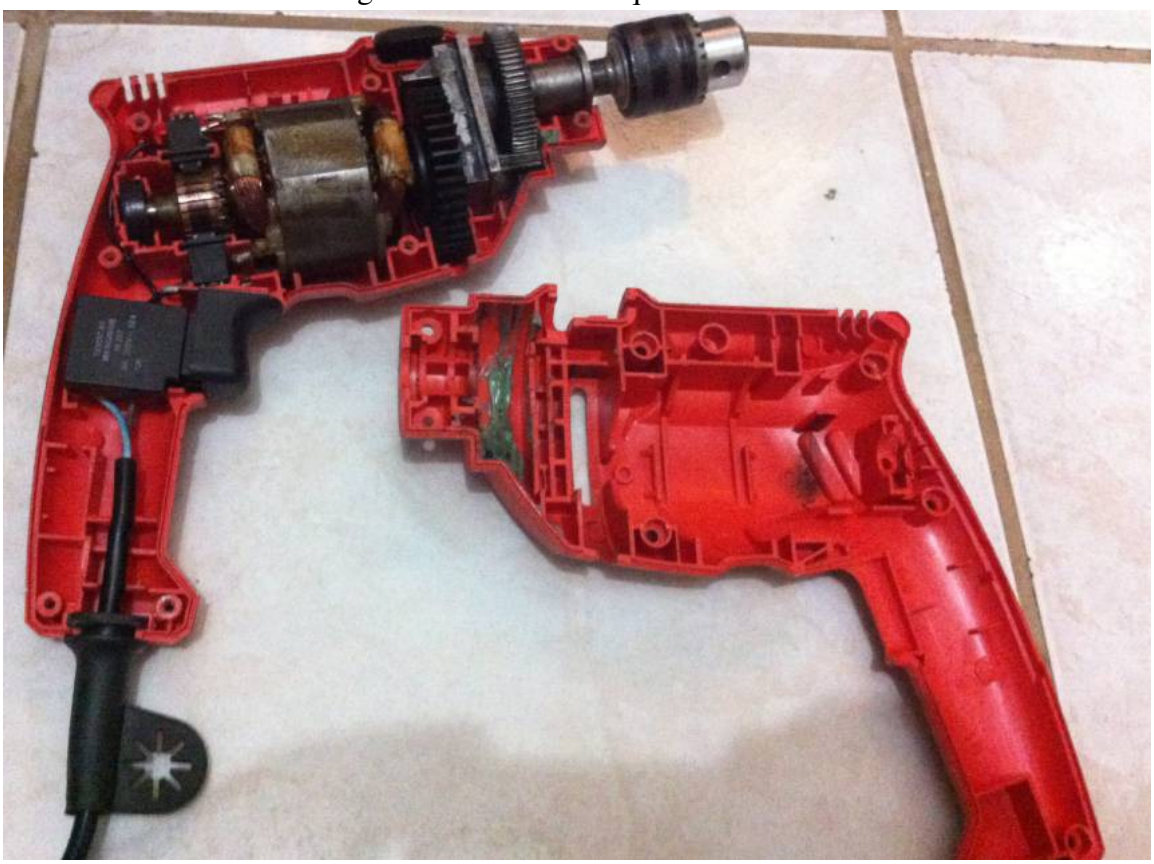
O resultado do processo de bobinamento, incluindo a fixação do sistema de ventilação e rolamentos pode ser visto na figura 27.

Figura 27 - Foto do rotor sinterizado montado no eixo, bobinado e balanceado.

Fonte: Arquivo pessoal.

Para a montagem da máquina foi utilizada a estrutura original da furadeira da figura 28, projetada especificamente para este motor, incluindo caixa de redução, sistema de acionamento manual, mancais para rolamentos e suporte para as escovas.

Figura 28 - Foto da máquina montada.



Fonte: Arquivo pessoal.

3.4. Ensaios da máquina em bancada

Os ensaios da máquina foram realizados utilizando a estrutura dos laboratórios de acionamentos e de máquinas elétricas da SATC e uma bancada de testes da empresa Wolfer Automação, ambas em Criciúma/SC.

Foram avaliados o desempenho de um motor com núcleos produzidos pela M/P em relação a um motor padrão original e em relação a um motor padrão rebobinado nas mesmas condições do motor em estudo, para eliminar diferenças relativas a bitola do cabo, qualidade da solda das conexões, etc.

Foram realizados testes com variação de tensão a vazio, rotor bloqueado, variação de carga com tensão constante e medição de resistência.

Foram montadas três bancadas de testes, conforme figuras 29, 30 e 31 utilizando os seguintes equipamentos:

a) Medição de grandezas elétricas: potência, corrente, fator de potência: Multimedidor de energia modelo PAC3200 de alta precisão; classe 0,2S conf.;

b) Medição de torque e rotação (bancada 2): conjunto servomotor modelo SWA-56-2,5-20, torque 2,5Nm, 2000Rpm, tensão 220Vca, In=2,5A e drive SCA05000412223P0P2Z da WEG (resolução de velocidade=1rpm);

c) Medição de torque e rotação (bancada 3): um conjunto motor modelo 1LA7 (potência nominal de 5CV, Rotação nominal=1720 rpm, tensão nominal 380V) e um drive S110 6SL3210-1SE16-0UA0, para motores trifásicos de potência 2,2Kw em 380V, In=5,9A da SIEMENS (resolução de velocidade=1rpm, torque=5%). A velocidade é extraída a partir de um encoder acoplado ao eixo do motor;

d) Medição de resistência: Multímetro digital Fluke modelo 117, precisão 0,9%;

e) Medição de rotação no teste de variação de tensão: tacômetro digital;

f) Variação da tensão: fonte ajustável de 0-250VAC ou CC e corrente até 10A.

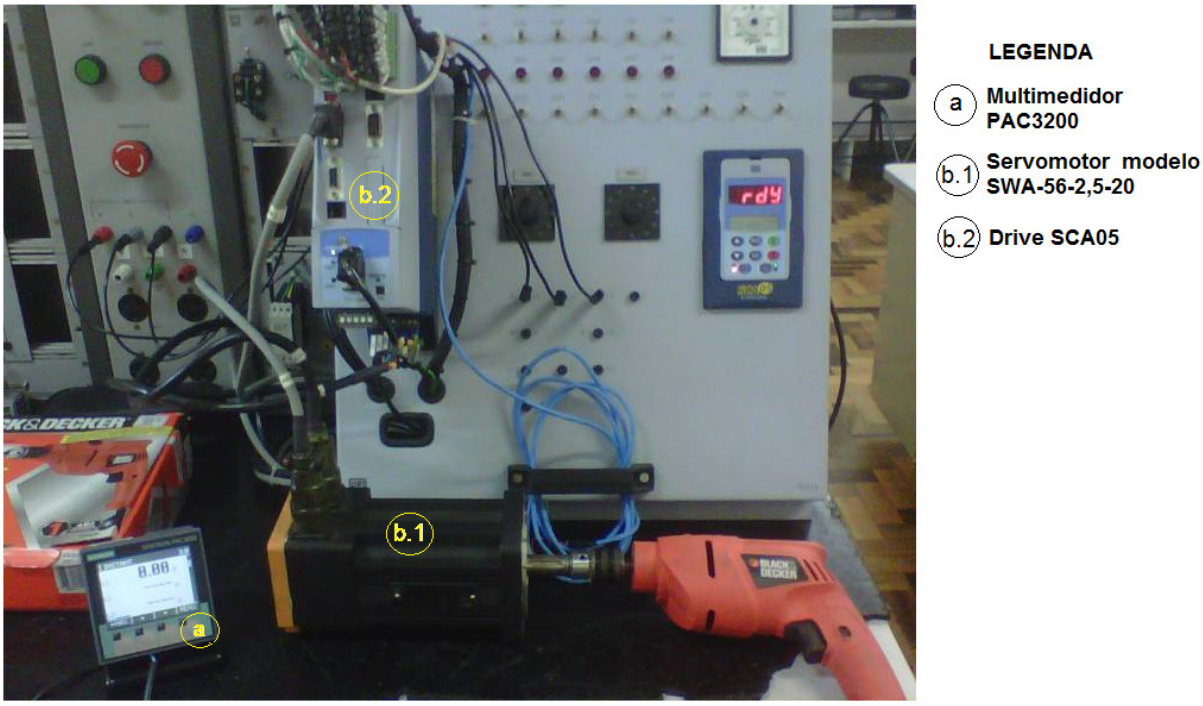
A bancada 02 da figura 30 não se mostrou adequada para os ensaios, o maior torque possível de ser simulado foi de 0,314Nm. Isto ocorreu porque o resistor de frenagem, potência do drive e do motor eram pequenas para suportar o torque reverso gerado pela furadeira.

Figura 29 - Foto da bancada de testes 01 (variação de tensão de entrada).

a Multimedidor PAC3200
e Tacômetro digital
f Fonte ajustável

Fonte: Arquivo pessoal.

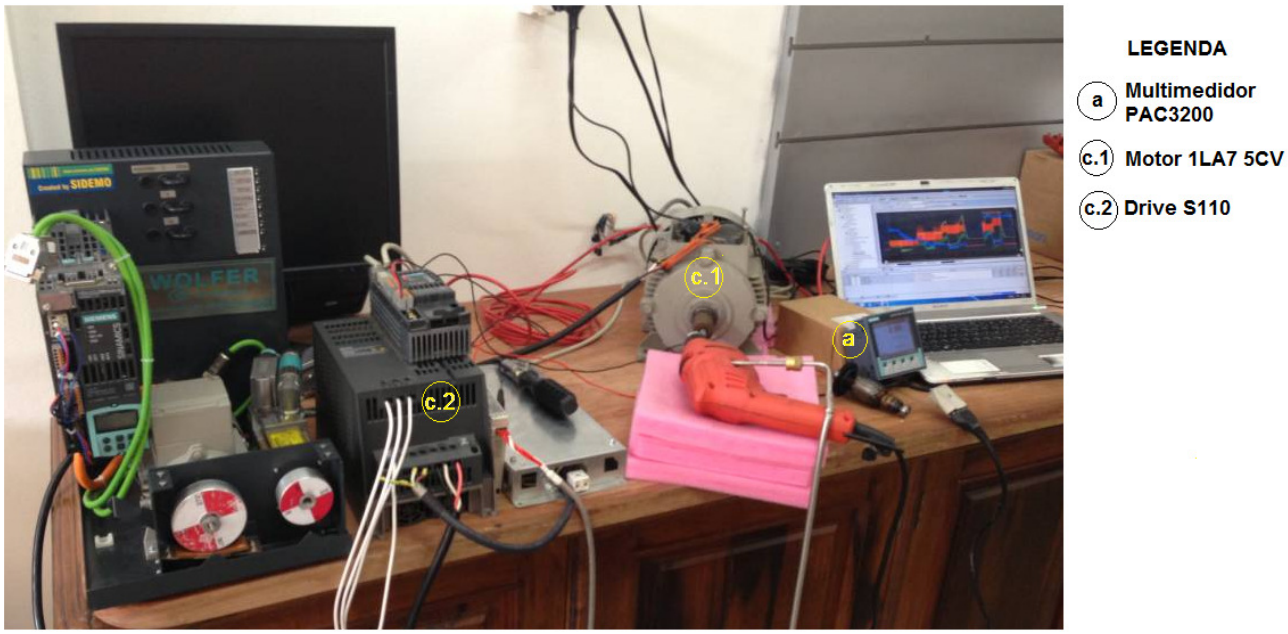
Figura 30 - Foto da bancada de testes 02 (variação de carga com tensão constante).



Fonte: Arquivo pessoal.

Na bancada 3 da figura 31 foi possível simular torque de 0 a 7 Nm e extrair dados de rotação do motor em rpm, potência mecânica em Kw e temperatura. Os dados e gráficos gerados serão mostrados a seguir.

Figura 31 - Foto da bancada de testes 03.

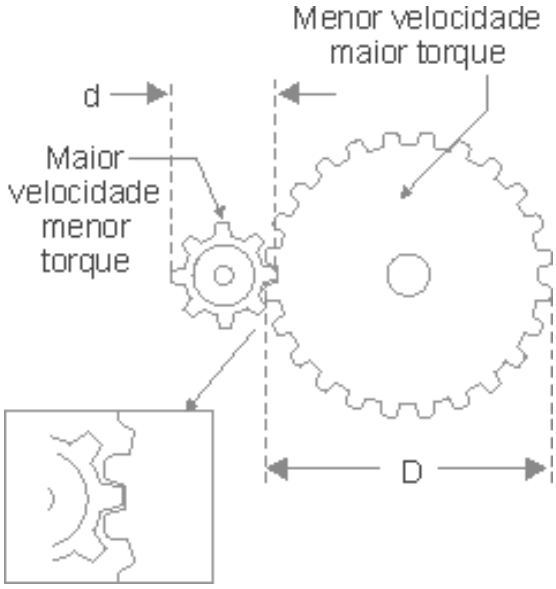


Fonte: Arquivo pessoal.

Como motores universais possuem como característica uma elevada rotação, e considerando que em furadeiras manuais o desejado é rotação média (800-2000rpm) e o maior

torque possível, o fabricante utiliza uma redução por engrenagens para adequar a rotação e aumentar o torque disponível. Em exemplo deste tipo de redução é ilustrado na figura 32.

Figura 32 - Acoplamento de engrenagem similar ao utilizado na furadeira.



Fonte: BRAGA, 2013.

Na bancada 3 a rotação do motor de indução acoplado ao eixo do mandril da furadeira foi medida pelo drive S110, a partir da relação quantidade de pulsos gerados pelo encoder acoplado ao eixo do motor x tempo.

Na bancada 01 foi medida por um tacômetro digital diretamente no mandril da furadeira.

Para calcular a rotação nominal na ponta do eixo do motor, ou seja, antes do mandril da furadeira, é utilizada uma a engrenagem maior (do mandril) com 62 dentes e na ponta do eixo do motor 6 dentes, ficando a relação de redução em 10, 33:1.

O cálculo da velocidade do rotor seguiu a equação:

$$V1/V2 = n2/n1$$

Onde:

- V1 é a velocidade tangencial da engrenagem 1 (rotor)
- V2 é a velocidade tangencial da engrenagem 2 (mandril)
- n1 é o número de dentes da engrenagem 1 (rotor)
- n2 é o número de dentes da engrenagem 2 (mandril)

O cálculo do torque no rotor seguiu a seguinte equação:

$$M1/M2 = n2/n1$$

Onde:

- M1 - torque aplicado na engrenagem 1 (rotor) (N.m)
- M2 – torque obtido na engrenagem 2 (N.m) (mandril)
- n1 é o número de dentes da engrenagem 1 (rotor)
- n2 é o número de dentes da engrenagem 2 (mandril) (BRAGA, 2013).

Considerou-se uma perda de rendimento de 3% por par de engrenagens (neste caso 1 par) e 2% por mancal de rolamento (neste caso 2 mancais), portanto perda total de 7% (BIGATON, 2013).

Na inexistência de um método padronizado para ensaio de motores universais, como a norma NBR 5583 que se aplica a motores trifásicos de indução, adotou-se alguns procedimentos baseados nas normas adotadas pelo fabricante a WEG para ensaios de motores monofásicos de indução para potência menor que 9,2Kw, baseado nas normas CSA C747 e NOM 014 (KRAUS, 1978).

O procedimento utilizado pode ser resumido conforme etapas descritas abaixo:

ETAPA	DESCRIÇÃO	RESUMO
01	Medição de resistência ôhmica	Medida nos terminais de ligação dos enrolamentos do estator motor, uma vez que estes são em série, ou seja, enrolamento do estator em série com o do rotor. Este ensaio deve ser realizado com o motor em temperatura ambiente entre 10 e 40ºC.
02	Ensaio de rotor bloqueado	O rotor é bloqueado e é aplicada tensão nominal. A corrente é media após 3 segundos, a fim de proteger o motor contra o sobreaquecimento e queima dos enrolamentos.
03	Ensaio a vazio	É medido sem carga, mas com a alimentação nominal a tensão, corrente, potência absorvida e rotação.
04	Ensaio de variação de carga com tensão constante	A carga aplicada ao motor é variada em patamares (neste trabalho foram aplicadas até 7) até que o rotor fique bloqueado, ou seja, rotação 0 rpm. São mensurados parâmetros como corrente, potência ativa, reativa e aparente, fator de potência, rotação, escorregamento, temperatura ambiente, temperatura do enrolamento, conforme tabela 5.

3.4.1 Medição de resistência ôhmica

O objetivo deste ensaio é detectar possíveis diferenças de resistência elétrica total nos dois motores, seja por nº de espiras nas bobinas, bitola e qualidade do fio utilizado, resistência das escovas, etc.

Efetuou-se a medição de resistência total dos enrolamentos do motor, uma vez que estes são em série, ou seja, enrolamento do estator em série com o do rotor e pela ligação do rotor fica inviável a medição uma vez que todos os enrolamentos estão em série. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 2.

Tabela 2 - Medição de resistência total.

Motor	Resistência Ω	Diferença % em relação ao rebobinado	Diferença % em relação ao original
Motor original	14,8		
Motor rebobinado	14,01		
Rotor sinterizado	13,89	0,86%	6,55%

Fonte: Arquivo pessoal.

No motor com rotor de núcleo sinterizado a resistência ficou em 13,89Ω e no motor com rotor convencional 14,01 Ω, ficando a diferença de 0,86%, valor este que pode ser considerado desprezível. A diferença de 6,55% em relação ao original pode ser explicada pelas variações na bitola e qualidade do fio utilizado pelo fabricante e pela empresa que rebobinou.

3.4.2 Ensaio de rotor bloqueado

O objetivo deste ensaio é servir como referência para avaliar a corrente de partida, conforme a tabela 3 a corrente de rotor bloqueado ficou com uma diferença de aproximadamente 7% entre os três motores. Convencionou-se a corrente nominal de 2,18A para os três motores, considerando que a capacidade de dissipação térmica, tamanho dimensional e o sistema de ventilação são os mesmos.

Tabela 3 - Ensaio com rotor bloqueado.

Motor	Tensão (V)	Corrente de Rotor Bloqueado (A)	In (A)	Ip/In
Motor original	225	5,7	2,18	2,6
Motor rebobinado	225	6,15	2,18	2,8
Rotor sinterizado	225	5,79	2,18	2,7

Fonte: Arquivo pessoal.

3.4.3 Ensaio a vazio

O objetivo deste ensaio é variar a tensão de entrada e obter como resultado a variação da corrente, da rotação e da potência elétrica, para poder analisar a linearidade da rotação em função das demais variáveis. Os resultados deste ensaio estão na tabela 4.

Tabela 4 - Ensaio a vazio.

Motor	Tensão (V)	Rotação mandril (rpm)	Rotação motor (rpm)	Corrente (A)	Pot. medida (W)	PA medida (VA)	FP
Motor original	100	1561	16125	0,9	83	97	0,94
	110	1986	20515	0,91	85	99	0,94
	150	2421	25009	0,98	113	144	0,94
	200	2534	26176	1,04	119	147	0,95
	220	2897	29926	1,12	213	227	0,95
	250	2903	29988	1,23	344	402	0,95
Motor rebobinado	100	1376	14214	0,92	89	104	0,93
	110	1457	15051	0,96	107	115	0,93
	150	2246	23201	1,33	192	212	0,94
	200	2322	23986	1,48	284	321	0,96
	220	2843	29368	1,89	287	337	0,96
	250	2489	25711	1,92	384	491	0,95
Rotor sinterizado	100	1092	11280	1,26	109	139	0,97
	110	1151	11890	1,34	118	162	0,98
	150	1346	13904	1,89	212	295	0,98
	200	1511	15609	2,12	326	499	0,98
	220	2002	20681	3	622	677	0,98
	250	2064	21321	3,11	723	791	0,99

Fonte: Arquivo pessoal.

O fator de potência apresentou melhora significativa com o rotor sinterizado, ficando entre 0,97 e 0,99 no motor com rotor sinterizado e entre 0,93 e 0,95 no motor com núcleo de chapas rebobinado. No entanto a corrente, acima de 220V, é praticamente o dobro. Em ambos os casos a rotação não é linear principalmente até 150V, acima deste valor a variação fica menor. Isto ocorre principalmente pela influência da tensão na geração do torque, e como neste caso não existe carga aplicada ao eixo, em certo ponto o motor atinge a velocidade nominal, mesmo não estando com a tensão nominal.

3.4.4 Ensaio de variação de carga com tensão constante

Aplicando a tensão da rede disponível de 220V variou-se a carga aplicada ao mandril da furadeira de 0 a 7 Nm e extraiu-se as variáveis de interesse: fator de potência, corrente, rendimento, rotação, temperatura e o escorregamento do motor com núcleo do estator sinterizado, fazendo a comparação com os resultados extraídos do motor padrão.

A tabela 5 mostra o resumo dos resultados extraídos estaticamente, e os gráficos das figuras 33, 34, 35, 36 e 37 as variações das grandezas no tempo de acordo com o aumento gradativo da carga aplicada conforme será explicado a seguir.

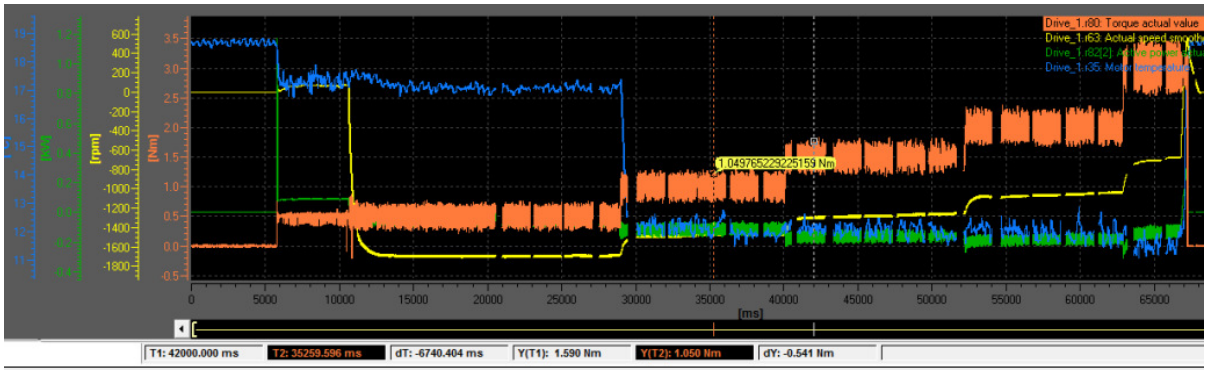
Tabela 5 - Ensaio de variação de carga com tensão constante.

Motor	Tensão (V)	Carga aplicada mandril Nm	Carga aplicada ao motor N.m	Rotação no mandril (rpm)	Rotação no motor (rpm)	I (A)	Pot. medida (W)	PA medida (VA)	var	FP	Escorregamento	temp ambiente	temp carcaça °C	Pot. Calc. W	Resistência Ω	Vel angular rad/s	Pot. Mec. W	rendimento na furadeira	Vel angular rad/s motor	Pot. Mec. Motor - W	rendimento n no motor
Motor original	220	0	0,0000	2897	29926	1,12	213	227	62	0,95	-3,5%	19		215,65	14,8	303,37	0,00	0%	3133,84	0	0%
	220	0,1	0,0104	2429	25092	1,6	325	347	89	0,94	13,3%	19		326,18		254,36	25,44	8%	2627,58	27,22	8%
	220	0,5	0,0518	1718	17747	3,29	603	669	220	0,9	38,6%	18		602		179,91	89,95	15%	1858,46	96,25	16%
	220	1	0,1036	1489	15381	3,68	715	799	274	0,89	46,8%	18		711		155,93	155,93	22%	1610,73	166,84	23%
	220	1,5	0,1554	1324	13677	4,22	820	922	329	0,89	52,7%	18		821		138,65	207,97	25%	1432,24	222,53	27%
	220	2	0,2072	1079	11146	4,91	894	1016	384	0,88	61,5%	18		894		112,99	225,99	25%	1167,21	241,80	27%
	220	3	0,3107	774	7995	5,84	1097	1258	508	0,87	72,4%	18		1094		81,05	243,16	22%	837,28	260,18	24%
rotor bloqueado	220	7	0,7251	0	0	5,7	1279	1531	775	0,86	100,0%	18	76,21	1317	16,8	0,00	0,00	0%	0,00	0,00	0%
Motor rebobinado	220	0	0,0000	2843	29368	1,89	287	337	66	0,96	-1,5%	19		323,52	14,7	297,72	0,00	0%	3075,43	0	0%
	220	0,1	0,0104	2391	24699	1,94	371	402	96	0,95	14,6%	19		381,9		250,38	25,04	7%	2586,48	26,79	7%
	220	0,5	0,0518	1611	16642	3,45	702	733	234	0,9	42,5%	18		660		168,70	84,35	12%	1742,71	90,26	13%
	220	1	0,1036	1392	14379	4,01	794	844	289	0,9	50,3%	18		760		145,77	145,77	18%	1505,80	155,97	20%
	220	1,5	0,1554	1266	13078	4,33	803	897	301	0,9	54,8%	18		807		132,58	198,86	25%	1369,50	212,78	26%
	220	2	0,2072	922	9524	5,09	822	987	344	0,9	67,1%	18		888		96,55	193,10	23%	997,38	206,62	25%
	220	3	0,3107	587	6064	5,72	1001	1194	532	0,89	79,0%	18		1063		61,47	184,41	18%	634,99	197,32	20%
rotor bloqueado	220	7	0,7251	0	0	5,81	1324	1582	802	0,89	100,0%	18	79,23	1408	16	0,00	0,00	0%	0,00	0,00	0%
Rotor sinterizado	220	0	0	2002	20681	3	622	677	67	0,98	28,5%	20		663,46	13,9	209,65	0,00	0%	2165,67	0,00	0%
	220	0,1	0,0104	1489	15381	3,22	689	701	34	0,98	46,8%	20		686,98		155,93	15,59	2%	1610,73	16,68	2%
	220	0,5	0,0518	811	8378	4,22	873	898	97	0,98	71,0%	20		880		84,93	42,46	5%	877,30	45,44	5%
	220	1	0,1036	567	5857	4,49	946	983	169	0,97	79,8%	20		954		59,38	59,38	6%	613,36	63,53	7%
	220	1,5	0,1554	352	3636	5,02	1007	1099	211	0,97	87,4%	20		1066		36,86	55,29	5%	380,78	59,16	6%
	220	2	0,2072	224	2314	5,6	1097	1294	302	0,95	92,0%	20		1229		23,46	46,91	4%	242,31	50,20	5%
rotor bloqueado	220	3	0,3107	0	0	5,79	1179	1310	397	0,92	100,0%	20	84,29	1205	46,1	0,00	0,00	0%	0,00	0,00	0%

Fonte: Arquivo pessoal.

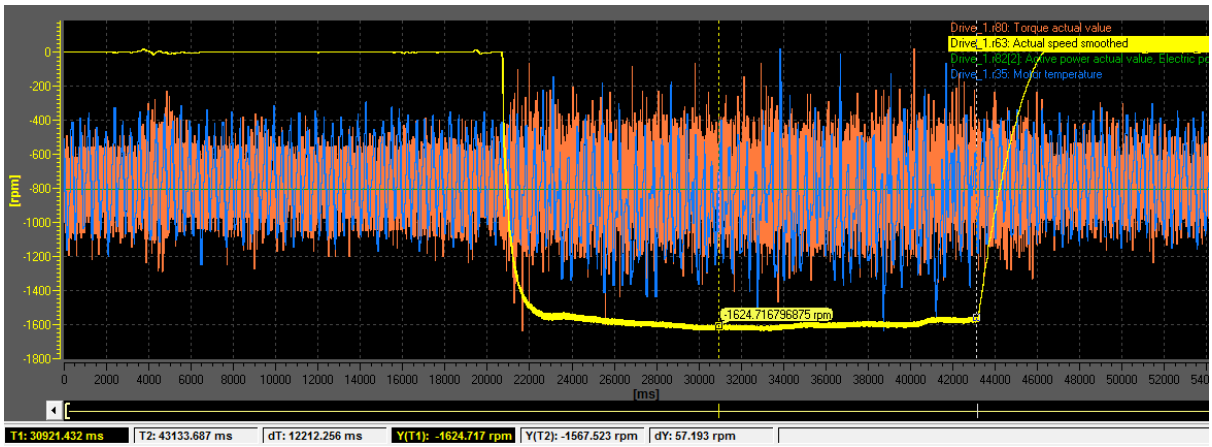
O rendimento do motor original rebobinado chegou a 26% com a carga aplicada ficou em média 64% inferior, chegando a 76% com carga de 2Nm. A partir de 0,5 Nm a rotação já não era mais suficiente para refrigerar o motor e a temperatura aumentou significativamente.

Figura 33 - Gráfico n (amarelo) x torque (laranja) do motor original, carga aplicada 0,5, 1, 1,5, 2 e 3Nm.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 34 - Gráfico n (amarelo) x torque (laranja) do motor com rotor sinterizado, carga aplicada 0Nm (acoplado ao eixo do motor).

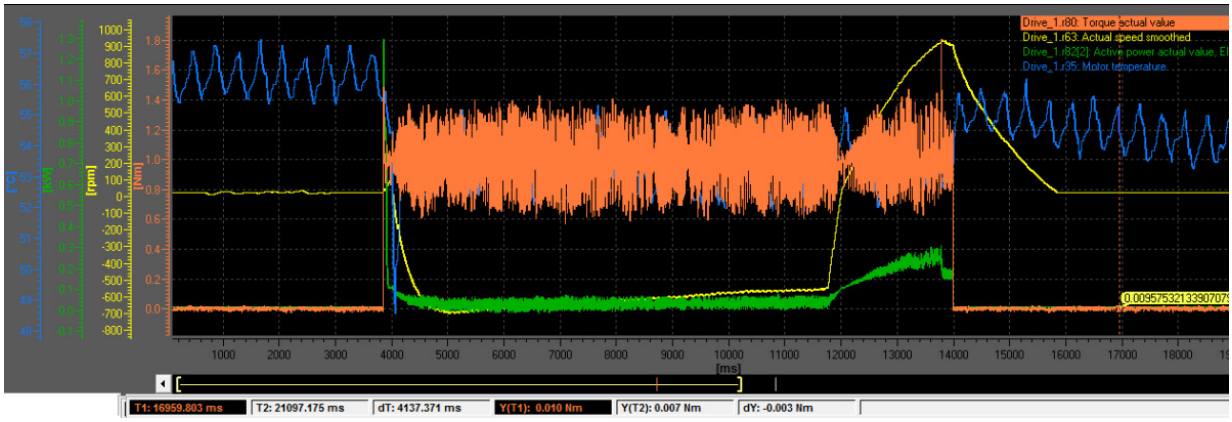


Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 35 - Gráfico n (amarelo) x torque (laranja) do motor com rotor sinterizado, carga aplicada 0,5Nm.

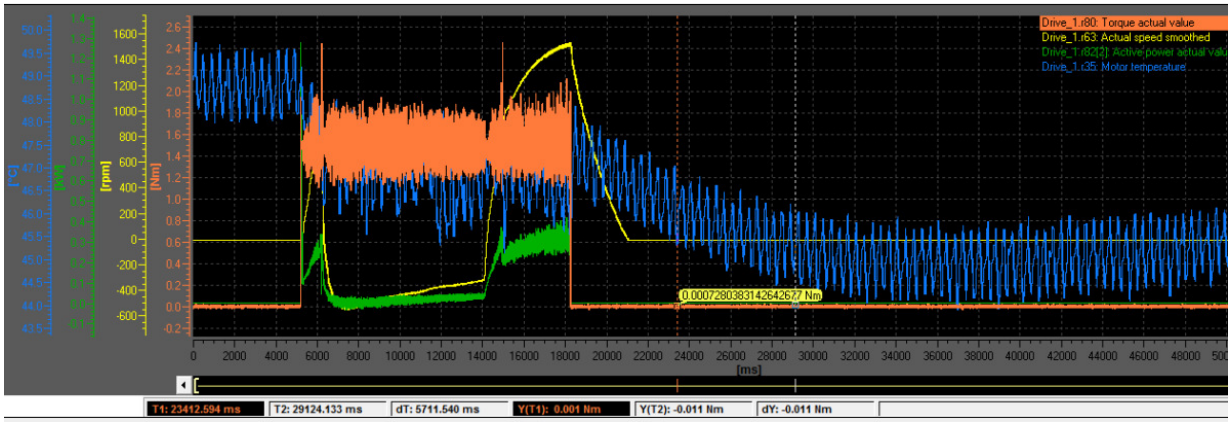
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 36 - Gráfico n (amarelo) x torque (laranja) do motor com rotor sinterizado, carga aplicada 1Nm.



Fonte: Arquivo pessoal.

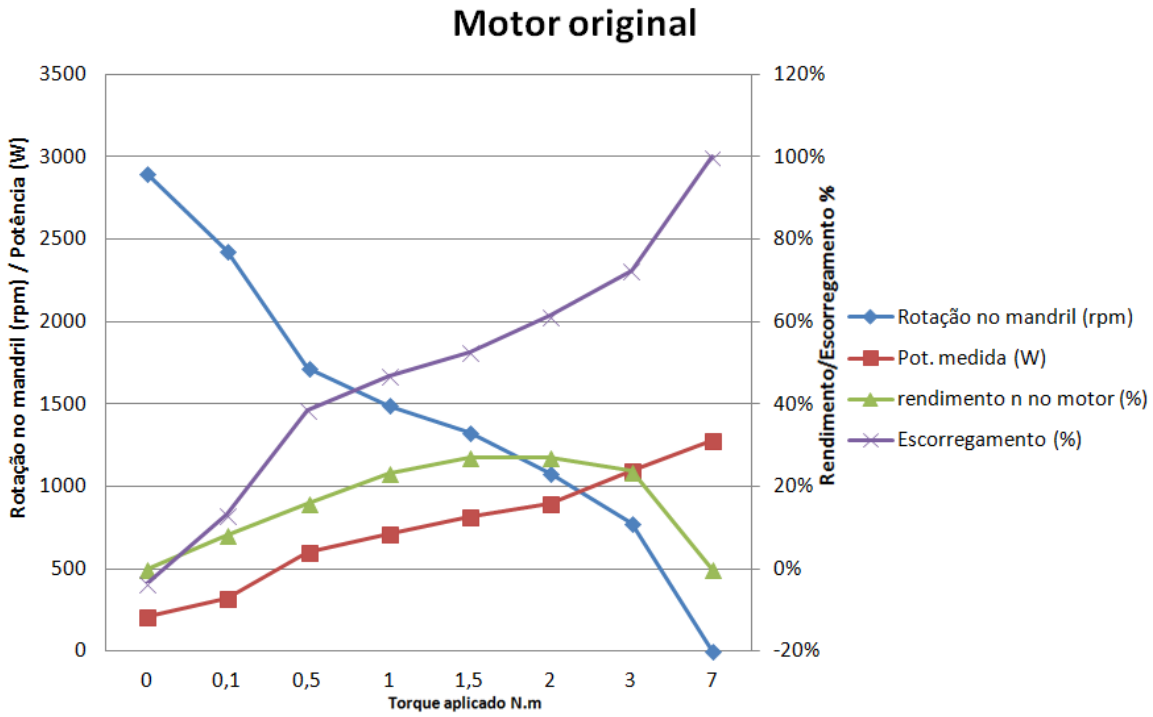
Figura 37 - Gráfico n (amarelo) x torque (laranja) do motor com rotor sinterizado, carga aplicada 1,5Nm.



Fonte: Arquivo pessoal.

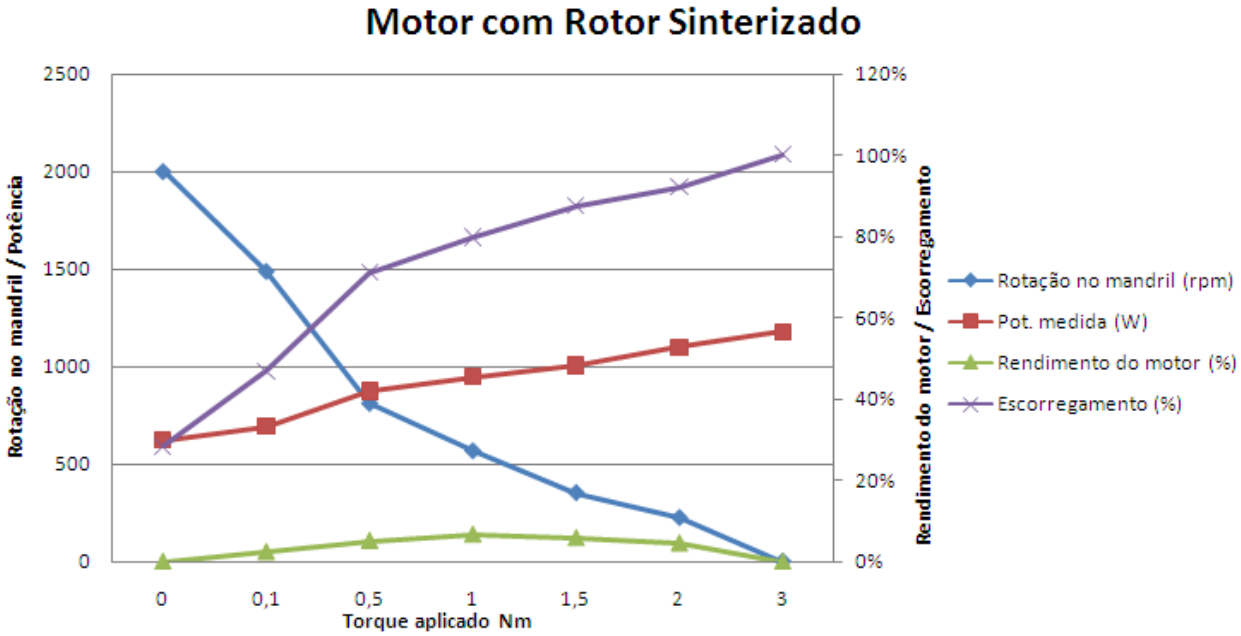
A partir dos dados de torque, rotação, potência elétrica, rendimento do motor e escorregamento coletados do teste de variação de conjugado, foram montados os gráficos característicos que trazem as curvas de variação de potência e conjugado com a rotação, figuras 38 e 39, respectivamente.

Figura 38 - Gráfico de variação de potência elétrica medida(consumida) e torque com a velocidade no motor original.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 39 - Gráfico de variação de potência elétrica medida (consumida) e conjugado com a velocidade no motor com rotor sinterizado.



Fonte: Arquivo pessoal.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

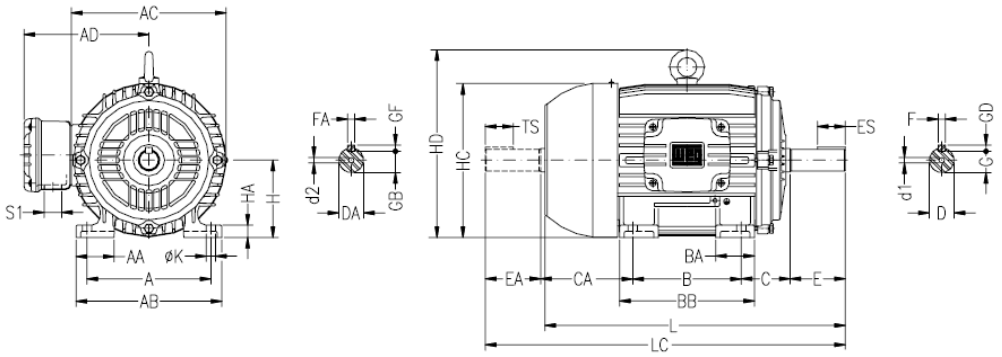
A densidade das peças após sinterização ficou em 6,07 g/cm^3, ficando dentro dos padrões de resultados obtidos em trabalhos anteriores (BITTENCOURT, 2009) (DIAS, 2009) (FAMASTIL, 2013).

Com esta confirmação, tendo em vista que o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento do motor e não o estudo do material, considerou-se para efeitos de simulação do motor no software FEMM 4.2 e determinação do material os mesmos dados obtidos para as demais propriedades magnéticas, mecânicas e resistividade.

O núcleo de Fe1%P apresentou torque instantâneo de 0,276 N.m e fluxo magnético de 3,07T e o núcleo de chapas de aço laminadas, respectivamente, 0,379 N.m e 2,25T. A maior proximidade entre os resultados obtidos, na ordem de 27%, ocorre em razão dos valores de permeabilidade magnética, indução de saturação e resistividade elétrica, assim como, a relativa baixa coercitividade apresentada nos ensaios magnéticos e elétricos (BITTENCOURT, 2009) (DIAS, 2009) (FAMASTIL, 2013).

Confirmando as vantagens de elevada potência e torque em tamanho compacto, um motor de indução monofásico convencional de 2 polos, potência 550W/220V, pesa 12,5Kg, dimensões 248x139mm (largura x altura)/diâmetro 141mm (carcaça 71 ABNT, figura 39), torque de rotor bloqueado 0,784Nm, e o motor universal da furadeira KR505 potência 480W/220V, pesa 0,62 kg, dimensões 80x160mm e torque de rotor bloqueado 0,72Nm.

Figura 40 - Dimensões de motor elétrico de indução comercial.



CARCAÇA	A	AA	AB	AC	AD	B	BA	BB	C	CA	Ponta de eixo dianteira						Ponta de eixo traseira						H	HA	HC	HD	K	L	LC	S1	d1	d2	Rolamentos	
											D	E	ES	F	G	GD	DA	EA	TS	FA	GB	GF											Diant.	Tras.
63	100	21	116	125	119	80	22	95	40	78	11j6	23	14	4	8.5	4	9j6	20	12	3	7.2	3	63	8	124		7	216	241				6201-ZZ	
71	112	30	132	141	127	90	38	113.5	45	88	14j6	30	18	5	11	5	11j6	23	14	4	8.5	4	71	12	139			248	276	RWG 1/2"	A3.15		6203-ZZ	6202-ZZ

Fonte: WEG, 2014.

Em contrapartida, a eficiência máxima do motor universal ensaiado foi é de 27% e do motor de indução em média 63% para esta potência (HONDA, 2006) (STOREY, 2013) (KOSOW, 1986).

Paralelamente à análise comparativa entre o motor com rotor sinterizado e o motor padrão rebobinado, observa-se diferença significativa entre o motor padrão original e o motor padrão rebobinado. Para uma mesma carga aplicada, no motor rebobinado o rendimento ficou uma média de 3% inferior, a potência entre 3,5% e 12% superior, a rotação variou entre -1,5% sem carga e -24% com 3Nm.

Desta forma, conclui-se que para melhor avaliar o desempenho de um motor com núcleos produzidos pela M/P em relação a um motor padrão, o ideal é comparar com outro motor rebobinado nas mesmas condições do motor em estudo, ao invés de dados de catálogo, tendo em vista as diferenças encontradas.

Analisando os resultados obtidos, constata-se que o motor com rotor sinterizado apresentou desempenho inferior ao motor padrão conforme resumo abaixo:

ENSAIO	ANÁLISE
Corrente a vazio	62% acima, com a diferença diminuindo com a carga e chegando a 12,32% em 2Nm.
Rotação	No ensaio a vazio a rotação do motor com rotor sinterizado ficou em média 36% inferior. No ensaio com variação de carga ficou em média 64% inferior chegando a 76% com carga de 2 Nm. A partir de 0,5Nm a rotação já não era mais suficiente para refrigerar o motor e a temperatura aumentou significativamente.
Rendimento	A vazio o motor original rebobinado apresentou 7% contra 2% do sinterizado, sendo que o maior valor para o sinterizado foi de 7% contra 26% na carga de 1,5 Nm.
Rotor bloqueado	O motor teste apresentou uma Ip/In similar ao motor convencional que para potências similares é na ordem de 3 a 4.

Pode-se observar que ao elevar a carga, a velocidade do motor em estudo decresceu bastante, chegando a travar o eixo no final do teste, o que pode ser explicado em função das altas perdas por correntes parasitas, em função da baixa resistividade, o que diminuiu o rendimento do motor. Este comportamento é característico para aplicações que exijam alto conjugado de partida, como furadeiras manuais (HONDA, 2006).

Com o aumento do conjugado aplicado, o escorregamento cresceu exponencialmente, acarretando uma redução de energia mecânica transmitida, proveniente do enfraquecimento do campo no seu interior e das perdas apresentadas, como aumento da resistência devido ao aquecimento.

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

Em relação ao conjugado máximo, o resultado de 3Nm para o motor com rotor sinterizado foi inferior ao conjugado nominal do motor convencional, que foi de 7Nm.

Em relação ao fator de potência, obteve-se significativa melhoria no motor com rotor sinterizado, desta forma uma maior parte de energia ativa consumida da rede está realmente sendo transformada em trabalho. Este fato sugere uma possibilidade de aplicação na indústria, especificamente em máquinas com elevada frequência como servomotores e motores acionados por inversores de frequência.

5. CONCLUSÕES

Nas simulações do motor universal realizadas com o software FEMM 4.2 (figuras 19, 20, 21, 22 e tabela 1), o torque instantâneo e o fluxo magnético do núcleo de Fe1%P resultaram os valores mais próximos em relação aos das tradicionais chapas de aço laminadas de Fe Puro, comparativamente as ligas, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe5%Si e Fe50%Ni.

Os resultados dos ensaios com a máquina fabricada comprovam que a liga Fe1%P é, comparativamente ao núcleo de chapas convencional, tecnicamente inferior para a fabricação de motores universais, pois seu rendimento de 7% contra 27%, torque e demais parâmetros ficaram abaixo do motor padrão. No entanto, considerando o que as aplicações destes motores são para uso intermitente, se o custo de fabricação for consideravelmente inferior, pode viabilizar comercialmente a fabricação.

Vale salientar que devido à característica de funcionamento intermitente da furadeira, a ventilação, que depende diretamente da rotação, torna-se um parâmetro fundamental para a dissipação térmica. Desta forma, os ensaios realizados com simulação de carga permanente não condizem com a realidade ao qual o motor foi projetado.

O uso de ligas com maior percentual de fósforo, ou Fe-Si-P por Mecano síntese, uso de material compósito, uso de microencapsulado (Somaloy), certamente podem melhorar o rendimento, pois aumenta a resistividade elétrica e diminui as correntes parasitas. Uma sugestão seria a liga Fe3%P, porém esta não seria viável para construir os núcleos do motor objeto de estudo deste trabalho devido ao custo elevado da matriz. Foram confeccionados tarugos e posterior usinagem e eletroerosão a fio. Ligas tornam os materiais muito duros o que dificulta a posterior usinagem.

6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, propomos os seguintes assuntos:

- A realização de ensaios utilizando os equipamentos da bancada 03 ou similar, em outra máquina com núcleos obtidos pela metalurgia do pó, preferencialmente a liga Fe1%P ou Fe2%P, como também Si e ferrite macio com termoplástico na sua composição. Com o drive do servomotor é possível elevar a frequência entregue ao motor, e conforme estudos anteriores em transformadores, em as altas frequências (a partir de 400Hz) o desempenho foi similar comparativamente aos com núcleos de chapas laminadas;
- Realizar um levantamento e uma análise de custo, comparativamente a produção de motores pelo processo convencional com núcleo de chapas, e o processo de fabricação dos núcleos por metalurgia do pó;
- Refazer o projeto mecânico dos núcleos para verificar o desempenho em diferentes formatos, bem como a relação de espiras e bitola do bobinamento dos núcleos, preferencialmente em software de simulação 3D, para simular o torque com o rotor e estator nas diversas posições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANISIMOVA, E. A. *et al*. Powder Materials with Specified Electrical and Magnetic Properties for Heavy and Two-Layer Rotors of Asynchronous Motors. **Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics**, Moscow, v. 29, n. 9, p.741-744, Sept. 1990.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. **Powder Metal Technologies and Applications**. 2nd ed. Ohio: ASM International, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17094-2:2008**: Máquinas elétricas girantes - Motores de indução Parte 2: Monofásicos. São Paulo, 2008.

BARBOZA, J. S. **Caracterização de Compósitos Magnéticos Macios Desenvolvidos Através da Matelurgia do Pó Aplicados a Núcleos de Máquinas Elétricas**. 2009. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

BAS, J. A. *et al*. Sintered soft magnetic materials. Properties and applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFT MAGNETIC MATERIALS (SMM15), 15. 2003, Bilbao. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Bilbao: Elsevier, 2003. p. 254-255.

BONATO, M. M. **Resistência à Corrosão do Aço ABNT 316L Injetado Sinterizado.** 2003. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2003.

BIGATON, C. **Apostila de projetos Mecânicos:** 3º Ciclo de Mecânica. 2013. 58 p. Disponível em: <http://www.etepiracicaba.org.br/cursos/apostilas/mecanica/3_ciclo/projetos _mecanicos.pdf>. Acesso em: 23 junho 2013.

BITTENCOURT, S. D. **Caracterização de Ligas Magnéticas Sinterizadas para Aplicação em Núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas.** 2012. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

BLACK & DECKER**. Furadeira de Impacto KR505**. Disponível em: <http://www. bdferramentas.com.br/prod/cata/listProdDeta.asp?prodID=KR505&idGrup=Ferr&idCate=Fur a>. Acesso em: 11 maio de 2013.

BRAGA, N. C. **Engrenagens - I (MEC025).** O Site do Hardware Livre - Oshw, São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/robotica /1625-mec025>. Acesso em: 23 junho 2013.

CAPUS, J. M**.** PM soft magnet in new applications. **Metal Powder Report**, Oxford, v. 57, n. 1, p. 20-21, Jan. 2002.

CREMONEZI, A. *et al*. **A Metalurgia do Pó:** Alternativa Econômica com Menor Impacto Ambiental. 1nd ed. São Paulo: Metallum, 2009.

DIAS, M. M. **Construção de Uma Máquina Síncrona de Relutância Trifásica com Rotor de Material Magnético Macio Sinterizado.** 1999. 86 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

DINIZ, A. E. *et al*. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 1. ed. São Paulo: Art Líber Editora, 2000.

ESSEL. **Metalurgia do Pó.** <http://www.essel.com.br/cursos/material/01/Processos Fabricacao/65proc.pdf >. Acesso em: 23 junho 2013.

FAMASTIL**. Furadeira Elétrica Manual.** Disponível em: <http://www.famastilfpower.com.br/furadeira-de-impacto-550w-prod-1.html>. Acesso em: 10 junho de 2013.

FITZGERALD, A.E. *et al*. **Electric Machinery**. 6nd ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

FRAYMAN, L. L. *et al*. Modified P/M Soft Magnetic Materials for Automotive Applications. **International Journal of Powder Metallurgy**, Princeton, v. 34, n. 7, p.31-39, Oct. 1998.

GERMAN, R.M. **Powder Metallurgy Science**. 2nd ed. New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 1984.

GRUPO **S**ETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **Sobre a Metalurgia do Pó**. Disponível em: <http://www.metalurgiadopo.com.br/Paginas/detalhes.asp?iType= 1&iPic=4>. Acesso em: 04 julho 2013.

GUTFLEISCH, O. *et al*. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. **Advanced Materials,** Weinheim, v. 23, p. 821–842, Feb. 2011.

HANEIJO, F. G. *et al*. Powder metallurgy materials for AC magnetic applications. In: PM² TEC, 96 WORLD CONGRESS, 1996, Washington, D.C. **PM² Tec, 96 World Congress.** Washington, D.C., 1996. 1-11.

HONDA, F. **Motores de Corrente Continua:** Guia rápido para uma Especificação Precisa. São Paulo: SIEMENS, 2006. 36 p. Publicação Técnica Unidade Automação e Controle – Acionamentos e Motores Elétricos/ SIEMENS.

HUAMING ELECTRIC MOTOR. **Chinaelectricmotor.** Disponível em: **<**http://www.chinaelectricmotor.com/motor/list_871.html>. Acesso em: 02 julho 2013.

JACK, A.G. The Impact of New Materials on the Design of Electrical Machines**.** In: IEE COLLOQUIUM, 1995, London. **The impact of new materials on design.** Stevenage: IET Digital Library, 1995. p.1/1-1/5.

JACK, A. G. *et al*. Claw pole armature permanent magnet machines exploiting soft iron powder metallurgy. In: ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE RECORD - IEEE INTERNATIONAL, 1997, Milwaukee. **Electric Machines and Drives Conference Record.** Stevenage: IET Digital Library, 1997. p. MA1/5.1-MA1/5.3.

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

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

KRAUS, J. D.; CARVER, K. R. **Eletromagnetismo.** Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.

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

MANUAL DE MOTORES ELÉTRICOS WEG**.** Jaraguá do Sul: WEG, 2005.

MORO, N.; AURAS, A. P. **Processos de fabricação:** 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.

NARASIMHAM, K.; HANEJKO, F.; MARUCCI, L. **Growth Opportunities with Soft Magnetic Materials.** Washington, D.C.: Hoeganaes Corporation, 2008. 9 p.

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

OLIVEIRA, E. C. P.; DIAS, J. C. Rendimento nos motores monofásicos. **WEG em Revista**, Jaraguá do Sul, v. 52, p. 13-17, Mai./Jun. 2008.

PELEGRINI, L. *et al*. Caracterização magnética da liga Fe-2%Si obtida por metalurgia do pó aplicada em núcleo de rotores e estatores. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos,** Porto Alegre, v. 6.2, p103-108, Ago. 2011.

PERSSON, M.; JANSSON, P. Advances in powder metallurgy soft magnetic composite materials for electrical machines**.** In: IEE COLLOQUIUM, 1995, London. **The impact of new materials on design.** Stevenage: IET Digital Library, 1995. p. 4/1-4/6.

SILVA, O. H.M. *et al*. Princípio de funcionamento do motor elétrico universal - reflexão educacional a partir de explicações de uma versão didática tipo série. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Londrina, v. 30, n. 9, p. 177-190, Abr. 2013.

SILVA, M. C. A. *et al*. Magnetic properties of spray formed Fe-3%wtSi, Fe-5%wtSi and Fe-6%wtSi alloys. **Materials Science Forum**, Dürnten, v. 416-418, p. 113-118, Feb. 2003.

SKARRIE, H. **Design of Powder Core Inductors**. 2001. 153 f. Licentiate Thesis, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation - Lund University, Lund, 2001.

SHOKROLLAHI, H.; JANGHORBAN, K. Soft magnetic composite materials (SMCs). **Journal of Materials Processing Technology**, Lausanne, v. 189, n. 1-3, p. 1–12, Jul. 2007.

SHOKROLLAHI, H**.** The magnetic and structural properties of the most important alloys of iron produced by mechanical alloying. **Materials and Design**, Shiraz, v.30, n. 9, p. 3374-3387, Oct. 2009.

STOREY, J. **How Real Electric motor Work**. Disponível em: < https://newt.phys.unsw.edu.au/hsc/hsc/electric_motors.html > Acesso em: 12 setembro 2013.

USTUDY INITIATIVE. **Universal Motor.** Disponível em: <http://www.ustudy.in/node/4736>. Acesso em: 10 junho 2013.

ANEXOS

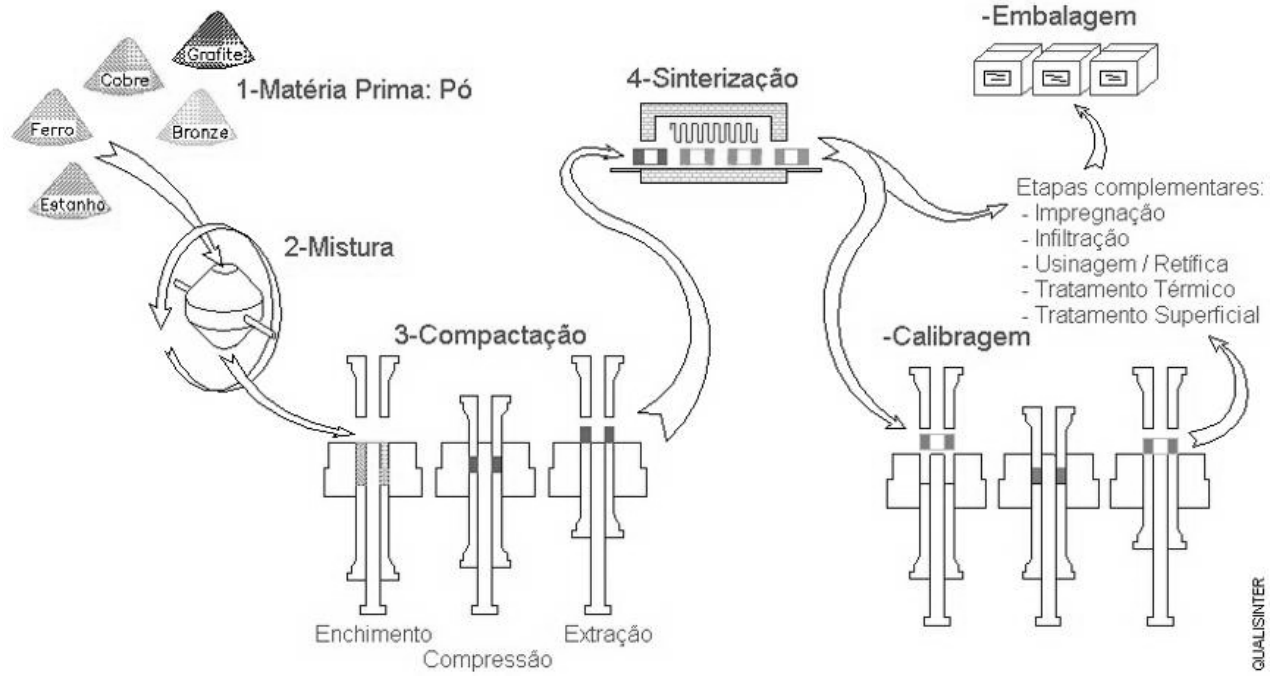
ANEXO A - PROCESSOS DA METALURGIA DO PÓ PARA OBTENÇÃO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS SINTERIZADOS

No processo de fabricação por metalurgia do pó incluindo núcleos do rotor e estator de máquinas elétricas rotativas, as peças são fabricadas a partir da mistura homogênea de elementos em pó, previamente selecionados de acordo com as características (mecânicas, elétricas, etc) desejadas para a aplicação. Os processos básicos da M/P são (GERMAN, 1984) (MORO, 2007):

1. Obtenção dos pós
2. Mistura
3. Compactação
4. Sinterização
5. Retificação ou Usinagem (somente em alguns casos)

Após a mistura os pós são compactados em uma matriz, adquirindo a forma da cavidade desta, e, posteriormente são sinterizados em fornos com atmosfera controlada para adquirir consistência e resistência mecânica (GERMAN, 1984) (MORO, 2007). A figura A.1 mostra um esquema das etapas da M/P (MORO, 2007).

Figura A.1– Principais etapas do processo de M/P.



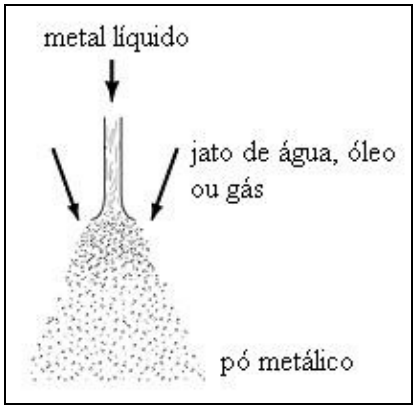
Fonte: MORO, 2007.

A produção de componentes magnéticos por metalurgia do pó, além de oferecer as vantagens típicas associadas a minimização de usinagem, permite obter características únicas de desempenho, como por exemplo a orientação magnética. Acrescenta-se a isto que pós de diferentes naturezas químicas como as ligas Fe-Si, Fe-P e Fe-Ni são fáceis de obter bastando que se misturem os pós homogeneamente. Portanto a seguir é apresentado um resumo sobre os processos da Metalurgia do Pó (M/P) convencional, bem como outros processos metalúrgicos para a obtenção de materiais magnéticos como a Modelagem de Pós por Injeção (Powder Injection Moulding) (MORO, N., 2007).

Obtenção e mistura dos pós

A forma, a distribuição e o tamanho de grão são características importantes a serem consideradas para a obtenção do pó utilizado no processo. Métodos de obtenção, que podem ser mecânico, químico, físico e físico-químico, são empregados, podendo ser utilizados individual ou conjuntamente, de acordo com a característica de pó almejada. Um dos métodos físicos mais usados é a atomização, onde um metal fundido é vazado por um orifício, formando um filete líquido, passando por jatos de ar, de gás ou de água, figura A.2 (ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, 1998) (ESSEL, 2013).

Figura A.2 - Obtenção de pós por atomização.



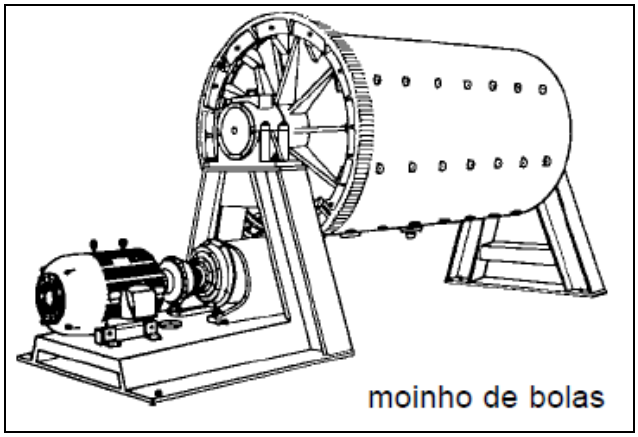
Fonte: ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, 1998.

Os jatos oriundos dos bocais produzem a pulverização do filete de metal fundido e seu imediato resfriamento. Depois, o pó é recolhido, reduzido, peneirado e está pronto para ser usado (ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, 1998).

Entre os métodos mecânicos para obtenção de pós, o mais difundido e largamente utilizado é a moagem. Geralmente é efetuada em um equipamento chamado moinho de bolas, que consiste num tambor rotativo contendo esferas metálicas de material resistente ao

desgaste. Quando o tambor gira, as esferas chocam-se umas contra as outras, desintegrando gradativamente o material que se encontra no interior do tambor. A figura A.3 ilustra um modelo do equipamento moinho de bolas (ESSEL, 2013).

Figura A.3 - Moinho de bolas.



Fonte: ESSEL, 2013.

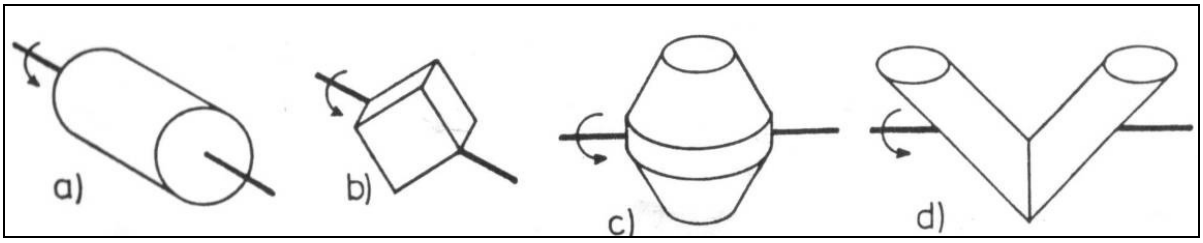
Os pós podem ser obtidos também por métodos químicos, como a corrosão, que produz a oxidação do metal pelo ataque de ácidos ou bases, ou a redução de óxidos metálicos pelo emprego de hidrogênio ou monóxido de carbono (ESSEL, 2013).

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

O objetivo da mistura é promover uma boa homogeneização dos materiais e incorporar o lubrificante. Em sistemas de um só componente, como no caso da produção de peças com ferro puro, a etapa de mistura tem função de promover uma distribuição uniforme do lubrificante na liga desejada. O lubrificante é utilizado para reduzir o atrito entre as partículas de pó e a parede da matriz, bem como, entre as próprias partículas. O lubrificante serve também para reduzir a força de extração da peça após a compactação, evitando danos ao compactado. Os lubrificantes mais difundidos comercialmente são, dentre outros, ácido esteárico, estearato metálico e estearato especial de zinco (GERMAN, 1984) (ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, 1998).

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

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



Fonte: GERMAN, 1984.

Compactação

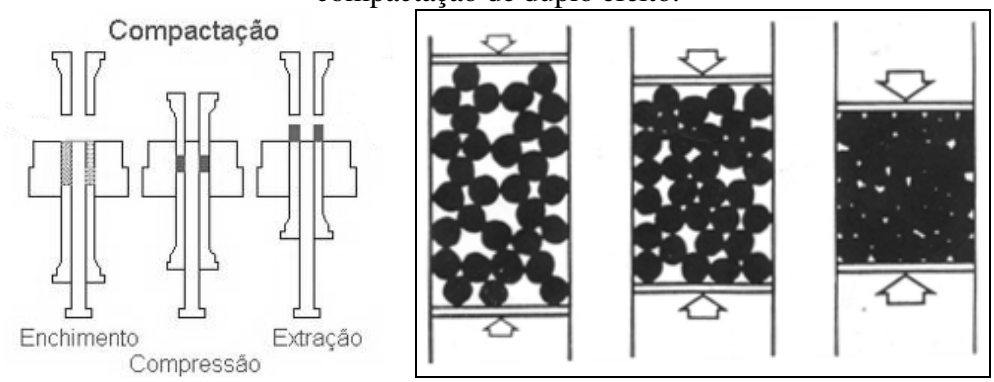
Esta etapa consiste em aplicar pressão de 150-900MPa sobre a mistura de pós, consolidando o material no formato desejado (GERMAN, 1984). Esta é a primeira das operações de consolidação da metalurgia do pó. O objetivo é conformar o pó na forma projetada, conferindo as dimensões finais da peça e obtendo adequada a densidade a verde do compactado e resistência mecânica necessária para manuseio posterior. O fator essencial é proporcionar o contato necessário entre as partículas de pó, para que a operação de sinterização seja efetuada de modo mais eficiente (BARBOZA,2009).

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

O método mais empregado é a compactação em matriz, representado pela técnica de compactação de duplo efeito (figura A.5 (a)). Este sistema é utilizado pressionando as peças com forças a partir de duas direções, produzindo peças com densidade mais uniforme (BARBOZA,2009).

Densidade a verde é a densidade da peça compactada antes de ser sinterizada e depende da pressão, das características das matérias-primas, distribuição das partículas, tamanho e forma das partículas, uso ou não de lubrificantes e da geometria da matriz, fazendo relação com os espaços vazios na peça, conforme pode ser visualizado na figura A.5 (b) (BARBOZA,2009).

Figura A.5 – (a) Estágios de um compactação de um pó numa matriz e (b) Sequência de compactação de duplo efeito.



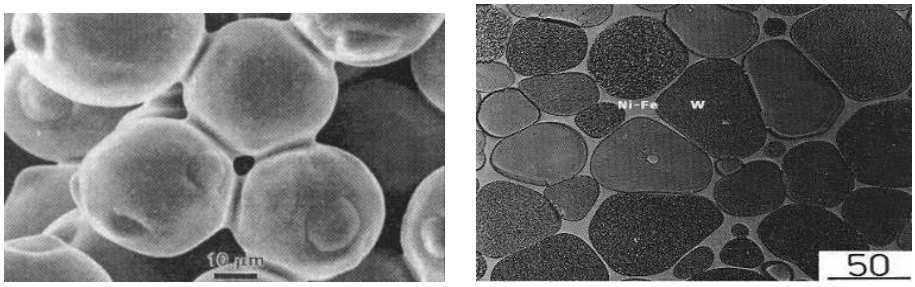
Fonte: DIAS, 1999 GERMAN, 1984.

Sinterização

A etapa de sinterização pode ser definida como um tratamento térmico, com condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de aquecimento e resfriamento, em que uma massa de pós ou compactado poroso perde a sua identidade pela formação de continuidade de matéria entre as partículas e adquire as propriedades desejadas de densidade, dureza e resistência mecânica (BONATO, 2003).

A sinterização consiste no aquecimento do compactado verde à temperaturas elevadas, porém, abaixo do ponto de fusão do metal ou do principal constituinte da liga metálica considerada. É tipicamente um processo de difusão no estado sólido, podendo ocorrer em fase sólida e líquida. Conforme pode ser observado na figura A.6, no primeiro caso, a temperatura promove a união das partículas do pó com temperaturas abaixo do ponto de fusão do material, porém, suficiente para criar um "pescoço" de ligação entre as partículas de pó. Já na ocorrência de fase líquida, sinteriza-se o material utilizando elementos com pontos de fusão diferentes e o material com menor ponto de fusão se liquefaz e interconecta a partícula do outro material (ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, 1998).

Figura A.6 - (a) Sinterização por fase sólida, (b) Sinterização por fase líquida.



(a) (b)

Fonte: ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, 1998.

ANEXO B - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS

Resume-se em três as principais propriedades físicas para definição de determinado material e processo de fabricação em núcleos de máquinas elétricas rotativas:

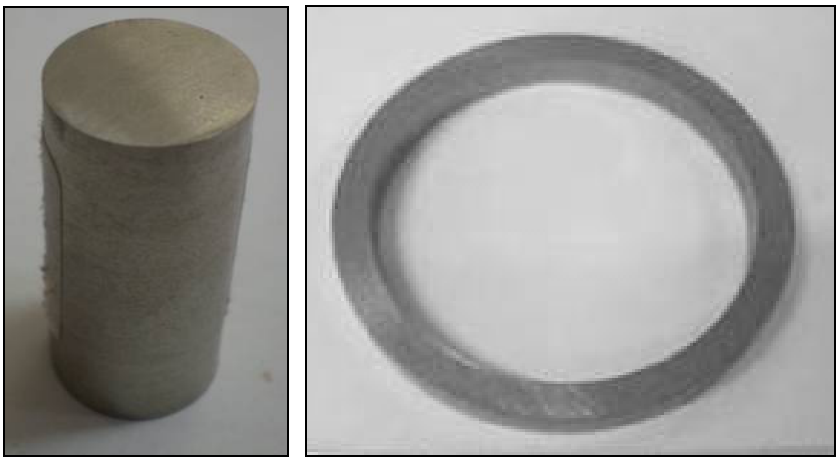
1. Propriedades magnéticas;
2. Resistividade elétrica;
3. Propriedades mecânicas.

Nas magnéticas deve ser observado principalmente o comportamento da magnetização do material, a elétrica trata da resistividade elétrica para determinar as perdas elétricas, e, as mecânicas para garantir que suportará os esforços mecânicos da máquina durante seu funcionamento e vida útil.

A partir de corpos de prova em formato de cilindro e anéis (figura B.1), são extraídas as propriedades mecânicas, magnéticas e elétricas de interesse:

- Densidade
- Resistividade Elétrica.
- Curva de Histerese.
- Curva de Magnetização.
- Dureza.
- Tensão de Escoamento.
- Metalografia.
- Perdas Magnéticas com a variação da frequência.

Figura B.1 - (a) Cilindro e (b) Anel.



(a) (b)

Fonte: BITTENCOURT, 2009.

Propriedades Magnéticas dos Materiais

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

Caso o material deste núcleo seja de características ferromagnéticas, muitas linhas de fluxo serão induzidas em seu interior, acarretando uma relação BxH que respeita uma determinada curva. Esta curva é denominada de curva de histerese ou ciclo de histerese Estes materiais também são conhecidos como materiais magnéticos (BARBOZA,2009).

A curva do ciclo de histerese apresenta dois pontos de interesse em materiais aplicados em máquinas elétricas rotativas: o ponto B_r, denominado de indução magnetismo remanente ou retentividade, o qual representa a indução magnética residual sem campo magnético aplicado (H=0) e o ponto H_c, denominado de força coercitiva, que corresponde ao valor necessário de campo magnético para desmagnetizar o material. No SI B é dado em Wb e H, em Tesla (DIAS, 1999) (CREMONEZI, 2009).

A partir das curvas de histerese obtêm-se propriedades magnéticas como a indução de saturação, magnetismo remanente e força coercitiva.

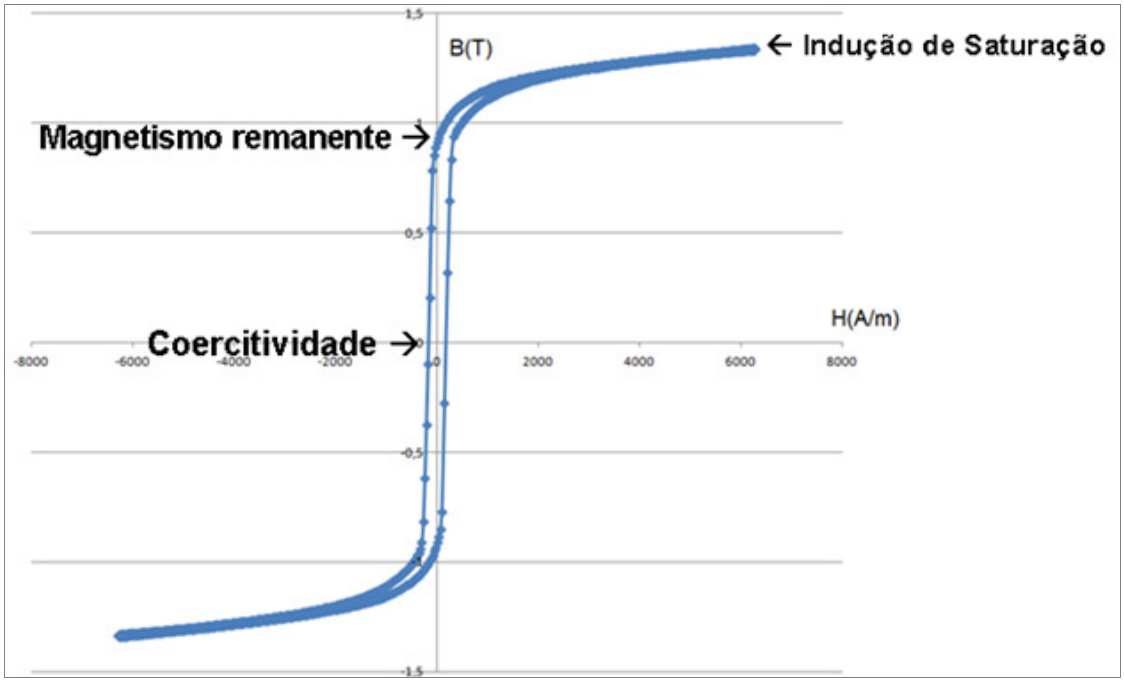
A curva de histerese e de magnetização é obtida através de ensaios de anéis de Rowland (figura B.2), bobinados a utilizando como núcleo corpos de prova sinterizados.

Figura B.2 - Anel de Rowland bobinado e corte mostrando as camadas presentes.

Fonte: BITTENCOURT, 2009.

A indução de saturação ou indução máxima pode ser visualizada a partir dos valores de campo onde a indução tende a permanecer constante ou com declividade quase nula (KRAUS, 1978). A figura B.3 mostra a curva obtida para o Fe1%P e a tabela B.1 demonstram os resultados encontrados em estudos anteriores com a comparação entre as ligas.

Figura B.3 - Curva de histerese da liga Fe1%P.



Fonte: BITTENCOURT, 2009.

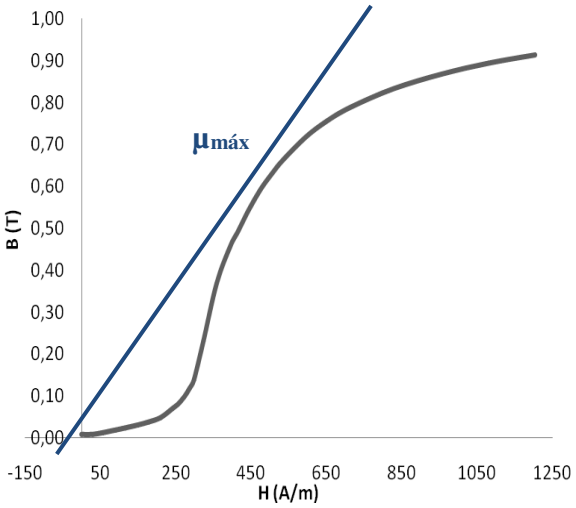
Tabela B.1 - Propriedades Magnéticas dos corpos de prova na forma de anel (média de 3 amostras).

Ligas	Indução de Saturação (T)	Magnetismo Remanente (T)	Força Coercitiva (A/m)	Perdas por Histerese (W/Kg)
Fe puro	1,19	0,90	448,2	1,60E-02
Fe1%P	1,25	0,96	215,8	8,46E-03
Fe2%P	1,36	1,00	207,9	7,69E-03
Fe3%P	0,98	0,50	210,7	5,88E-03
Fe1%Si	1,03	0,71	246,3	7,46E-03
Fe3%Si	0,85	0,48	225,4	5,99E-03
Fe5%Si	0,67	0,30	216,3	4,38E-03
Fe50%Ni	0,93	0,22	112,1	3,45E-03

Fonte: BITTENCOURT, 2009.

A permeabilidade magnética relativa máxima é dada em função do campo B(T) e a indução magnética H(A/m), sendo obtida a partir de dados experimentais e apresentando uma curva típica para cada material. A permeabilidade máxima se encontra no ponto da curva de magnetização onde a relação de B e H é máxima, sendo designada por $\mu_{máx}$ (figura B.4) (MORO, 2007).

Figura B.4 - Curva de magnetização da liga Fe1%P.



Fonte: BITTENCOURT, 2009.

Para obter o valor da permeabilidade relativa máxima, o valor encontrado no gráfico foi dividido pela permeabilidade do vácuo (4π x10^{-7} H/m.) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) (MORO, 2007). A tabela B.2 mostra os resultados obtidos entre as ligas estudadas.

Tabela B.2 - Permeabilidade relativa máxima.

Liga	Permeabilidade relativa máxima $\mu_{máx}$
Fe puro	1852,6
Fe1%P	2766,1
Fe2%P	4198,7
Fe3%P	919,4
Fe1%Si	1959,8
Fe3%Si	1258,7
Fe5%Si	493,8
Fe50%Ni	945,6

Fonte: BITTENCOURT, 2009.

Um fator que afeta as propriedades magnéticas é o tamanho da partícula do pó. O aumento da granulometria eleva a permeabilidade magnética, mas aumenta a coercitividade. Baixa quantidade de carbono e microestrutura sem a presença de perlita são necessárias para se obter boas propriedades magnéticas nos materiais ferromagnéticos (DINIZ, 2000). O tamanho do grão determina um efeito muito forte nas perdas magnéticas, sendo que sua dimensão ideal varia entre 100 e 150 μm. Além disto, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização, também, alteram algumas propriedades físicas (BAS, 2003) (SHOKROLLAHI, 2009) (HANEIJO,1996) (SKARRIE, 2001).

As propriedades magnéticas dos materiais aplicados em máquinas elétricas são melhores aprofundadas no anexo C.

Resistividade Elétrica

Resistividade elétrica é a capacidade que um determinado material tem de se opor à passagem de um fluxo de corrente elétrica, podendo ser determinada a partir da resistência elétrica de corpos com geometria perfeitamente conhecidas (DIAS, 1999).

Em núcleos de máquinas elétricas busca-se alta resistividade para minimizar o efeito das correntes induzidas (correntes parasitas ou de Foucault) que levam ao aquecimento e à respectiva perda de rendimento.

Tradicionalmente, tanto o estator como o rotor são construídos com chapas laminadas e isoladas uma vez que esta isolação entre chapas restringe as correntes induzidas a uma menor área de circulação. As perdas por correntes parasitas em um núcleo maciço são consideravelmente maiores que as perdas em núcleos obtidos a partir de chapas isoladas eletricamente. Quanto menor a espessura das chapas, menores são as correntes parasitas e menor é a perda de potência nestes núcleos. A redução das correntes induzidas, também pode ser obtida a partir do aumento da resistência elétrica do corpo, ou a partir do aumento da resistividade elétrica do material, uma vez que, resistência ou resistividade e corrente elétrica, são grandezas físicas inversamente proporcionais. Por este motivo, motores elétricos de alto rendimento são construídos com chapas de aço silício, que possui resistividade elétrica maior que o aço baixo carbono (NASAR, 1987) (FITZGERALD, 2008).

A resistividade é influenciada por vários fatores, sendo que, aqueles considerados de maior importância no desenvolvimento deste trabalho, estão relacionados a seguir:

- Na maioria dos casos, a resistividade de uma liga metálica aumenta quando são adicionadas impurezas, uma vez que estas provocam distorções no reticulado cristalino. Quanto maior as imperfeições da rede cristalina, maior a resistividade. Por esta razão, uma resistividade maior em metais é obtida em ligas compostas por dois ou mais metais. Nestas condições ocorre interpenetração das redes cristalinas dos materiais presentes na liga (DIAS, 1999) (BAS, 2003) (SHOKROLLAHI, 2009) (LALL, 1992).

- Quando são adicionados silício, fósforo ou níquel ao ferro sinterizado ocorre aumento da resistividade da liga. A adição de silício ao ferro, além de aumentar a resistividade

elétrica aumenta, também, a permeabilidade magnética relativa máxima e diminui a coercitividade. Contudo, diminui a indução de saturação (DIAS, 1999) (LALL, 1992).

- No caso de materiais sinterizados, a maioria dos materiais ferrosos possui resistividade elétrica maior, devido principalmente à porosidade e à oxidação superficial das partículas. A resistividade das ligas metálicas diminui com o aumento da densidade independente do tipo de material. Com o aumento da porosidade há uma diminuição da permeabilidade magnética, da indução de saturação e aumento da coercitividade. A alta densidade de peças por M/P determina elevada permeabilidade magnética e indução de saturação (DIAS, 1999) (BAS, 2003) (SHOKROLLAHI, 2009) (LALL, 1992).

- A resistividade elétrica para a maioria das ligas metálicas, também é função do tamanho do grão. Quanto menor o tamanho do grão, maior a quantidade de contornos de grãos, que também provocam distúrbios na rede cristalina aumentando a resistividade. Entretanto, a diminuição do tamanho do grão ocasiona um decréscimo da permeabilidade magnética e um aumento da coercitividade (DIAS, 1999) (BAS, 2003) (SHOKROLLAHI, 2009) (HANEIJO, 1996) (NARASIMHAM, 2008).

A resistividade é dada em Ω.m e é determinada a partir do cálculo da resistência elétrica de um corpo de prova com dimensões definidas (exemplo na figura B.5), seguindo as leis básicas da eletricidade em que:

$$R = V / I$$

R = Resistência
V = Tensão
I = Corrente

E considerando a secção transversal e comprimento através da equação (BIGATON, 2013) (GERMAN, 1984):

$$\rho = R \times (A / l) = (V / I) \times (A / l)$$

Onde:

ρ - Resistividade Elétrica (Ω.m)
R – Resistência (Ω)
l – Comprimento do Anel (m)
A – Área da Seção Transversal (m^2)
V – Tensão Elétrica (V)
I – Corrente Elétrica Aplicada (A)

Figura B.5 - Exemplo de material utilizado no ensaio de resistividade.

Fonte: BITTENCOURT, 2009.

Tabela B.3 - Média de Resistividade (ρ) de corpos de prova na forma de anel.

Liga	**ρ (Ω.m)**
Fe puro	1,57E-07
Fe1%P	1,97E-07
Fe2%P	3,58E-07
Fe3%P	4,21E-07
Fe1%Si	2,76E-07
Fe3%Si	4,44E-07
Fe5%Si	4,82E-07
Fe50%Ni	3,17E-07

Fonte: BITTENCOURT, 2009.

Propriedades Mecânicas dos Materiais

As principais grandezas a serem consideradas são dureza e ductilidade, a fim de que os materiais utilizados para a fabricação dos núcleos de máquinas elétricas suportem os esforços solicitados pela carga, vibração, entre outros. Assim, devem ser realizados ensaios de dureza, ductilidade, curva de compressão x deformação ou curva de escoamento e avaliação da microestrutura.

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

- Elevada Permeabilidade Magnética Relativa;
- Baixa Coercitividade Magnética;
- Elevada Resistividade Elétrica;
- Elevada Indução de Saturação.
- Dureza e ductilidade compatíveis com as vibrações as quais o motor é submetido.

Densidade.

As densidades de corpos de prova de estudos anteriores estão na tabela 1. Foi calculada a partir dos dados dimensionais dos corpos após a sinterização.

Tabela B.4 - Densidade sinterizado.

Densidade (g/cm³)		Fe Puro	Fe1%P	Fe2%P	Fe3%P	Fe1%Si	Fe3%Si	Fe5%Si	Fe50%Ni
Sinterizado	Média	6,63	6,71	6,87	7,00	6,70	6,73	6,76	7,25
	Desvio	0,02	0,04	0,02	0,02	0,07	0,05	0,02	0,02

Fonte: BRAGA, 2013.

Pode-se observar que em todos os casos a densidade aumentou com o acréscimo de P e Si, sendo que o maior valor foi com o Fe50% Ni.

Dureza: Conforme estudos anteriores, as ligas sinterizadas possuem dureza maior que o Fe-Puro, conforme se observa na tabela B.5:

Tabela B.5 - Dureza Brinell para ligas sinterizadas.

Ligas	Dureza Brinell (HB)
Fe-puro	52,07
Fe1%P	124,5
Fe2%P	202,4
Fe3%P	242,9
Fe1%Si	64,5
Fe3%Si	73,2
Fe5%Si	101,9
Fe50%Ni	101

Fonte: BITTENCOURT, 2009.

Tensão de Escoamento: em resumo, a tensão de escoamento é a tensão necessária para causar uma deformação plástica, ou seja, para que o material se deforme e não retorne automaticamente a forma original. A tabela B.6 imprime os resultados obtidos em estudos anteriores:

Tabela B.6 - Tensão de escoamento das diversas ligas.

Liga	Força [N.m]	Tensão de Escoamento [N.mm²]
Ferro Puro	19492	137,20
Fe1%P	20607	145,05
Fe2%P	17611	123,96
Fe3%P	16706	117,59
Fe1%Si	20803	146,42

Fe3%Si	22280	156,81
Fe5%Si	24021	169,07
Fe50%Ni	22976	161,72

Fonte: BITTENCOURT, 2009.

A seguir estão descritas as ligas e suas propriedades físicas de interesse (LALL, 1992) (KRAUS, 1978):

- Ferro puro: Os materiais sinterizados de ferro puro são caracterizados por altas perdas e propriedades magnéticas médias. Seu uso é aconselhável, principalmente, para corrente contínua ou circuitos de excitação magnética permanente, com fluxos magnéticos de médio a alto, devido a sua baixa resistividade elétrica. O ferro puro sinterizado de alta densidade possui saturação magnética e permeabilidade altas, bem como, baixa coercitividade. Essas propriedades são essenciais para aplicações de corrente contínua. Os materiais e as condições de processamento necessitam de rígido controle para a obtenção de propriedades adequadas, por exemplo, se tensões são introduzidas ou o nível de pureza diminui, todas as propriedades são afetadas (DIAS, 1999) (KRAUS, 1978);

- Liga ferro-fósforo: Os materiais sinterizados de ferro-fósforo mantêm as vantagens econômicas do ferro puro, adicionando ainda características magnéticas superiores. Basicamente, a força coercitiva é reduzida e se obtém alta indução máxima. Estas ligas são utilizadas, principalmente, quando se deseja boa resposta magnética aliada a propriedades mecânicas igualmente adequadas (KRAUS, 1978);

- Ligas ferro-silício: Estas ligas apresentam força coercitiva e indução máxima similares às das ligas ferro fósforo. Porém, sua resistividade elétrica é bastante superior, diminuindo assim as perdas por correntes parasitas. Estas ligas são aplicadas em circuitos que operam em frequências médias de até 1200 Hz. Peças de alta densidade com induções máximas elevadas podem ser obtidas, porém, o custo de produção aumenta devido à baixa compressibilidade do material (DIAS, 1999) (LALL, 1992);

- Ligas ferro-níquel: Se caracterizam por possuírem elevada permeabilidade, baixa indução de saturação e resistividade de valor intermediário, se comparada às demais. Suas propriedades tornam essas ligas de interesse em aplicações mais sofisticadas, que

operam em altas frequências e com baixa excitação, nas quais é exigido um tempo de resposta muito curto como, por exemplo, em circuitos atuadores de termopares. Para a obtenção de alta densidade (7,5 g/cm^3), o pó é compactado sob pressão de 690 Mpa e sinterizado em vácuo acima de temperatura de 1200 ºC. Com este processo, pode ser obtida elevada permeabilidade relativa máxima e baixa força coercitiva (DIAS, 1999).

ANEXO C - GRANDEZAS ELETROMAGNÉTICAS ENVOLVIDAS NO ESTUDO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Campo, Indução e Fluxo Magnético

Tomando uma bobina com determinado material em seu núcleo e submetendo-a a circulação de uma corrente elétrica I, um campo magnético H será gerado no interior desta bobina e a peça irá sofrer uma indução magnética B (BONATO, 2003).

Campo Magnético (H): De acordo com a lei de Ampère uma carga elétrica em movimento ou corrente elétrica **I** produz, além do campo elétrico, um campo magnético H (KRAUS, 1973) (WEG, 2005).

$$\oint \overline{H} d\overline{l} = \int_s J ds = I$$

onde H é o campo magnético [A/m], l é o comprimento infinitesimal [m], J é a densidade de corrente [A/m^2], S é um elemento infinitesimal de superfície [m^2] e I é a corrente elétrica [A]. No sistema CGS H é expresso em Oersted [Oe] tal que (JILES, 1998) (WEG, 2005).

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

Densidade de Fluxo ou Indução Magnética (B): Um campo magnético H induz linhas de fluxo magnético ou indução magnética B, que relacionam-se através da permeabilidade magnética do meio μ tal que (JILES, 1998) (WEG, 2005).

$$B = \mu H = \mu_o \mu_r H = \mu_o H + J_S$$

onde B é a indução magnética [T] ou [Wb/m^2], 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 [4π x 10^{-7} H/m] e J_S é a polarização de magnetização [T]. No sistema CGS B é expresso como Gauss [G] tal que (KRAUS, 1978) (JILES, 1998).

$$1\ T = 10^4\ G$$

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

Fluxo Magnético Total (φ): Para B uniforme e superfície plana o fluxo magnético total φ perpendicular a superfície pode ser escrito como (KRAUS, 1978) (JILES, 1998).

$$\varphi = BA$$

onde φ é o fluxo magnético total [Wb], B é a indução magnética [T] e A a área da seção, transversal às linhas de fluxo [m^2]. Quando as linhas de indução magnética não são perpendicular a área A, a equação A.5 fica (KRAUS, 1978) (JILES, 1998).

$$\varphi = BA.\cos\alpha$$

onde α é o ângulo entre a perpendicular a área A e a direção de B. Se B não for uniforme sobre uma área, a equação A.6 se generaliza de tal forma que (KRAUS, 1978) (JILES, 1998).

$$\varphi = \iint B.\cos\alpha.ds$$

Permeabilidade magnética relativa

A permeabilidade magnética do meio é representada como (KRAUS, 1978) (JILES, 1998).

$$\mu = \mu_r \mu_o$$

A tabela c.1 relaciona algumas substâncias com suas respectivas permeabilidade magnética relativa. Deve-se salientar que a permeabilidade magnética relativa não é constante para alguns materiais, principalmente os ferromagnéticos e, neste caso, a tabela apresenta os valores máximos (KRAUS, 1978).

A partir da tabela C.1 pode-se concluir que: (KRAUS, 1978) (JILES, 1998).

- Substâncias diamagnéticas: μ_r ligeiramente menor que 1;
- Substâncias paramagnéticas: μ_r ligeiramente maior que 1;
- Substâncias ferromagnéticas: μ_r muito maior que 1;

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

Tabela C.1 - Permeabilidade relativa de alguns materiais.

SUBSTÂNCIA	GRUPO	μ_r
Bismuto	diamagnético	0,99983
Prata	diamagnético	0,99998
Cobre	diamagnético	0,999991
Água	diamagnético	0,999991
Vácuo	não-magnético	1
Ar	paramagnético	1,0000004

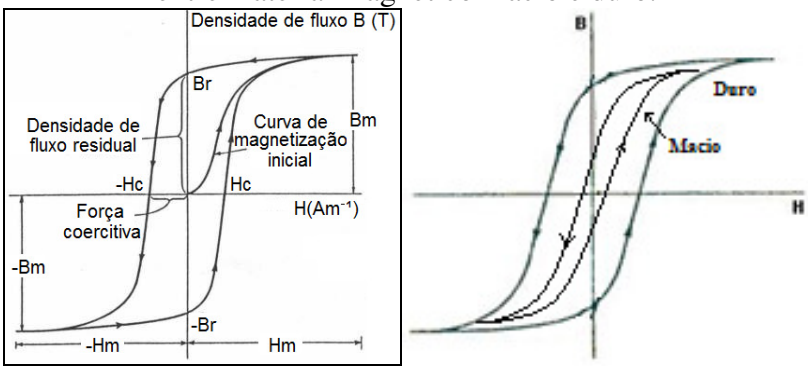
Alumínio	paramagnético	1,00002
Paládio	paramagnético	1,0008
Pó de permalloy 2-81	ferromagnético	$1,3 \times 10^2$
Cobalto	ferromagnético	$2,5 \times 10^2$
Níquel	ferromagnético	$6,0 \times 10^2$
Ferroxcube 3	ferromagnético	$1,5 \times 10^3$
Aço doce	ferromagnético	$2,0 \times 10^3$
Ferro (0,2% de impurezas)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

Fonte: DINIZ, 2000.

Curva de histerese

Se um material for colocado dentro de uma bobina na qual circula uma corrente elétrica I, um campo magnético H será gerado no interior desta bobina, e o material irá sofrer uma indução magnética B. Se o material for diamagnético ou paramagnético poucas linhas de fluxo magnético serão induzidas e a relação BxH será aproximadamente linear. Se o material for ferromagnético muitas linhas de fluxo serão induzidas (fenômeno de magnetização) e a relação BxH tem as características de uma curva como mostrada na figura C.1. Observa-se que esta curva possui uma histerese sendo, portanto denominada de curva de histerese ou ciclo de histerese. Os materiais que possuem características magnéticas semelhantes àquelas mostradas pela curva da figura C.1(a) são conhecidos como materiais magnéticos (KRAUS, 1978) (JILES, 1998).

Figura C.1 - Ciclo de histerese: (a) para um material magnético duro; (b) comparação entre material magnético macio e duro.



(a) (b)

Fonte: DIAS, 1999.

O ponto em que a curva corta o eixo de B, no quadrante superior esquerdo, é denominado de magnetismo remanente e representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado (H = 0). O magnetismo remanente máximo é denominado de retentividade B_r. O ponto em que a curva corta o eixo de H no mesmo quadrante é denominado de força coercitiva e representa o campo magnético

necessário para desmagnetizar o material (B = 0). O campo desmagnetizante máximo é denominado de coercitividade H_c. Outro fator importante na identificação dos materiais magnético é o produto energético BH_{max} , cuja unidade é Mega Gauss Oersted [MG.Oe] e está associado com a densidade de energia armazenada num material magnético.

A figura C.1(b) mostra dois ciclos de histerese, um largo que representa um material magnético duro também conhecido como ímã permanente (geralmente materiais ferromagnéticos), e um estreito que representa um material magnético macio (geralmente materiais ferromagnéticos) (KRAUS, 1978) (JILES, 1998).

Magnetização

Os campos magnéticos fazem-se presentes em torno de um condutor, quando por ele flui uma corrente. Estão presentes também em volta de objetos magnetizados como, por exemplo, um ímã. O campo de um ímã é produzido por movimentos de translação e rotação dos elétron, sendo mais importante a *rotação*. Este movimento do elétron é equivalente em efeito a uma minúscula espira de corrente que atua como um ímã miniatura ou dipolo magnético. Embora o efeito de cada anel atômico seja muito pequeno, o efeito combinado de bilhões deles num ímã resulta num campo magnético ao redor do ímã. Em um átomo com muitos elétrons presentes, somente os spins dos elétrons das camadas incompletas contribuirão para o campo magnético do átomo (KRAUS, 1978).

Nos materiais ferromagnéticos cada átomo tem um momento de dipolo relativamente grande causado principalmente por um momento eletrônico de spin não compensado. Forças interatômicas fazem com que estes momentos se alinhem de modo paralelo em regiões que contém um grande número de átomos. Estas regiões são chamadas domínios magnéticos e podem ter muita variedade de formas e tamanhos desde um micron até vários centímetros. Assim, um domínio age como um imã pequeno, mas não atomicamente pequeno (KRAUS, 1978).

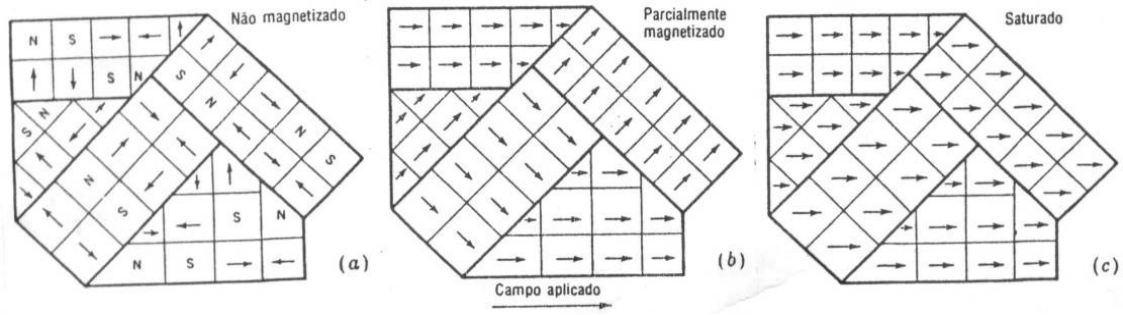
A figura C.2(a) mostra um fragmento de um material cristalino. Este fragmento divide-se em grãos, limitadas pelas linhas mais grossas, que por sua vez se subdividem em domínios, limitados pelas linhas mais finas. As setas indicam a direção de magnetização dos domínios. Um **N** representa um domínio com um polo norte dirigido para fora da página e um **S** representa um domínio com um polo sul dirigido para fora da página. A anisotropia magnetocristalina faz com que os spins dos elétrons dos átomos adjacentes se alinhem espontaneamente numa determinada direção conhecida como direção de mais fácil magnetização e esta região define um domínio. Portanto a nível de domínio este fragmento

apresenta um magnetismo remanente. Entretanto os domínios adjacentes apresentam polarização contrária e, macroscopicamente, este fragmento apresenta magnetização nula. Em um cristal de ferro por exemplo, há seis direções de fácil magnetização. Isto é, há uma direção positiva e negativa ao longo de cada um dos três eixos do cristal, perpendiculares entre si.

Com a aplicação de um campo magnético H no sentido indicado pela seta, alguns domínios, com polaridades opostas ao campo aplicado ou perpendiculares a ele, tornam-se instáveis e giram rapidamente para outro sentido de fácil magnetização, na mesma direção do campo ou bem próximo a este. O resultado, depois que todos os domínios mudaram de direção, está mostrado na figura C.2 (b) (KRAUS, 1978).

Aumentando-se mais o campo aplicado, a direção de magnetização dos domínios, que ainda não estão paralelos ao campo, é girada gradualmente para a direção de H. Este aumento de magnetização é mais difícil e podem ser necessários campos muito fortes para atingir a saturação, onde todos os domínios são magnetizados paralelos ao campo, como indicado na figura C.2 (c) (KRAUS, 1978).

Figura C.2 - Estágios sucessivos de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo.



Fonte: BIGATON, 2013.

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

A magnetização que aparece somente na presença de um campo aplicado pode ser chamada de magnetização induzida para diferenciar da magnetização permanente, que está presente na ausência de um campo aplicado (KRAUS, 1978).

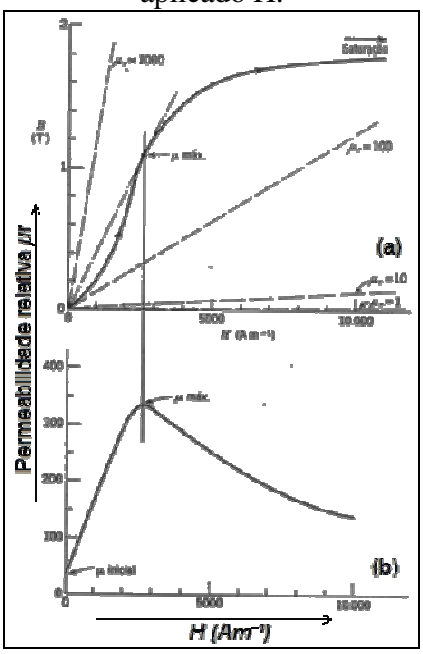
Uma curva típica de magnetização de um material ferromagnético é mostrado pela curva sólida da figura C.3 (a). Para fins de comparação, a figura mostra quatro linhas tracejadas,

correspondendo às permeabilidades relativas constantes μ_r de 1, 10, 100 e 1000. A permeabilidade relativa em qualquer ponto da curva de magnetização é dada por:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_o H} = 7{,}9.10^5 \frac{B}{H}$$

A figura C.3(b) apresenta um gráfico da permeabilidade relativa como função do campo H aplicado. A permeabilidade relativa máxima está no ponto da curva de magnetização onde a relação B e H são máximas, e é designada como μ_{max} (KRAUS, 1978).

Figura C.3 - (a) Curva de magnetização típica, (b) relação entre permeabilidade relativa e campo aplicado H.



Fonte: BARBOZA, 2009.

Quando H é aumentado, o valor de B aumenta rapidamente a princípio e depois mais lentamente. Nos valores suficiente altos de H a curva tende a ficar assintótica. Esta condição é chamada de saturação magnética. A curva de magnetização inicial pode ser dividida em duas seções. A seção íngreme corresponde à condição de fácil magnetização, enquanto a seção plana corresponde à condição de difícil magnetização (KRAUS, 1978).

ANEXO D - MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

As máquinas elétricas rotativas podem funcionar como motor, convertendo energia elétrica em mecânica ou como gerador, fazendo o contrário. Em resumo, a transformação de energia ocorre através de interação de campo magnético (indução eletromagnética) da parte fixa e da parte girante. Nesta conversão de energia ocorrem perdas em sua maior parte na forma de calor, seja pelo atrito, tipo do material empregado, projeto, etc. A seguir será apresentado um resumo sobre máquinas elétricas rotativas, descrevendo seus principais conceitos, perdas e tipos.

Transformação de energia e perdas

A potência mede a "velocidade" com que a energia é aplicada ou consumida (WEG, 2005). Numa máquina elétrica rotativa ideal, no funcionamento como gerador ou motor, a potência mecânica no eixo é calculada como:

$$P_{mec} = \tau_{ext} \cdot w$$

onde $\mathbf{P_{mec}}$ é a potência mecânica [W], $\boldsymbol{\tau_{ext}}$ o torque desenvolvido no eixo [N.m] e **w** a velocidade angular [rad/seg]. A potência elétrica é calculada como:

$$P_{ele} = V.I$$

onde $\mathbf{P_{ele}}$ é a potência elétrica [W], **V** a tensão elétrica [V] e **I** a corrente elétrica [A].

Para uma máquina ideal, sem perdas, o princípio da conservação de energia estabelece que a potência mecânica ($\mathbf{P_{mec}}$) deve ser idêntica a potência elétrica ($\mathbf{P_{ele}}$), assim: (NASAR, 1987) (FITZGERALD, 2008) (KOSOW, 1986)

$$P_{mec} = P_{ele} \Rightarrow \tau w = VI$$

A potência solicitada a uma máquina elétrica é definida pelas características da carga que está sendo considerada, ou seja, independente da potência nominal da máquina. A potência transmitida à carga pelo eixo do motor é menor que a potência absorvida da rede. Isto acontece devido às perdas que devem ser consideradas e minimizadas a fim de obter um melhor rendimento. Estas perdas podem ser resumidas em:

- $\mathbf{P_{Ra}}$ **-** potência dissipada nos enrolamentos de armadura, que representam as perdas nos enrolamentos da máquina;
- $\mathbf{P_{mag}}$- potência representando as perdas magnéticas por ciclo de histerese e correntes de Foucault;
- $\mathbf{P_M}$ - potência representando as perdas mecânicas para ventilação da máquina e atrito entre o eixo e os mancais.

O desempenho de uma máquina pode ser medido a partir de seu rendimento η, que considera as perdas na máquina relacionando a potência de entrada e a potência de saída, ou seja (NASAR, 1987) (FITZGERALD, 2008) (KOSOW, 1986):

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

Fatores como aumento da resistividade elétrica e diminuição da coercitividade magnética dos núcleos do estator e do rotor diminuem as perdas magnéticas aumentando o rendimento da máquina (NASAR, 1987) (FITZGERALD, 2008) (KOSOW, 1986).

Classificação das máquinas elétricas rotativas

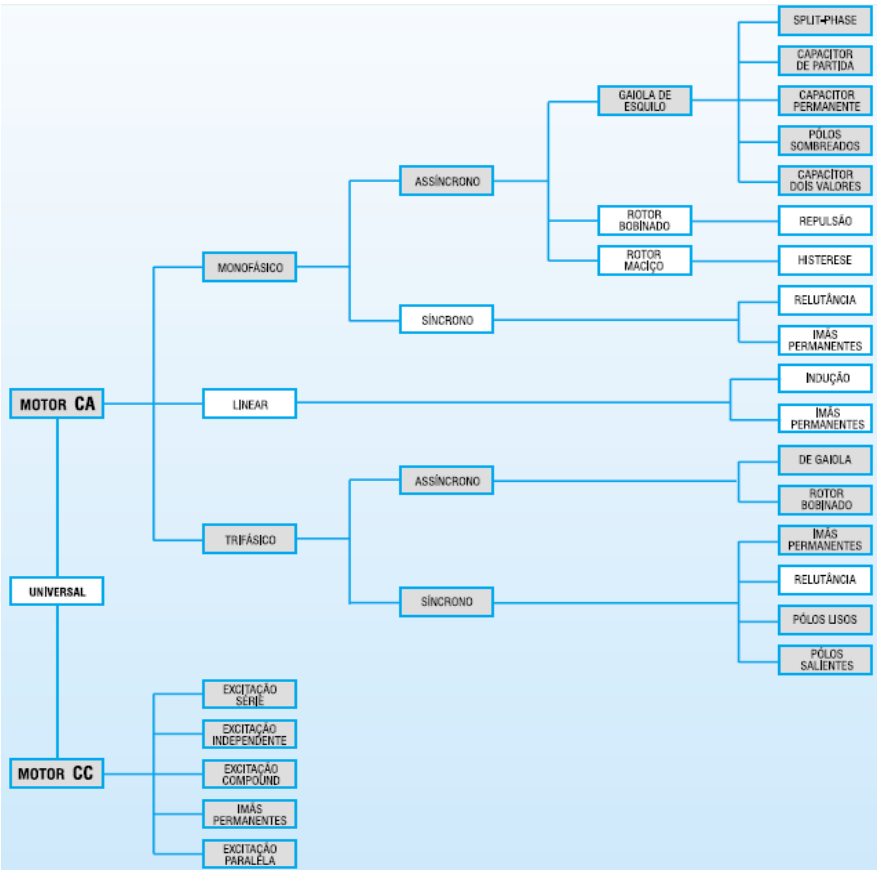
Foram desenvolvidos geradores e motores com princípios e características diferentes para atender com melhor rendimento e durabilidade as mais diversas necessidades.

Em se tratando de geradores, os principais tipos são:

- Gerador Síncrono
- Gerador de indução ou Gerador Assíncrono
- Gerador de Corrente contínua (dínamo)

A figura D.1 mostra um diagrama com os principais tipos de motores CC e CA.

Figura D.1 - O universo tecnológico de motores elétricos.



Fonte: WEG, 2005.