

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 ESTATOR POR METALURGIA DO PÓ A SER
UTILIZADO EM UM MOTOR UNIVERSAL

FERNANDO MARTINS FERNANDES

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 ESTATOR POR METALURGIA DO PÓ A SER
UTILIZADO EM UM MOTOR UNIVERSAL

FERNANDO MARTINS FERNANDES
Tecnº 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. Lírío 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.

Ao colega de trabalho Roberto Da Cas que esteve junto em todas as etapas do trabalho como amigo e colega de profissão.

Aos funcionários do LdTM que auxiliaram.

Aos meus Pais, irmãos e minha esposa Wanessa pelo apoio incondicional.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	5
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS	11
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Materiais Magnéticos por Metalurgia do Pó	16
2.2. Aplicação da M/P em Núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas.....	16
2.3. Motores universais e aplicação em furadeiras manuais.....	17
2.3.1 Princípio de funcionamento e aspectos construtivos dos motores universais	18
2.3.3. Aplicação em furadeiras elétricas manuais	22
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	23
3.1. Projeto da máquina elétrica – Motor universal.....	23
3.1.1 Motor universal utilizado.....	23
3.2. Simulação dos campos magnéticos nos núcleos do motor.....	26
3.3. Fabricação do estator e montagem do motor.....	29
3.3.1 Projeto e fabricação da matriz	29
3.3.2. Fabricação do núcleo do estator	30
3.3.2.1 Compactação	30
3.3.2.2 Sinterização	31
3.3.2.3 Usinagem.....	33
3.3.3. Bobinamento e montagem do motor	33
3.4. Ensaio do motor universal em bancada.....	34
3.4.1 Medição de resistência ôhmica total.....	38
3.4.3 Ensaio a vazio.....	39
3.4.4 Ensaio e medições de variação de carga com tensão constante	40
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	44
5. CONCLUSÕES.....	46
6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXOS.....	50

ANEXO A - PROCESSOS DA METALURGIA DO PÓ PARA OBTENÇÃO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS SINTERIZADOS	50
ANEXO B - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS.....	54
ANEXO C - MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) chapas para núcleo de transformador, (b) chapas para núcleo de estator e rotor de motor elétrico.....	14
Figura 2 - Sistema de comutação de motor universal ou CC (a) e Sistema de comutação de motor de furadeira elétrica manual (b).	18
Figura 3 - Desenho (a) e foto (b) de um motor universal de 2 polos.	19
Figura 4 - Princípio de funcionamento do motor CC ou motor universal.....	19
Figura 5 - Motor CC com apenas uma bobina, o comutador e as escovas.....	21
Figura 6 - Furadeira elétrica manual.....	22
Figura 7 - Furadeira KR505.	23
Figura 8 - Motor universal montado na furadeira KR505.	24
Figura 9 - Foto do estator desmontado do motor.....	24
Figura 10 - (a) foto dos núcleos do rotor e estator e do eixo desmontados e (b) vistas em perspectiva do projeto.....	25
Figura 11 - Projeto do estator do motor universal de furadeira.	25
Figura 12 - Desenho dos núcleos do rotor e estator utilizado para simulação no software FEMM 4.2.	26
Figura 13 - Esquema de ligação série dos circuitos do rotor e do estator do motor.....	27
Figura 14 - Fluxo magnético no motor (a) com material laminado e (b) com liga Fe1%P sinterizado.	27
Figura 15 - Comparativo entre o torque das diversas ligas simuladas.	28
Figura 16 - Comparativo entre densidade de fluxo máximo das diversas ligas simuladas.	28
Figura 17 - Projeto da matriz: punção superior(a), cavidade(b) e punção inferior(c).	29
Figura 18 - Matriz para compactação do molde bruto para estator do motor universal.....	30
Figura 19 - Tarugo compactado.....	31
Figura 20 - Gráfico do processo de sinterização: 1250°C por 1h, taxa de 10°C/min.....	31
Figura 21 - Tarugo após sinterização.	32
Figura 22 - Dimensional do após sinterização.....	32
Figura 23 - Foto do núcleo do estator após usinagem.	33
Figura 24 - Foto do estator sinterizado bobinado.	34
Figura 25 - Foto da furadeira montada.	34
Figura 26 - Bancada de testes 1 para variação de tensão de entrada.	35
Figura 27 - Bancada de testes 02.	36

Figura 28 - Redução por engrenagem na furadeira.	37
Figura 29 - Foto da bancada de testes 03.....	38
Figura 30 - Gráfico rpm (amarelo) x torque (laranja) do motor original, carga aplicada 0,5, 1, 1,5, 2 e 3Nm.	42
Figura 31 - Gráfico rpm x torque do motor com estator sinterizado, carga aplicada 0,5, 1, 1,5 e 2Nm.	42
Figura 32 - Gráfico rpm x torque do motor com estator sinterizado, carga aplicada 3Nm....	42
Figura 33 - Variação de potência elétrica medida x torque e velocidade no motor original...43	
Figura 34 - Variação de potência elétrica medida x torque e velocidade no motor com estator sinterizado.....	43
Figura 35 - Dados motor elétrico de indução monofásico comercial.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo torque x densidade de fluxo máximo das ligas simuladas.....	28
Tabela 2 - Medição de resistência ôhmica total das bobinas e comutador.....	39
Tabela 3 - Ensaio de rotor bloqueado.....	39
Tabela 4 - Resultado das medições do ensaio a vazio.....	40
Tabela 5 - Ensaio e medições de variação de carga com tensão constante.	41

LISTA DE ABREVIATURAS

AWG	Escala Americana de Cabos (American Wire Gauge)
FEMM	Finite Element Method Magnetics
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica – UFRGS
M/P	Metalurgia do Pó
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	Corrente de partida / Corrente nominal	
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]
<i>p</i>	Número de polos	
rpm	Rotações por minuto	[rpm]
R	Resistência elétrica	[Ω Ohm]
N.m	Torque	[N.m]
T	Densidade de Fluxo Máximo	[T]
V	Tensão elétrica	[V]
V1	Velocidade tangencial da engrenagem menor	[rpm]
V2	Velocidade tangencial da engrenagem maior	[rpm]
μ_r	Permeabilidade relativa	[μ_r]
ρ	Resistividade elétrica	[Ω.m]

RESUMO

Este estudo identifica as vantagens do uso de um estator fabricado usando a tecnologia da metalurgia do pó, identificando suas vantagens e desvantagens. O motor elétrico utilizado é um motor do tipo universal originalmente o estator desta máquina, possui o núcleo fabricado em chapas laminadas, este foi substituído por um estator com núcleo em bloco maciço, mantendo-se as demais partes do motor originais, ou seja, nestes testes o rotor bobinado continuará a utilizar chapas laminadas e escovas originais. Motores elétricos foram desenvolvidos no início do século XIX e desde então vem sendo utilizado em larga escala com mudanças pouco significativas na sua forma construtiva, materiais e processo de fabricação. Neste trabalho o principal objetivo foi o desenvolvimento de um núcleo do estator para motor universal a partir dos processos da metalurgia do pó (M/P). Simulações com o software FEMM identificaram o comportamento de várias ligas (Fe-P, Fe-Si e Fe-Ni). Após análise dos dados da simulação foi selecionado o Fe1%P, por ter apresentado os melhores resultados para a aplicação na máquina elétrica em questão. As simulações permitiram comparações dos parâmetros eletromagnéticos e torque, entre estatores utilizando chapas de silício do motor original e estatores de núcleo maciço com dados das ligas experimentadas fabricadas através da metalurgia do pó. A fabricação destes núcleos consiste nas misturas da liga, compactação utilizando matriz para formato desejado, sinterização e acabamentos através de usinagem e eletroerosão. Foi utilizada uma furadeira manual comercial, testada em bancada para levantamento detalhado a fim de caracterizar as propriedades que definem a eficiência do equipamento com o estator original. Os mesmos testes foram conduzidos apenas substituindo o estator, agora de núcleo maciço. Processo de fabricação através da metalurgia do pó permite um menor consumo de material e energia, sendo este um processo muito mais eficiente quando comparado ao processo de fabricação das chapas laminadas de ferro silício.

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

ABSTRACT

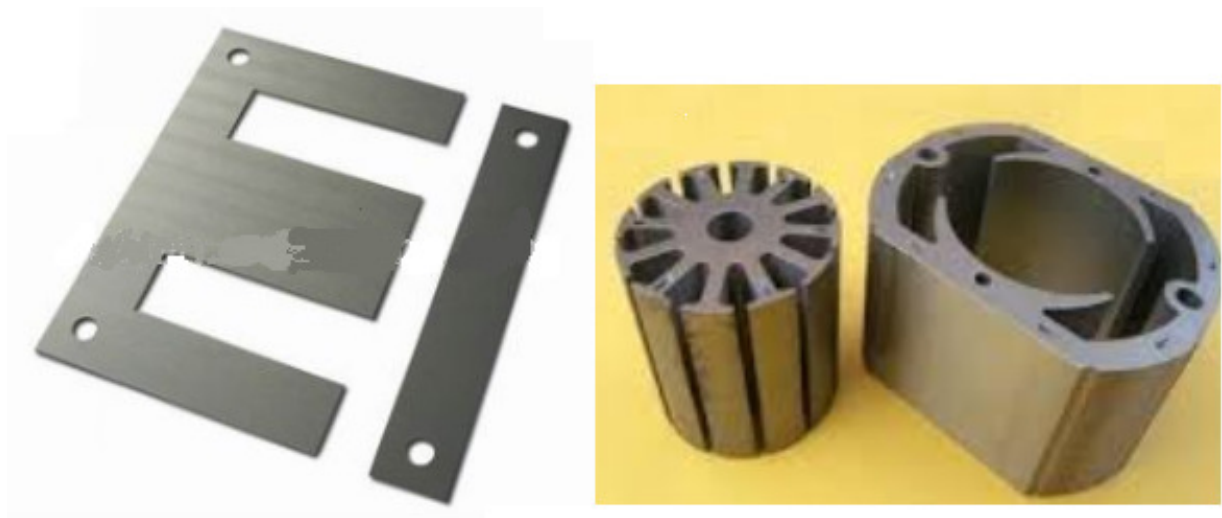
This study will identify the advantages of using a fabricated stator using the technology of powder metallurgy, identifying its advantages and disadvantages. The electric motor used is a universal type motor, originally the stator core of this machine are made of laminated plates, this was replaced by a stator core with solid block , keeping the remaining parts of the original machine, ie these tests the wound rotor continued to use rolled sheet and original brushes. Electric motors were developed in the early of 19th century, and has since been used in large scale with little significant changes in its constructive form, materials and manufacturing process. This work has as main goal the development of a stator core for universal motor from the processes of powder metallurgy (M/P). Simulations with the FEMM software identified the behavior of various alloys (Fe-P, Fe -Si and Fe-Ni) .After data analysis of the simulation was selected Fe1%P, for having presented the best results for the application in the electric machine in question. The computer simulations of electromagnetic parameters and comparisons torque between stator plates using the original silicon motor stators and solid core of data experienced alloys manufactured by powder metallurgy. The manufacture of these core constitutes mix league, using compression matrix to desired shape, sintering and finishing by machining and EDM. Trade manual drill was used, tested on bench for detailed study to characterize the properties that define the efficiency of the equipment to the original stator. The same tests were conducted just by replacing the stator, now solid core. Manufacturing process by powder metallurgy allow less consumption of material and energy, this is a much more efficient process compared to the process of manufacturing the laminated silicon iron sheets.

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

1. INTRODUÇÃO

Os núcleos magnéticos de máquinas elétricas como motores elétricos, e dispositivos eletromagnéticos como transformadores, são fabricados em sua maioria, a partir de lâminas metálicas (chapas), agrupadas em pacotes e submetidos a processo de tratamento térmico. Nestes pacotes, as chapas adjacentes são isoladas eletricamente a partir de substâncias como óxidos (PELEGRINI, 2011).

Figura 1 - (a) chapas para núcleo de transformador, (b) chapas para núcleo de estator e rotor de motor elétrico.



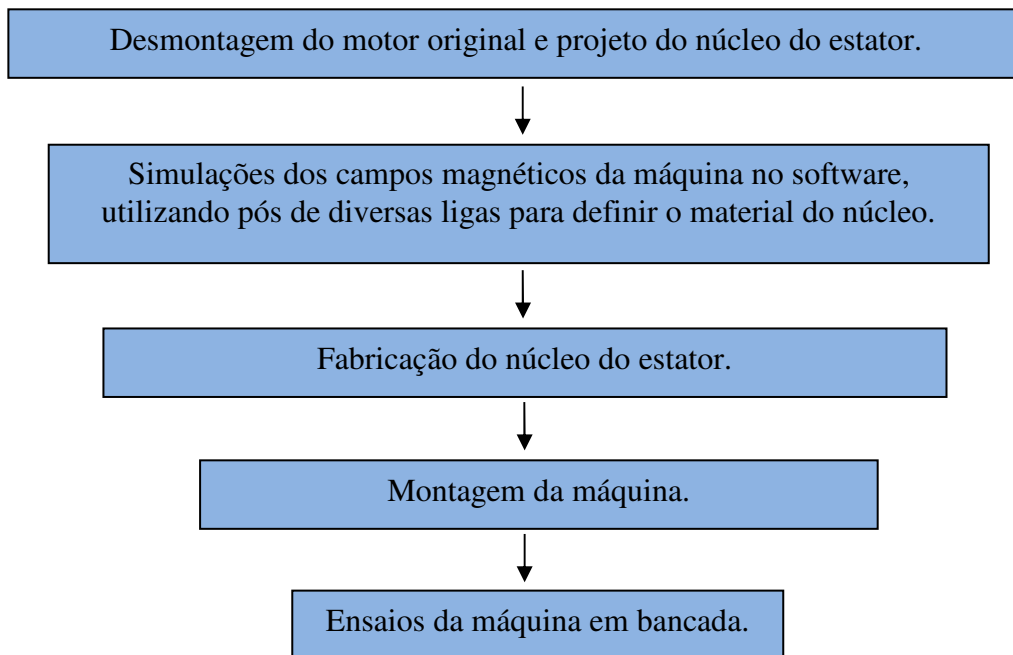
Fonte: Arquivo pessoal.

Nestes núcleos magnéticos envolvidos por bobinas ou enrolamentos, circulam correntes elétricas que geram um fluxo magnético, ficando sujeitos a ação de correntes parasitas, também conhecidas por correntes de Foucault, que são responsáveis por perda de potência nestes núcleos. A construção destes núcleos magnéticos a partir de chapas de aço isoladas eletricamente reduz parcialmente as correntes de Foucault, reduzindo assim as perdas. Contudo, utilizando-se os processos da metalurgia do pó (M/P) é possível construir estes núcleos em blocos maciços únicos, buscando elevada permeabilidade magnética (característica dos aços magnéticos) e alta resistividade elétrica, o que reduziria as correntes parasitas. Esta característica resultaria em dispositivos com maior rendimento, resultando assim em economia de energia elétrica (PELEGRINI, 2011).

Com o objetivo de estudar a viabilidade de fabricar núcleos magnéticos de máquinas elétricas rotativas utilizando M/P, este trabalho tem por objetivo a construção de um motor universal utilizando material maciço no núcleo do estator. Nas simulações utilizando o software de elementos finitos FEMM comparou-se com a chapa convencional as

características das ligas com a mistura de Fe1%, 2% e 3%P, Fe1%, 3% e 5%Si e Fe-50%Ni. Os resultados da liga Fe1%P e Fe2%P apresentaram os valores mais próximos de torque e densidade de fluxo em relação aos núcleos convencionais de chapas laminadas.

A fabricação do núcleo do estator passou por vários processos como projeto do núcleo, matriz de prensagem, sinterização e usinagem por eletro erosão. Após a bobinagem do estator e montagem no motor foram executados os ensaios na bancada de testes comparativamente com a máquina convencional, conforme diagrama abaixo. Os resultados e conclusões são apresentados no final do trabalho.



2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Magnéticos por Metalurgia do Pó

Os materiais magnéticos macios, também conhecidos como materiais magnéticos moles ou doces são aqueles materiais que facilmente são magnetizados e desmagnetizados. Tipicamente apresentam baixa coercitividade ou campo coercivo, alta permeabilidade magnética e baixa perda por histerese. Já os materiais magnéticos duros são utilizados em ímas, pois se magnetizam permanentemente (CAPUS, 2002) (GUTFLEISCH, 2011).

A produção de componentes magnéticos por metalurgia do pó, além de oferecer as vantagens típicas associadas à minimização de usinagem, permite obter características únicas de desempenho. Na produção de materiais magnéticos, como magneticamente macios para aplicações em máquinas elétricas e magneticamente duros para ímãs permanentes, tem sido empregada esta técnica. A metalurgia do pó permite que sejam obtidas peças com forma definitiva de usinagem e retificação, além de obter as propriedades magnéticas desejadas (CAPUS, 2002) (GUTFLEISCH, 2011).

O setor de metalurgia do pó vem experimentando desenvolvimento tecnológico significativo no sentido de aperfeiçoar as propriedades dos materiais e o seu desempenho em serviço, a fim de atender indústrias altamente sofisticadas como aeroespacial, eletrônica e nuclear (CAPUS, 2002) (GUTFLEISCH, 2011).

Os principais avanços incluem desde os novos processos de consolidação, as recentes técnicas para produção de pós, e superligas com propriedades superiores aquelas fabricadas pelos processos metalúrgicos tradicionais (CAPUS, 2002) (GUTFLEISCH, 2011).

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

Os materiais macios são utilizados em núcleos de máquinas elétricas, pois para que estas máquinas tenham um bom rendimento, é necessário que seus circuitos magnéticos sejam feitos em materiais com alta permeabilidade magnética e baixa perda por histerese, características dos materiais macios (BAS, 2003).

Todas as ligas que podem ser utilizadas na obtenção dos núcleos das máquinas elétricas, têm como elemento básico o ferro, com algum outro material como o silício ou fósforo. Outra opção é a liga FeNi50% que, tem como inconveniente o custo do níquel (BAS, 2003).

Na sua grande maioria, os núcleos do estator e do rotor das máquinas elétricas são construídas com chapas de aço baixo carbono. O processo para a confecção destes núcleos

consiste basicamente em laminação, corte, tratamento para isolamento, empacotamento e fixação. No caso das chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento consiste num tratamento térmico, onde os pacotes de chapas são colocados em fornos durante certo tempo, havendo então a oxidação da superfície das chapas, e em consequência, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes (BAS, 2003).

Os seguintes fatores determinam o desempenho das máquinas elétricas:

Elevada Permeabilidade Magnética: quanto maior a permeabilidade magnética das ligas, menor o campo magnético no núcleo e maior o campo no entreferro. Em uma máquina elétrica rotativa, o entreferro (espaço compreendido entre o núcleo do rotor e estator), deve apresentar o maior campo magnético possível. No caso de um motor elétrico, o conjugado eletromagnético (torque) desenvolvido na ponta de eixo pela máquina é diretamente proporcional ao fluxo magnético de entreferro;

Elevada Indução de Saturação: quanto maior a indução de saturação, maior será o fluxo de entreferro. A saturação magnética limita a indução, ou seja, aquela região da curva de histerese do material onde, mesmo com o aumento do campo magnético, a indução magnética pouco se altera;

Baixa Coercitividade: o ideal é a curva de histerese se aproximar de uma reta, ou seja, baixa coercitividade. A área da curva de histerese representa as perdas por ciclo de histerese em um dispositivo eletromagnético alimentado com corrente alternada;

Elevada Resistividade Elétrica: todo dispositivo eletromagnético alimentado com corrente alternada apresenta tensões induzidas no núcleo de ferro do dispositivo. Esta tensão induz correntes no núcleo, conhecidas por correntes parasitas ou correntes de Foucault que são responsáveis por uma apreciável perda nos núcleos destes dispositivos. Por este motivo, estes núcleos são construídos a partir de finas lâminas, isoladas eletricamente uma da outra, a fim de limitar e reduzir as correntes induzidas, diminuindo as perdas por correntes parasitas. Outra forma de atenuar os efeitos das correntes parasitas e em consequência as perdas, é desenvolver um material que, sem perder as características magnéticas, apresente alta resistividade elétrica (BAS, 2003) (RICHARDSON, 1982).

2.3. Motores universais e aplicação em furadeiras manuais

Um motor universal é um motor de série de fase única, que é capaz de funcionar tanto com corrente alternada (CA) ou corrente direta (DC) e com características semelhantes. As

principais áreas de projeto elétrico são enrolamentos de campo e armadura, comutador e escovas, sistema de arrefecimento e isolamento (JOHNSON ELECTRIC, 2014).

2.3.1 Princípio de funcionamento e aspectos construtivos dos motores universais

O motor de universal é composto de duas estruturas magnéticas:

- Rotor (enrolamento de armadura);
- Estator (enrolamento de campo ou ímã permanente).

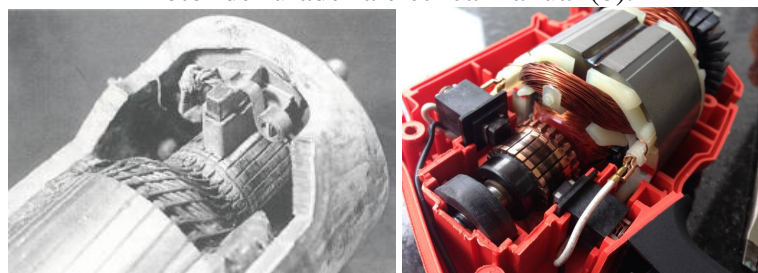
O rotor possui fiação de cobre dispostos em ranhuras longitudinais. A corrente nas bobinas de campo cria um campo magnético que, devido ao formato das peças algumas linhas de indução surgem e se encontram representadas por traços interrompidos.

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 2). 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.

Os enrolamentos do rotor compreendem bobinas de n espiras. Os dois lados de cada enrolamento são inseridos 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).

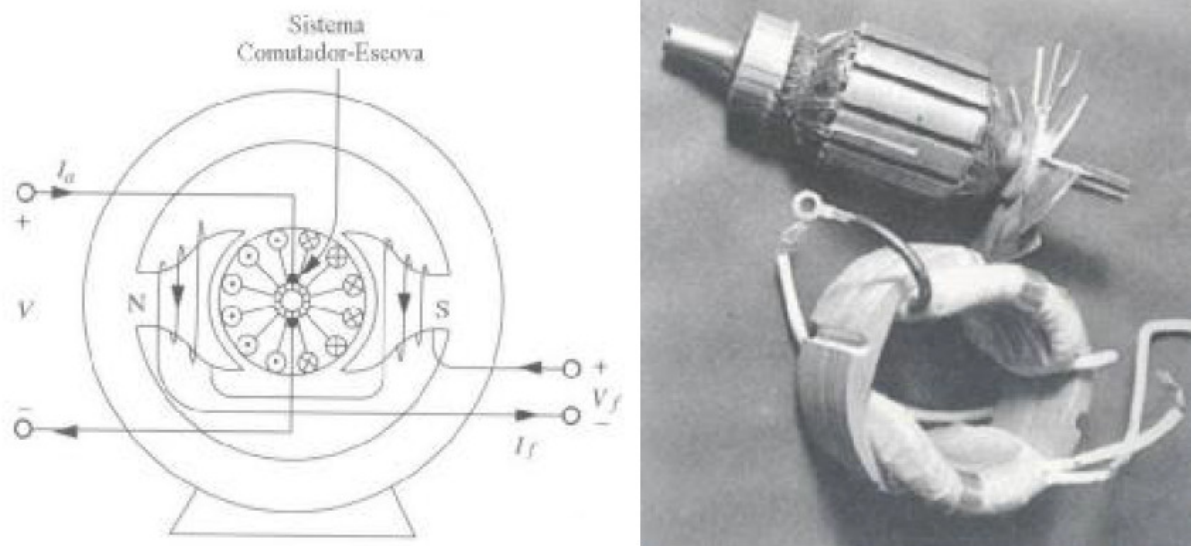
O estator é composto de uma estrutura ferromagnética com polos salientes aos quais são enroladas as bobinas que formam o campo, ou de um ímã permanente. A figura 3 mostra o desenho de um motor universal de 2 polos com enrolamento de campo.

Figura 2 - Sistema de comutação de motor universal ou CC (a) e Sistema de comutação de motor de furadeira elétrica manual (b).



Fonte: HONDA, 2006 FRAYMAN, 1998.

Figura 3 - Desenho (a) e foto (b) de um motor universal de 2 polos.

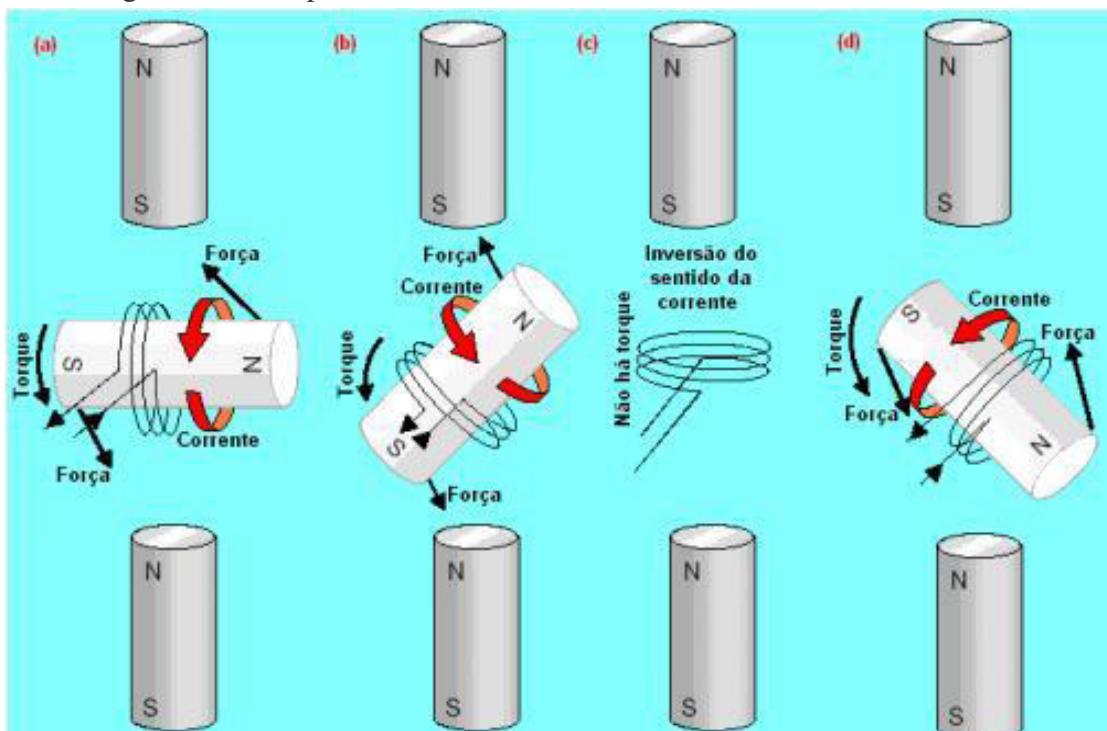


Fonte: HONDA, 2006.

Princípio de Funcionamento

A figura 4 é um desenho esquemático simples de um motor onde o estator é constituído por ímãs permanentes e o rotor é uma bobina de fio de cobre esmaltado por onde circula uma corrente elétrica. Uma vez que as correntes elétricas produzem campos magnéticos, essa bobina se comporta como um ímã permanente, com seus polos N (norte) e S (sul).

Figura 4 - Princípio de funcionamento do motor CC ou motor universal.



Fonte: HONDA, 2006.

Começamos a descrição pela situação ilustrada em (a) onde a bobina apresenta-se horizontal. Como os polos opostos se atraem, a bobina experimenta um torque que age no sentido de girar a bobina no sentido anti-horário. A bobina sofre aceleração angular e continua seu giro para a esquerda, como se ilustra em (b).

Esse torque continua até que os polos da bobina alcance os polos opostos dos ímãs fixos (estator). Nessa situação (c) – a bobina girou de 90° – não há torque algum, uma vez que os braços de alavanca são nulos (a direção das forças passa pelo centro de rotação); o rotor está em equilíbrio estável (força resultante nula e torque resultante nulo). Esse é o instante adequado para inverter o sentido da corrente na bobina. Agora os polos de mesmo nome estão muito próximos e a força de repulsão é intensa. Devido à inércia do rotor e como a bobina já apresenta um momento angular “para a esquerda”, ela continua girando no sentido anti-horário (semelhante a uma “inércia de rotação”) e o novo torque (agora propiciado por forças de repulsão), como em (d), colabora para a manutenção e aceleração do movimento de rotação.

Mesmo após a bobina ter sido girada de 180° , situação não ilustrada na figura, o movimento continua, a bobina chega na “vertical” – giro de 270° –, o torque novamente se anula, a corrente novamente inverte seu sentido, há um novo torque e a bobina chega novamente à situação (a) – giro de 360° . E o ciclo se repete.

Essas atrações e repulsões bem coordenadas é que fazem o rotor girar. A inversão do sentido da corrente (comutação), no momento oportuno, é condição indispensável para a manutenção dos torques “favoráveis”, os quais garantem o funcionamento dos motores.

A comutação consiste na mudança de uma lâmina do comutador, onde as bobinas são ligadas em série, para a próxima. Durante esta comutação a bobina é momentaneamente curto-circuitada pelas escovas, o que ajuda a liberar energia a armazenada, antes de a corrente fluir no sentido oposto. Porém, como essa inversão de corrente não é instantânea, uma força eletromotriz é induzida na espira, o que origina uma corrente de curto-circuito que circula no coletor, nas espiras e nas escovas. Após o curto-circuito, a interrupção dessa corrente dá origem ao aparecimento de faíscas nos contatos das escovas com o coletor, que podem gerar arcos elétricos perigosos e que danificam o coletor, tendo, portanto que ser eliminadas.

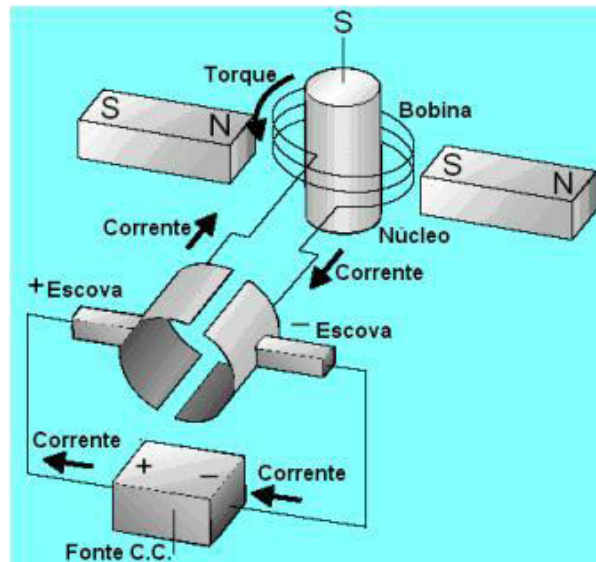
A fim de eliminar as faíscas, torna-se necessário induzir na espira, durante o curto-circuito, uma força eletromotriz que anule a resultante do processo de comutação, conseguido através dos polos de comutação, de menores dimensões e situados sobre a linha neutra e percorridos pela mesma corrente do rotor. No entanto estes polos, além de anularem o fenômeno da comutação, enfraquecem o fluxo do estator – fenômeno chamado de “reação

magnética do rotor”. Nas máquinas de grandes dimensões esse fenômeno é eliminado através dos enrolamentos de compensação que, ligados em série com o rotor e colocados na periferia dos polos do estator, geram um fluxo com a mesma intensidade e sentido contrário do fluxo de reação, anulando-o.

A figura 5 mostra um desenho esquemático bastante simplificado de um motor CC com apenas uma bobina, o comutador e as escovas.

Em sua forma mais simples, o comutador apresenta duas placas de cobre encurvadas e fixadas (isoladamente) no eixo do rotor; os terminais do enrolamento da bobina são soldados nessas placas. A corrente elétrica “chega” por uma das escovas (+), “entra” pela placa do comutador, “passa” pela bobina do rotor, “sai” pela outra placa do comutador e “retorna” à fonte pela outra escova (-).

Figura 5 - Motor CC com apenas uma bobina, o comutador e as escovas.



Fonte: HONDA, 2006.

Nessa etapa o rotor realiza sua primeira meia-volta. Nessa meia-volta, as placas do comutador trocam seus contatos com as escovas e a corrente inverte seu sentido de percurso na bobina do rotor. E o motor CC continua girando, sempre com o mesmo sentido de rotação.

O funcionamento de todo motor elétrico universal, independente da maneira como são ligados o rotor e as bobinas de campo (estator), se dá por corrente contínua. Assim surge a analogia entre bobinas de corrente contínua e ímãs permanentes. Na prática, é habitual falar-se de polos norte e sul de uma bobina. Todavia, vale esclarecer que tal afirmação é figurada, pois de acordo com o eletromagnetismo uma bobina não pode ter polos. Há apenas a simulação da existência de polos em função de uma grande concentração das linhas de campo que fazem com que nas extremidades os efeitos magnéticos se intensifiquem (assim como

para os ímãs). Em termos de correntes elétricas a analogia com os ímãs acontece na medida em que o campo magnético gerado por eles se deve à existência dessas correntes no interior do material magnético, associadas aos movimentos dos eletros dos átomos cujo efeito global equivale a uma corrente sobre a superfície do material que constitui o ímã, permitindo-se pensar que o campo magnético do ímã é produzido por essa corrente em sua superfície. Logo, nesse sentido, o ímã é análogo a bobina, pois ambos geram campos magnéticos devido a correntes elétricas.

Para a interação entre as bobinas nas quais circulam correntes elétricas, e em particular para o caso do motor universal, isso não se deve, conceitualmente, à ação do campo magnético de uma delas sobre o campo da outra. Em termos de princípios físicos, tais campos somente mediam a interação entre correntes. Tal interação pode ser melhor compreendida se: primeiro pensarmos que a corrente de uma das bobinas cria um campo magnético, e, segundo, que a corrente magnética da outra é capaz de sentir o campo criado pela primeira. Assim, a interação bobina-bobina pode ser entendida como uma interação corrente-corrente. Dentro de uma visão clássica, campos magnéticos, como qualquer campo, se somam vetorialmente, de forma a sobreporem originando um campo final. Um campo não repele nem atrai outro campo, mas se superpõem compondo um campo resultante. Assim, forças são produzidas devido à ação de campos sobre partículas ou correntes, como no caso estudado (HONDA, 2006).

2.3.3. Aplicação em furadeiras elétricas manuais

Os Motores Universais são adequados para aplicações que exigem grande torque de partida, partida frequente e alta velocidade. Os Motores Universais funcionam geralmente em altas velocidades e, portanto, são muito úteis para aplicações como liquidificadores, aspiradores de pó e secadores de cabelo. Eles também são normalmente usados em ferramentas elétricas como furadeiras, serras e lixadeiras (JOHNSON ELECTRIC, 2014). A figura 6 ilustra uma furadeira elétrica manual comercial.

Figura 6 - Furadeira elétrica manual.



Fonte: BOSCH, 2014.

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Projeto da máquina elétrica – Motor universal

Optou-se por utilizar como base um motor elétrico comercial, ao invés de projetar um novo tendo em vista que o objetivo é avaliar o desempenho dos materiais obtidos por M/P comparativamente ao convencional

3.1.1 Motor universal utilizado

Para viabilizar o custo do projeto e aproveitar a estrutura do LDTM como a prensa, o motor selecionado deveria atender a determinados requisitos dimensionais e construtivos, foi optado por um motor de furadeira elétrica modelo KR505, figura 7.

Figura 7 - Furadeira KR505.



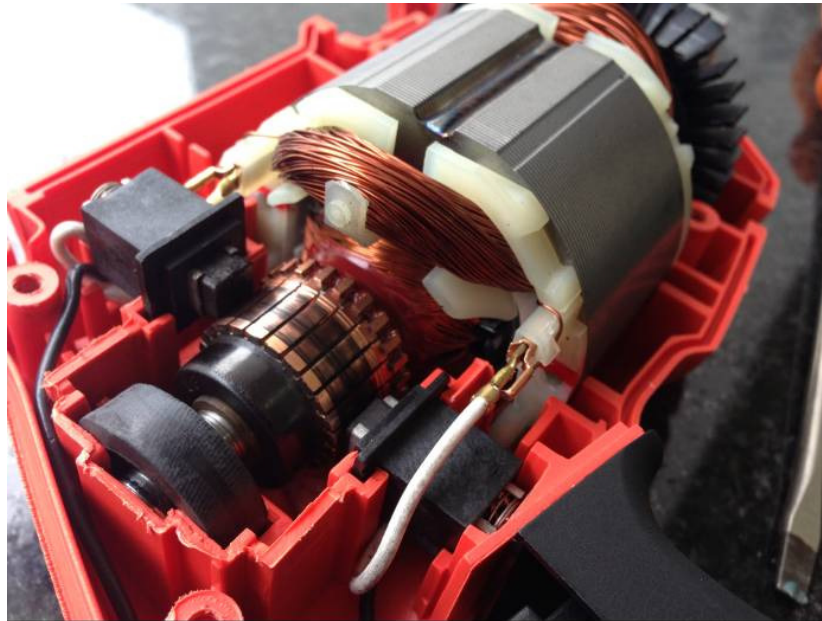
Fonte: BLACK & DECKER, 2013.

Características técnicas de interesse informadas pelo fabricante:

- Tensão nominal: 220Vca;
- Potência de entrada de energia: 480W;
- Rotação mínima sem carga: 2800rpm (BLACK & DECKER, 2014).

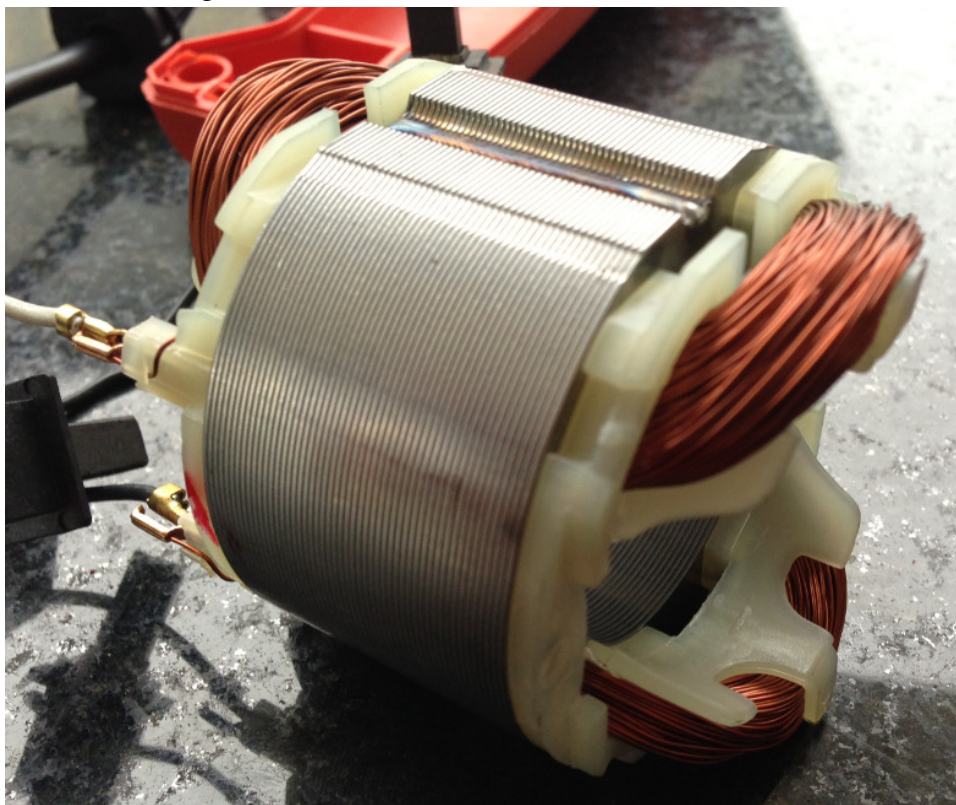
A furadeira foi desmontada para extrair as dimensões do projeto mecânico, contagem do número de espiras e medição da bitola do fio do bobinamento do estator e do rotor. O motor original fixado no corpo da furadeira pode ser visto na figura 8 e na figura 9 o estator fora da estrutura do motor.

Figura 8 - Motor universal montado na furadeira KR505.



Fonte: Arquivo pessoal.

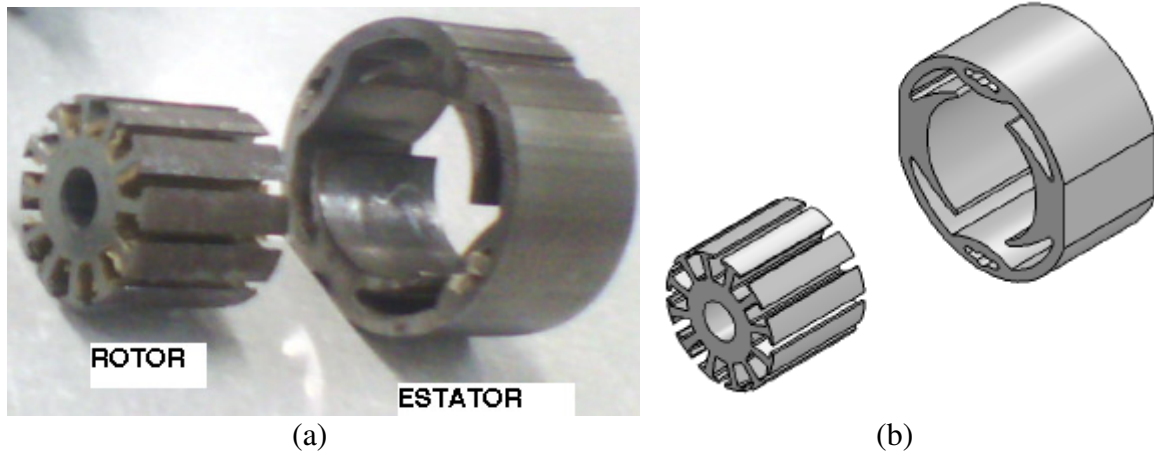
Figura 9 - Foto do estator desmontado do motor.



Fonte: Arquivo pessoal.

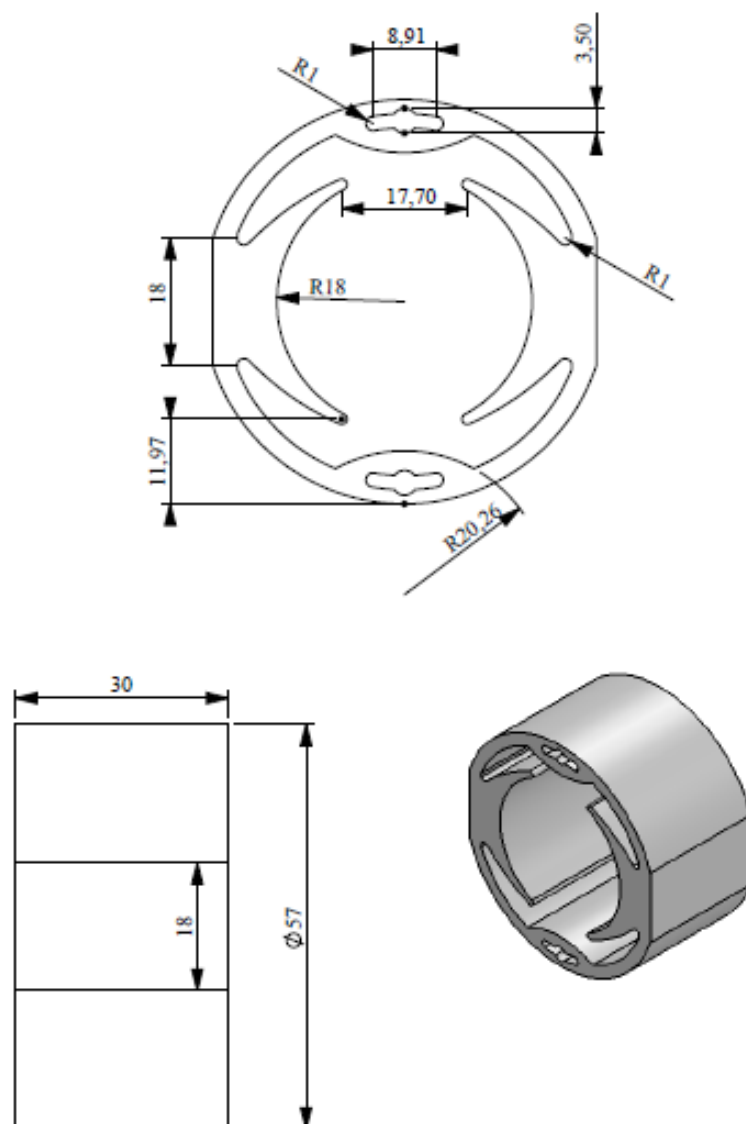
Foram retiradas as bobinas para medição das ranhuras, conforme pode ser visto na figura 10 que serviu como base para o projeto da figura 11.

Figura 10 - (a) foto dos núcleos do rotor e estator e do eixo desmontados e (b) vistas em perspectiva do projeto.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 11 - Projeto do estator do motor universal de furadeira.



Fonte: Arquivo pessoal.

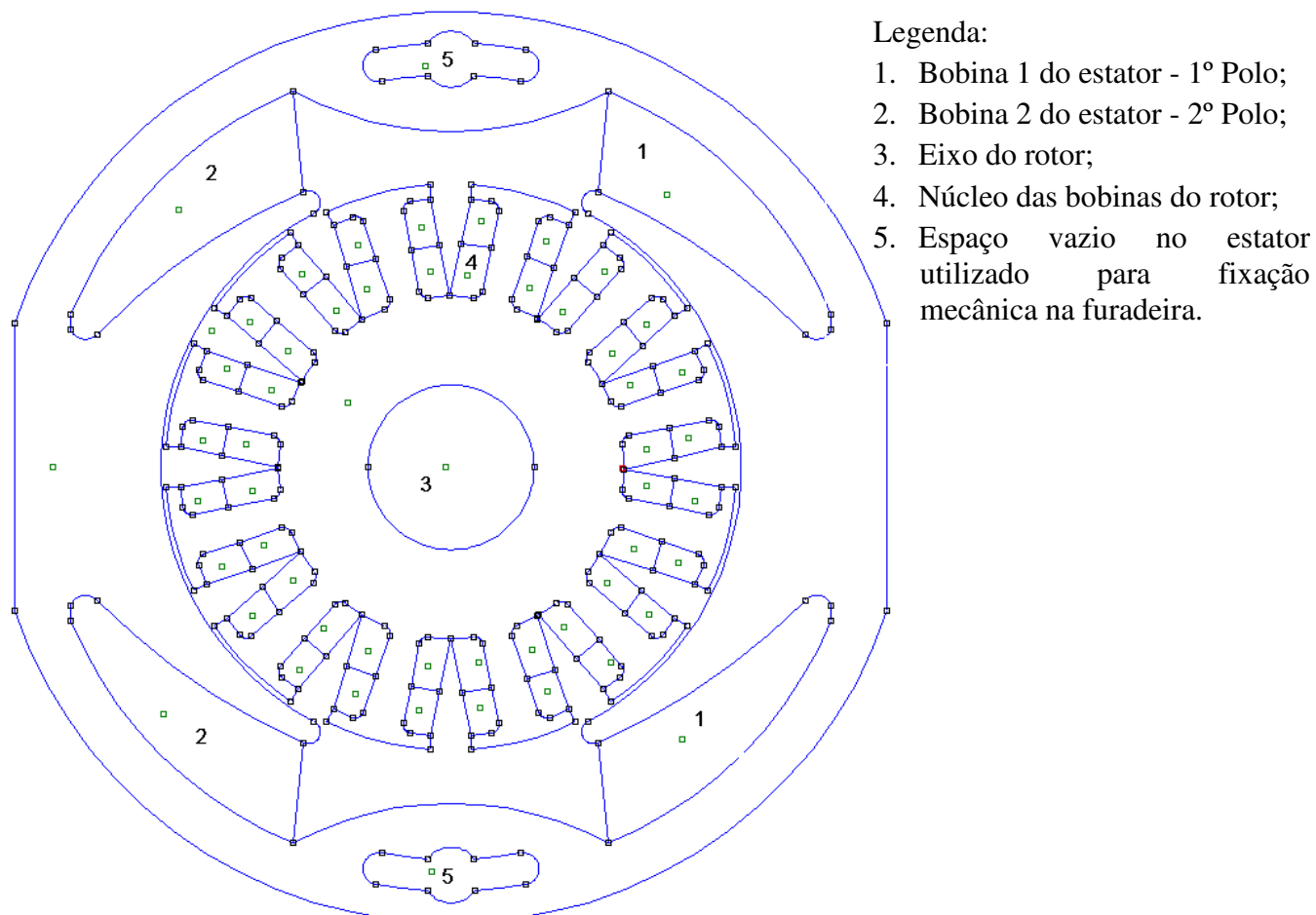
3.2. Simulação dos campos magnéticos nos núcleos do motor

As simulações dos campos magnéticos variando-se as diversas ligas foram realizadas a partir do projeto dimensional do motor, utilizando o software FEMM versão 4.2 com os seguintes parâmetros do motor padrão:

- Rotor: Fio 30 AWG 32 espiras, passe 6;
- Estator: Fio 26 AWG 192 espiras;
- Corrente nominal 2,18A.

O desenho dos núcleos do rotor e estator utilizado no software, com as medidas extraídas do motor padrão estão na figura 12.

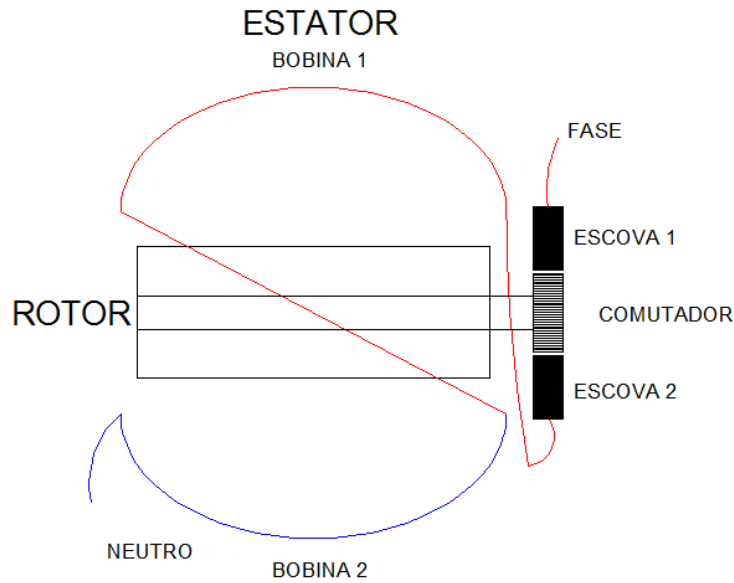
Figura 12 - Desenho dos núcleos do rotor e estator utilizado para simulação no software FEMM 4.2.



Fonte: Arquivo pessoal.

As ligações das bobinas são em série, conforme figura 13.

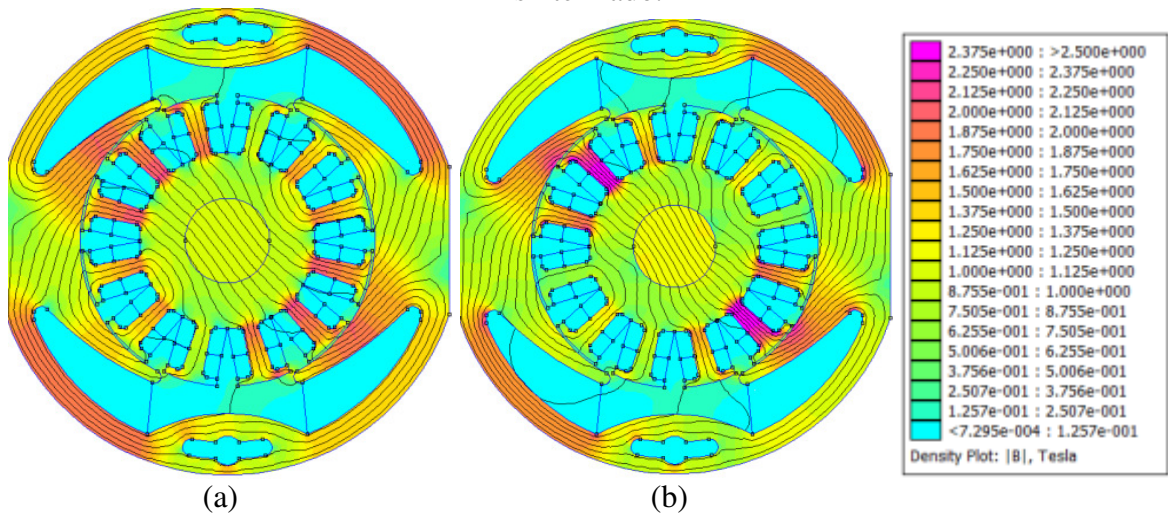
Figura 13 - Esquema de ligação série dos circuitos do rotor e do estator do motor.



Fonte: Arquivo pessoal.

Os resultados obtidos nas simulações para as linhas de fluxo magnético nos núcleos do rotor e do estator do motor são mostrados na figura 14.

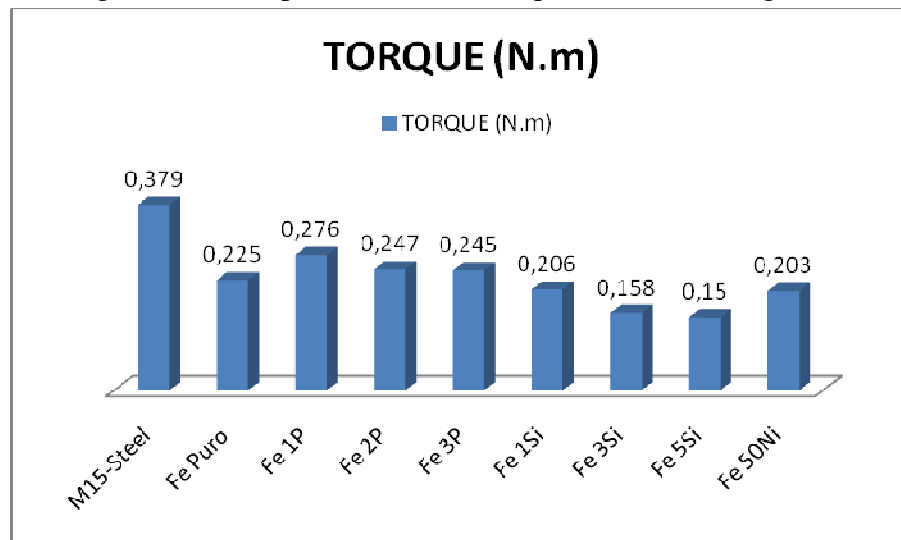
Figura 14 - Fluxo magnético no motor (a) com material laminado e (b) com liga Fe1%P sinterizado.



Fonte: Arquivo pessoal.

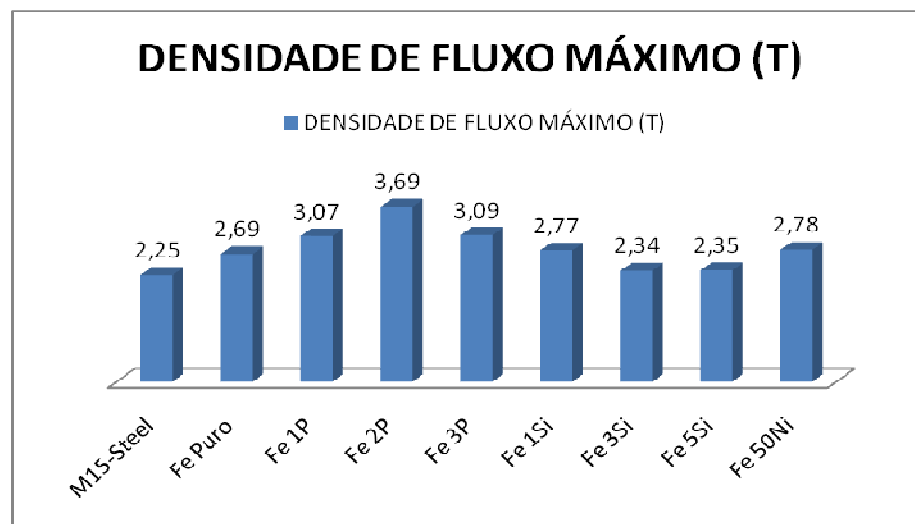
Os resultados obtidos nas simulações de torque geram valores instantâneos e estáticos que variam de acordo com a posição em que se encontra o alinhamento angular entre rotor e o estator. Os valores da tabela 1 e dos gráficos das figuras 15 e 16 são os máximos obtidos nos diversos alinhamentos simulados.

Figura 15 - Comparativo entre o torque das diversas ligas simuladas.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 16 - Comparativo entre densidade de fluxo máximo das diversas ligas simuladas.



Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 1 - Comparativo torque x densidade de fluxo máximo das ligas simuladas.

Material do 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, 2012.

Conforme simulações, comparativamente ao núcleo de chapas, a liga Fe1%P apresentou maior torque e sua densidade de fluxo máximo foi a terceira mais alta, ficando próxima ao segundo lugar que foi a liga FE3%P. Considerando o custo envolvido na fabricação do protótipo, a usinagem por eletroerosão nesta liga ficaria inferior a ligas com maior concentração de fósforo, pois sua dureza é menor (detalhes no anexo B), desta forma esta foi a liga selecionada.

3.3. Fabricação do estator e montagem do motor

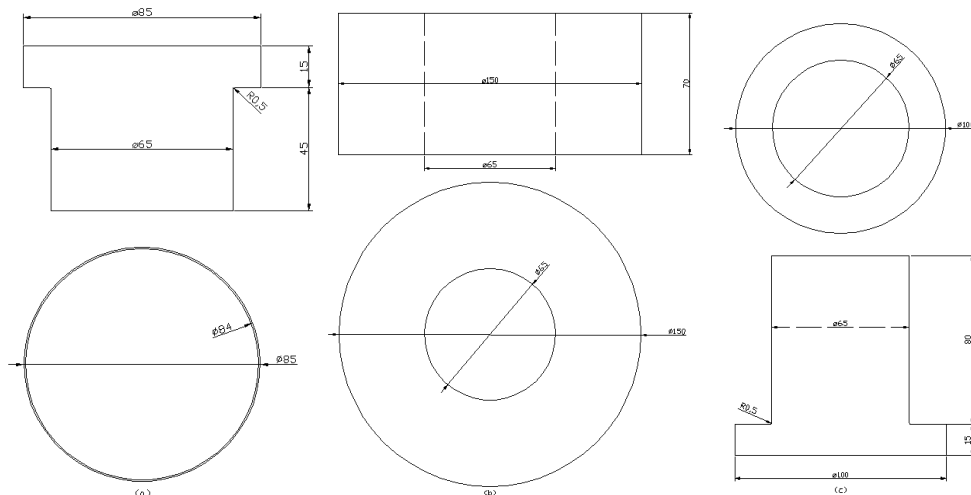
Para a fabricação do estator é necessário utilizar uma matriz para compactação do pó e o processo de sinterização para obtenção de um tarugo cilíndrico bruto, facilitando o processo final de usinagem para dar a forma desejada. A montagem do motor consiste basicamente em bobinagem do estator e ensaio de funcionamento.

3.3.1 Projeto e fabricação da matriz

A matriz para obtenção do tarugo em forma cilíndrica foi projetada e fabricada com uma cavidade central, de forma que o tarugo seja facilmente expelido ao final do processo de prensagem. O formato cilíndrico maciço foi a solução mais viável em se tratando de um protótipo, haja vista a complexidade e custo envolvido em fabricar uma matriz específica que permitisse a formação da peça no formato final. O projeto dimensional da matriz utilizada para compactação está representado figura 17 e a foto com a matriz acabada na figura 18.

A partir de cortes de tarugos de aço ABNT 1045 usinados e retificados obtêm-se a matriz da figura 18. A escolha do aço deve-se as suas características de excelente resistência mecânica e a fratura, superior à média dos demais aços de baixo carbono

Figura 17 - Projeto da matriz: punção superior(a), cavidade(b) e punção inferior(c).



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 18 - Matriz para compactação do molde bruto para estator do motor universal.



Fonte: Arquivo pessoal.

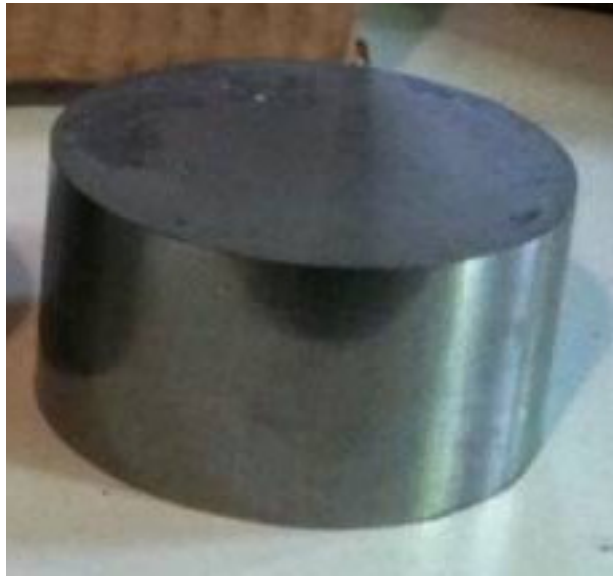
3.3.2. Fabricação do núcleo do estator

A fabricação do núcleo do estator consiste no processo de compactação do pó, seguido pelo processo de sinterização e por fim a usinagem, necessária porque a matriz não foi projetada para o formato desejado. Devido a dureza do material e a precisão na peça final foi optado pelo processo de usinagem por eletroerosão, um processo de usinagem especial, onde o arranque de material, não é obtido pelo contato mecânico entre uma ferramenta de corte e a peça de trabalho, mas sim pela ação de descargas de capacitores elétricos, essas descargas são dadas em diversos pontos de um eletrodo, que progressivamente formam uma cavidade idêntica ao eletrodo, porém de forma negativa. Geralmente as ferramentas utilizadas (eletrodos) são de materiais condutores como o cobre ou grafite previamente usinada no formato desejado.

3.3.2.1 Compactação

O processo de compactação do pó foi realizado na prensa hidráulica manual do LDTM, com pressão aplicada de 600 MPa. Devido ao formato das matrizes, o formato final de peça é em forma de tarugo, conforme figura 19.

Figura 19 - Tarugo compactado.

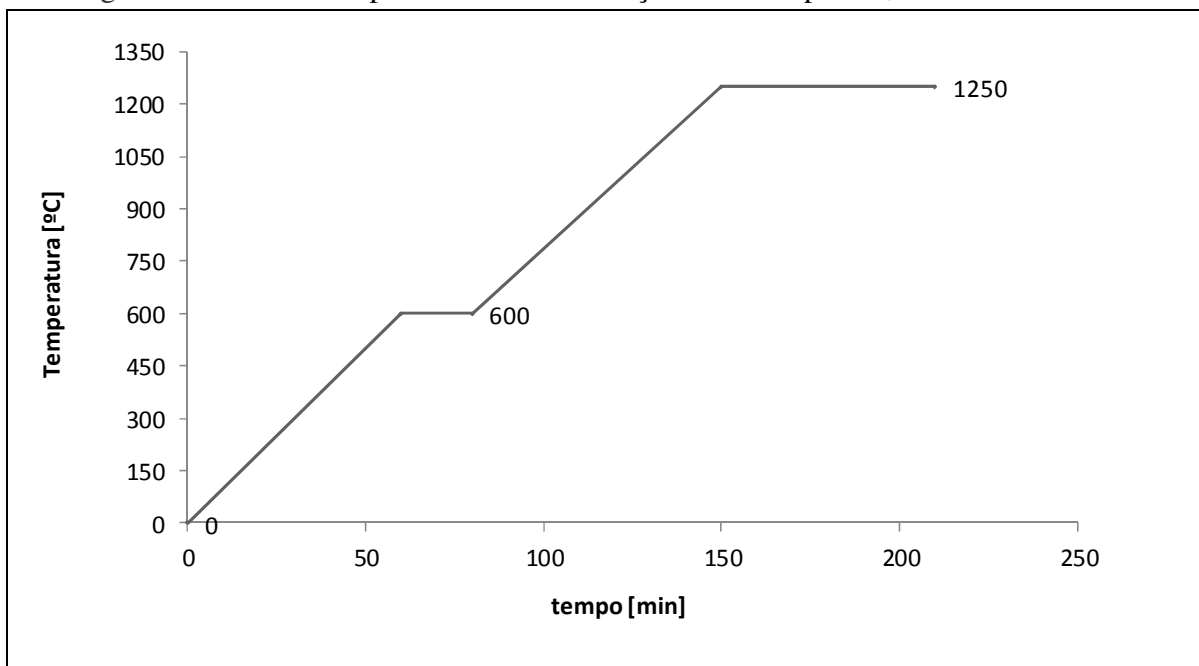


Fonte: Arquivo pessoal.

3.3.2.2 Sinterização

Os tarugos compactados foram sinterizados em um forno mufla, com atmosfera controlada com gás marrom composto por 75% nitrogênio e 25% hidrogênio. O resfriamento do material sinterizado deu-se no próprio forno de forma natural. O gráfico da figura 20 relaciona a variação da temperatura do interior do forno em função do tempo.

Figura 20 - Gráfico do processo de sinterização: 1250°C por 1h, taxa de 10°C/min.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 21 - Tarugo após sinterização.

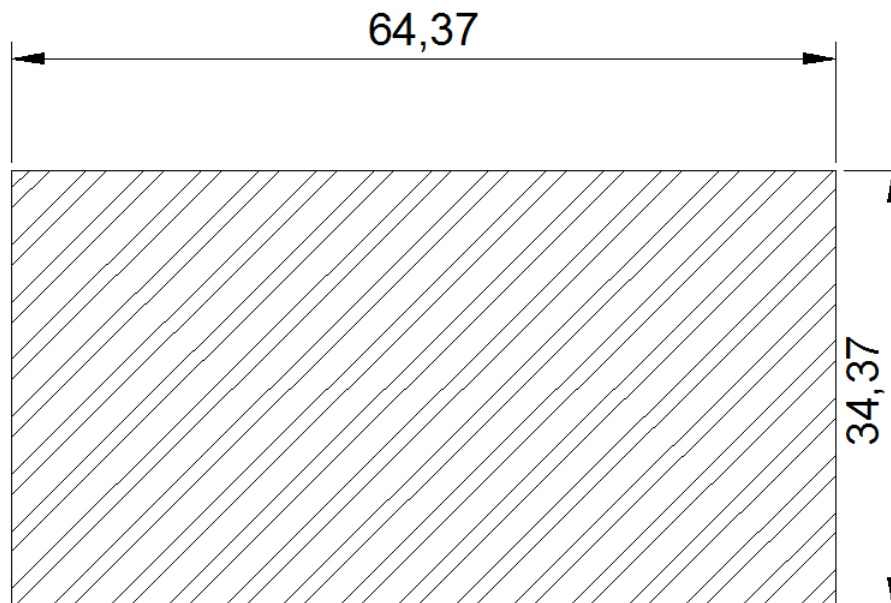


Fonte: Arquivo pessoal.

Para obter a densidade do tarugo sinterizado da figura 21 foram medidas suas dimensões com paquímetro de precisão 0.01mm, fabricante Mitutoyo e peso com uma balança de precisão marca Marte (modelo AL 500). As dimensões após sinterização estão na figura 22.

- h (altura) = 34,35mm
- d (diâmetro) = 64,37mm
- g (peso) = 680g

Figura 22 - Dimensional do após sinterização.



Fonte: Arquivo pessoal.

Densidade calculada dos tarugos sinterizados:

$$A = \pi r^2 = 3,1415 \times 3,2185^2 = 32,65 \text{ cm}^3$$

$$V = A \times h = 3,435 \times 32,65 = 112,153 \text{ cm}^3$$

$$d = \frac{m}{V} = \frac{680}{112,153} = 6,07 \text{ g / cm}^3$$

- A = área [cm²];
- d = densidade [g/cm³];
- m = massa [g];
- V = volume [cm³].

3.3.2.3 Usinagem

O processo de usinagem do núcleo do estator a partir do tarugo foi feito pelo processo de eletroerosão, a foto do núcleo do estator após usinagem é mostrado na figura 23. Optou-se pelo processo de usinagem por eletroerosão por ser o mais adequado devido a dureza do material e a precisão de detalhes desejada.

Figura 23 - Foto do núcleo do estator após usinagem.



Fonte: Arquivo pessoal.

3.3.3. Bobinamento e montagem do motor

O processo de bobinamento e montagem consiste em:

- 1) Confecção das bobinas, com bitola de fio e número de espiras obtidos do motor original;
- 2) Fixação do material isolante (filme de poliéster) nas ranhuras do estator;
- 3) Colocação das bobinas nas ranhuras;
- 4) Aplicação de verniz isolante e fixador sobre as bobinas no núcleo. Posteriormente colocado em uma estufa com temperatura controlada para secar;
- 5) Medições de continuidade e isolamento entre bobinas e entre bobinas-estator.

O resultado final pode ser visualizado na figura 24.

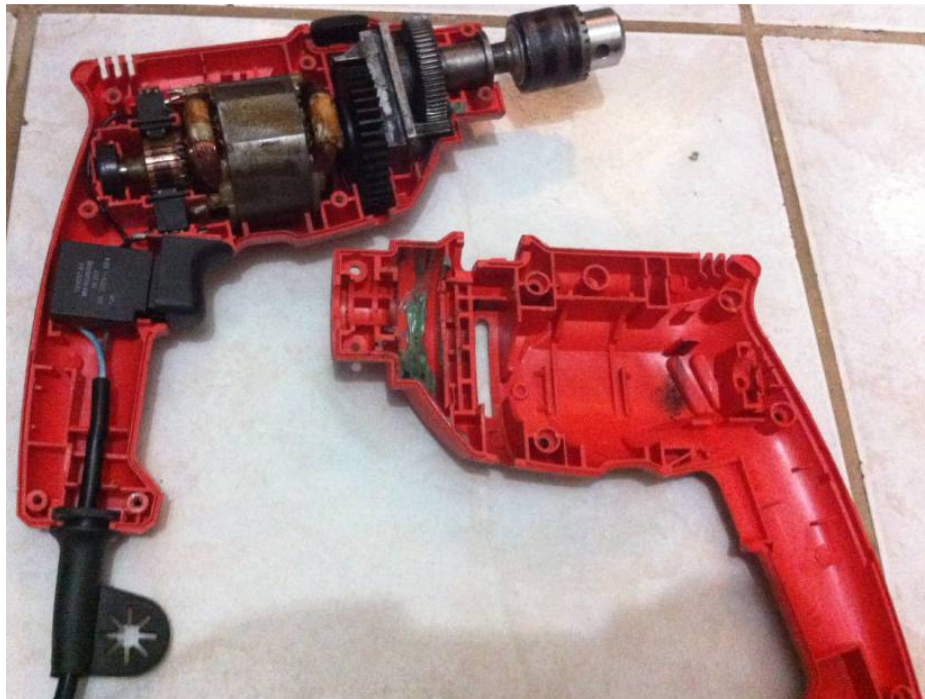
Figura 24 - Foto do estator sinterizado bobinado.



Fonte: Arquivo pessoal.

Conforme pode ser verificado na figura 25, o estator foi montado juntamente com os demais componentes como redução, comando manual, rolamentos e escovas na carcaça original da furadeira.

Figura 25 - Foto da furadeira montada.



Fonte: Arquivo pessoal.

3.4. Ensaio do motor universal em bancada

Para a execução dos ensaios do motor universal foram utilizadas duas bancadas de testes, a primeira para variação de tensão a vazio no laboratório de máquinas elétricas da

SATC e a segunda bancada para medição de grandezas elétricas, ensaio de rotor bloqueado, variação de carga com tensão constante e medição de resistência na empresa Wolfer Automação.

Visando mensurar diferenças de desempenho influenciadas pela fabricação do motor: em fábrica e em oficina de rebobinagem, que devido aos processos pode apresentar variações no acabamento, bitola do fio, alinhamento dos componentes entre outros, os ensaios foram realizados em 3 motores distintos: motor com núcleo do estator produzidos pela M/P, motor original em furadeira lacrada de fábrica e motor com estator de núcleo de chapas rebobinado nas mesmas condições do motor em estudo.

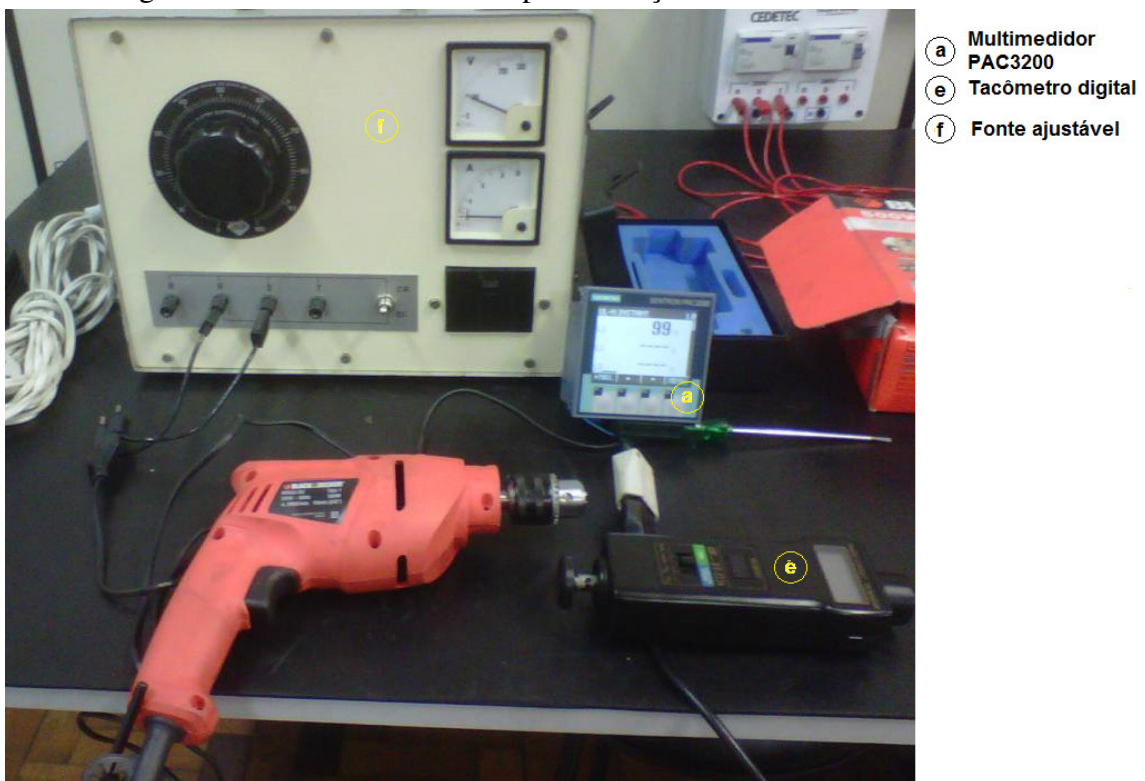
Foram adaptadas duas bancadas de testes:

Bancada 01 – Utilizada para variação de tensão de entrada com o motor a vazio, composta pelos seguintes equipamentos principais:

1. Medição de grandezas elétricas: potência, corrente, fator de potência: Multimetro de energia modelo PAC3200;
2. Medição de rotação: tacômetro digital;
3. Variação de tensão: fonte ajustável de 0-250VAC, corrente máxima 10A.

A bancada montada pode ser vista na figura 26.

Figura 26 - Bancada de testes 1 para variação de tensão de entrada.



- (a) Multimetro de energia modelo PAC3200
- (e) Tacômetro digital
- (f) Fonte ajustável

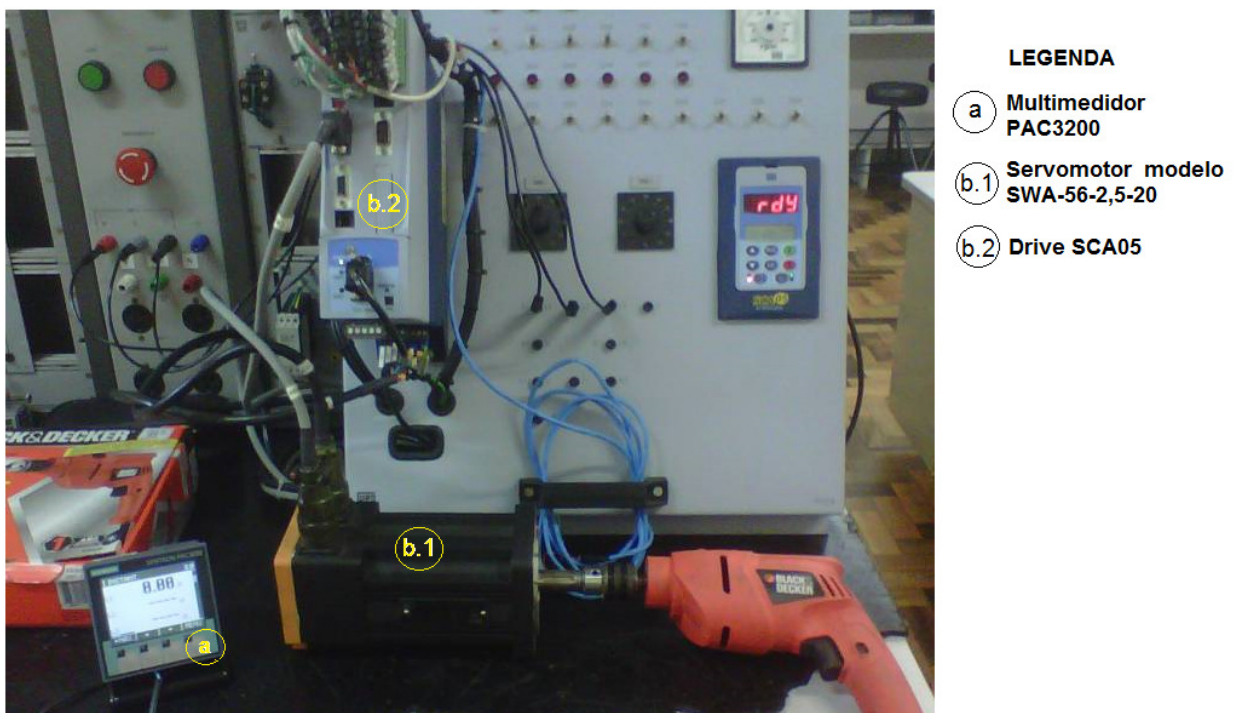
Fonte: Arquivo pessoal.

Bancada 02 – Ensaio de variação de carga com tensão constante

Nesta bancada foi simulado torque estático de 0 a 7Nm na ponta do eixo da furadeira e mensurados corrente, potência, fator de potência, rotação, temperatura entre outras grandezas que serão resumidas a seguir. A bancada 2 pode ser visualizada na figura 27, os equipamentos utilizados foram:

1. Servomotor modelo 1LA7: Potência nominal 3,75Kw, Rotação nominal=1720 rpm, tensão nominal 380V em conjunto com um servodrive eletrônico modelo S110 6SL3210-1SE16-0UA0, para motores trifásicos de potência até 2,2Kw em 380V, $I_n=5,9A$ do fabricante SIEMENS. A resolução de velocidade é 1rpm e de torque 5%;
2. Para medição de resistência ôhmica foi utilizado multímetro digital do fabricante Fluke modelo 117, com precisão de 0,9% de fundo de escala.

Figura 27 - Bancada de testes 02.



Fonte: Arquivo pessoal.

A rotação medida nas bancadas 01 e 02 foi diretamente no mandril da furadeira, para não comprometer a estrutura de fixação dos motores, pois era difícil o acesso direto ao eixo do rotor. Considerando que é utilizada uma redução por engrenagens para reduzir a rotação e aumentar o torque disponível, para calcular a rotação na ponta do eixo do rotor, ou seja, antes do mandril da furadeira, é utilizada uma a engrenagem de maior diâmetro no mandril com 62

dentes, e acoplada na ponta do eixo do motor uma menor com 6 dentes, ficando a relação de redução em 10,33:1, conforme figura 28.

Figura 28 - Redução por engrenagem na furadeira.



Fonte: Arquivo pessoal.

Para calcular velocidade do rotor do motor foi utilizada a equação:

$$V1/V2 = n2/n1$$

Em que:

- V1 é a velocidade tangencial da engrenagem menor (rotor);
- V2 é a velocidade tangencial da engrenagem maior (mandril);
- n1 é o número de dentes da engrenagem menor (rotor);
- n2 é o número de dentes da engrenagem maior (mandril);

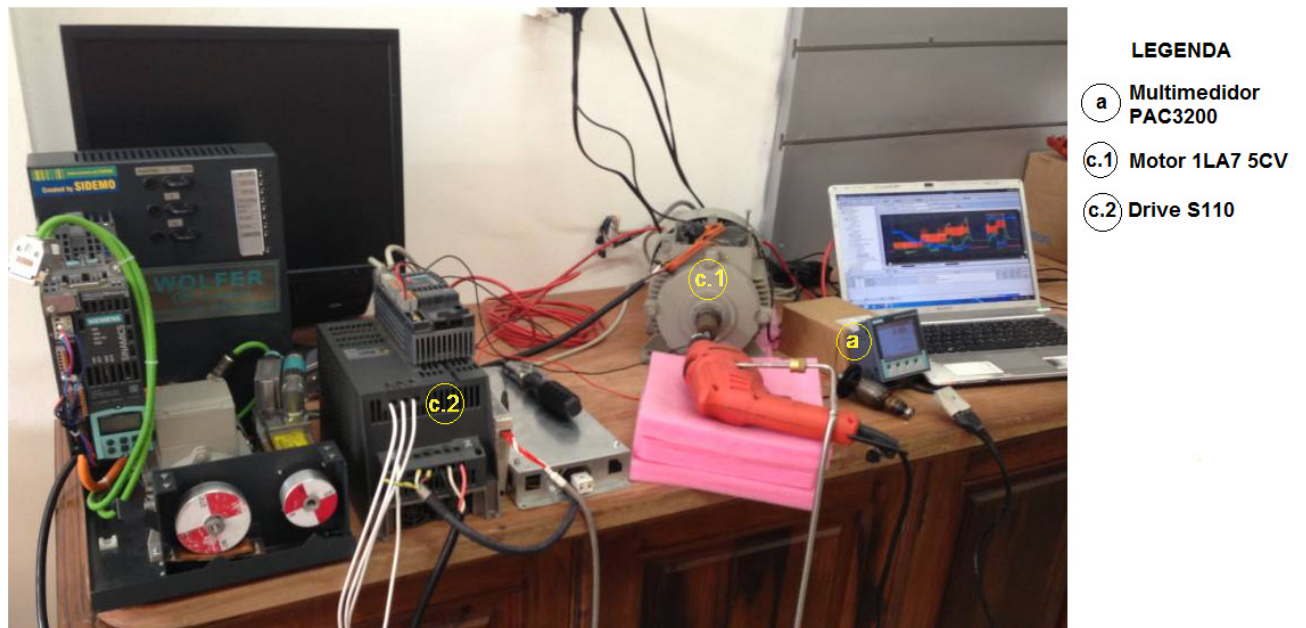
Para o cálculo do torque foi utilizada a mesma equação, substituindo-se V1 e V2 por M1 e M2, onde M é o torque aplicado.

Conforme literatura considera-se uma perda de rendimento na ordem de 3% por par de engrenagens, neste caso 1 par e de 2% por mancal de rolamento, neste caso 2 mancais, somando uma perda total no conjunto de engrenagens de 7%.

Na bancada 3 da figura 29 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.

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).

Figura 29 - Foto da bancada de testes 03.

**LEGENDA**

- a Multimímetro PAC3200
- c.1 Motor 1LA7 5CV
- c.2 Drive S110

Fonte: Arquivo pessoal.

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 40°C.
02	Ensaio de rotor bloqueado	O rotor é bloqueado e é aplicada tensão nominal. A corrente é medida após 3 segundos, a fim de proteger o motor contra o superaquecimento 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 total

A medição de resistência ôhmica é necessária para comparar a resistência do bobinamento e demais componentes do circuito elétrico dos motores como comutador e escovas. Variações na resistência implicam em alterações no torque, potência e demais parâmetros e podem indicar bitola de fio ou quantidade de espiras diferente.

Considerando que a ligação do circuito do motor universal é em série, a medição de resistência foi executada considerando a resistência total do conjunto. Os resultados das medições estão na tabela 2. No motor com estator de núcleo sinterizado a resistência total foi de $13,92\Omega$ e no motor com estator convencional rebobinado $14,01\Omega$, ficando a uma diferença de $0,64\%$, que está dentro da faixa de precisão do multímetro. Em relação ao motor original a diferença foi de $5,94\%$, o que possivelmente foi influenciada por variação na pureza do cobre e/ou bitola do fio utilizado pelo fabricante da furadeira e pela empresa que rebobinou o estator.

Tabela 2 - Medição de resistência ôhmica total das bobinas e comutador.

Motor	Resistência (Ω)
Motor original	14,8
Motor rebobinado	14,01
Estator sinterizado	13,92

Fonte: Arquivo Pessoal.

3.4.2 Ensaio de rotor bloqueado

O objetivo do ensaio de rotor bloqueado é servir de base para avaliar a corrente de partida. Conforme resultados das medições apresentados na tabela 3, a corrente de rotor bloqueado apresentou diferença de 7% entre os motores avaliados, considerando q a corrente nominal a mesma para todos de $2,18A$.

Tabela 3 - Ensaio de rotor bloqueado.

Motor	Tensão (V)	Corrente de Rotor Bloqueado (A)	I_p/I_n
Motor original	225	5,7	2,6
Motor rebobinado	225	6,15	2,8
Estator sinterizado	225	5,98	2,7

Fonte: Arquivo Pessoal.

3.4.3 Ensaio a vazio

O ensaio a vazio consiste em variar a tensão de entrada e medir a variação da rotação, corrente e potência elétrica consumida. O objetivo deste ensaio é analisar a linearidade da rotação em função das demais variáveis.

Conforme as medições da tabela 4, até $150V$ a variação de rotação é expressiva, e acima disto a variação diminui. Isto pode ser explicado pelo fato de que ao atingir o torque necessário a rotação nominal do rotor, a velocidade aumenta pouco, uma vez que o motor está

sem carga. Em relação a corrente, no motor com estator sinterizado apresentou pequena variação ficando ligeiramente acima dos demais motores, e o fator de potência um pouco melhor, ficando entre 0,98 e 0,99, ante a média de 0,95 dos demais motores.

Tabela 4 - Resultado das medições do ensaio a vazio.

Motor	Tensão (V)	Rotação no mandril (rpm)	Rotação no 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
Estator sinterizado	100	1047	10816	1,2	111	126	0,98
	110	1089	11249	1,28	132	144	0,98
	150	1974	20391	1,49	205	227	0,98
	200	1990	20557	1,75	339	361	0,99
	220	2081	21497	1,91	422	445	0,99
	250	2180	22519	2,03	480	511	0,99

Fonte: Arquivo Pessoal.

3.4.4 Ensaio e medições de variação de carga com tensão constante

A partir da tensão nominal dos motores de 220V foi variada a carga aplicada ao eixo dos motores em teste e medidas as seguintes grandezas: rotação, corrente, potência aparente, fator de potência, escorregamento, variação de temperatura, entre outras conforme tabela 5.

Os gráficos das figuras 30, 31 e 32 mostram as variações de rotação, potência consumida e temperatura do estator de acordo com a carga aplicada.

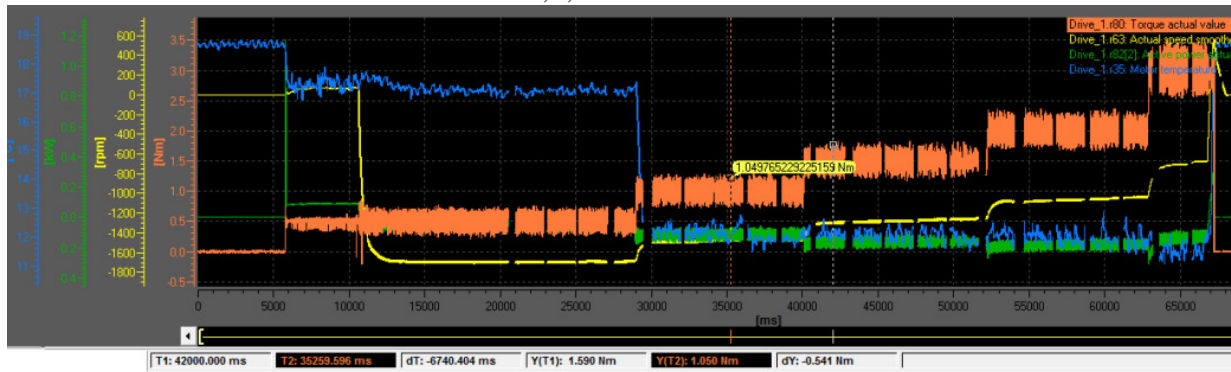
Tabela 5 - Ensaio e medições de variação de carga com tensão constante.

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	Escoreamento	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 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%
Estator sinterizado	220	0	0	2081	21497	1,89	422	445	53	0,99	25,7%	19		441	13,9	217,92	0,00	0%	2251,13	0,00	0%
	220	0,1	0,0104	1945	20092	2,1	458	480	79	0,96	30,5%	19		461		203,68	20,37	4%	2104,01	21,79	5%
	220	0,5	0,0518	1161	11993	3,65	740	769	176	0,96	58,5%	19		738		121,58	60,79	8%	1255,92	65,05	9%
	220	1	0,1036	812	8388	4,06	824	859	214	0,96	71,0%	19		825		85,03	85,03	10%	878,39	90,98	11%
	220	1,5	0,1554	565	5836	4,48	910	956	247	0,96	79,8%	19		918		59,17	88,75	10%	611,19	94,96	10%
	220	2	0,2072	369	3812	5,04	1006	1059	306	0,95	86,8%	19		1006		38,64	77,28	8%	399,17	82,69	8%
rotor bloqueado	220	3	0,3107	0	0	5,98	1167	1280	408	0,91	100,0%	19	80,78	1167	48,7	0,00	0,00	0%	0,00	0,00	0%

Fonte: Arquivo Pessoal.

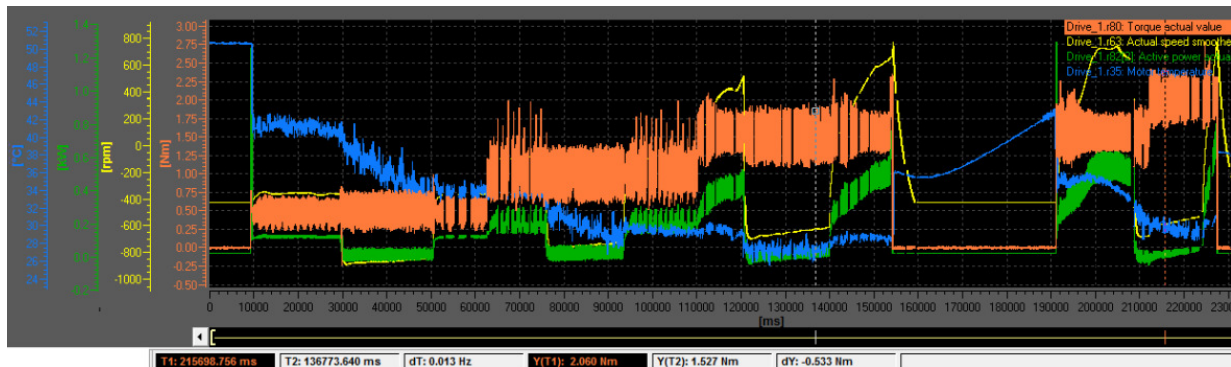
O rendimento do motor original rebobinado chegou a 26% com a carga aplicada ficou em média 64% inferior, chegando a 76% com carga de 2Nm. A partir de 0,5 Nm a rotação já não era mais suficiente para refrigerar o motor e a temperatura aumentou significativamente.

Figura 30 - Gráfico rpm (amarelo) x torque (laranja) do motor original, carga aplicada 0,5, 1, 1,5, 2 e 3Nm.



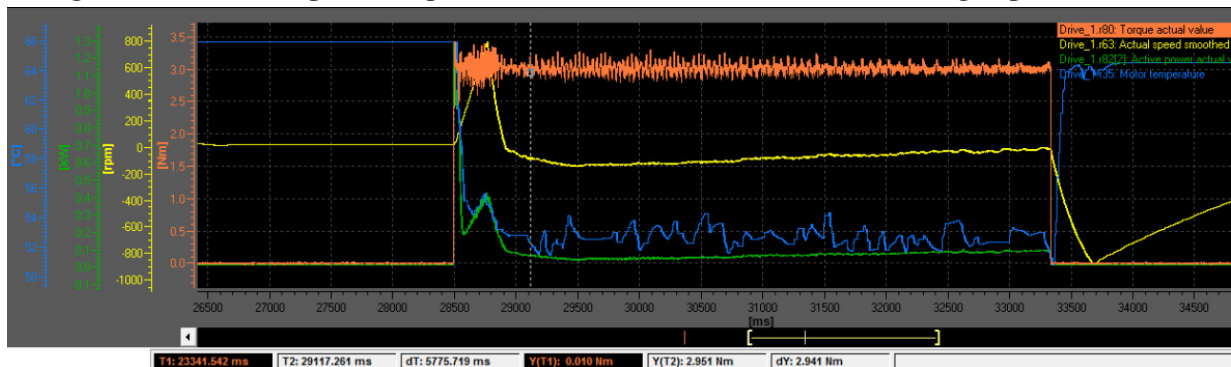
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 31 - Gráfico rpm x torque do motor com estator sinterizado, carga aplicada 0,5, 1, 1,5 e 2Nm.



Fonte: Arquivo pessoal.

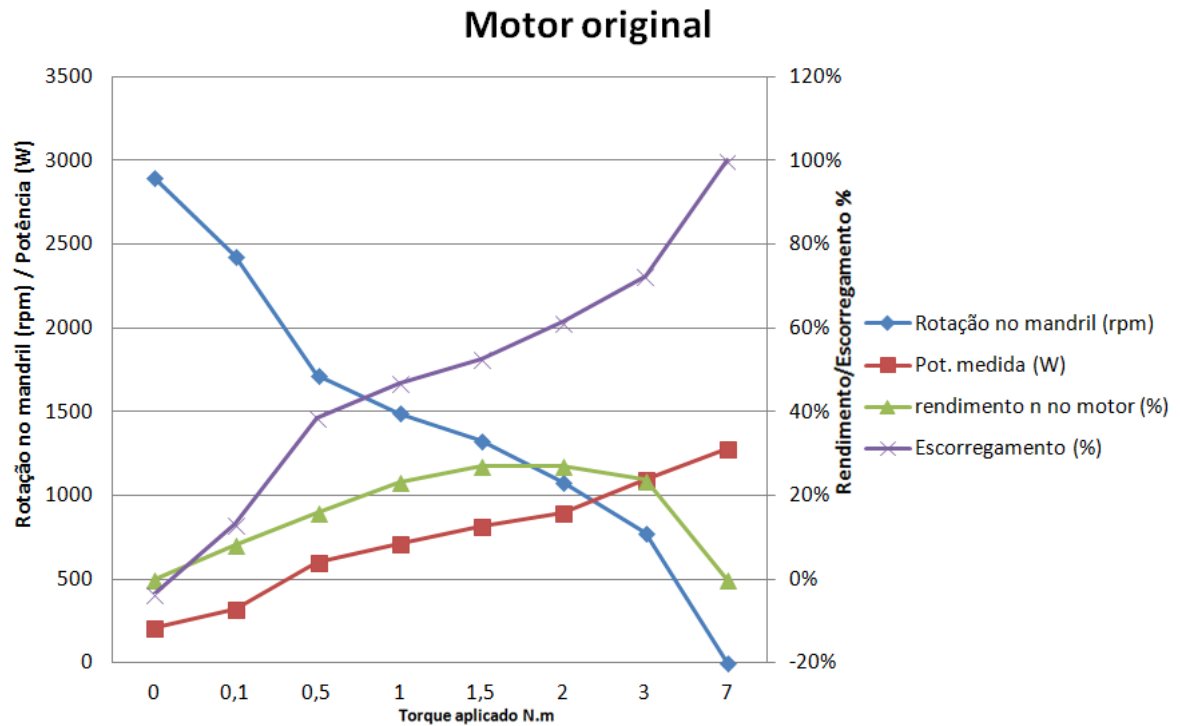
Figura 32 - Gráfico rpm x torque do motor com estator sinterizado, carga aplicada 3Nm.



Fonte: Arquivo pessoal.

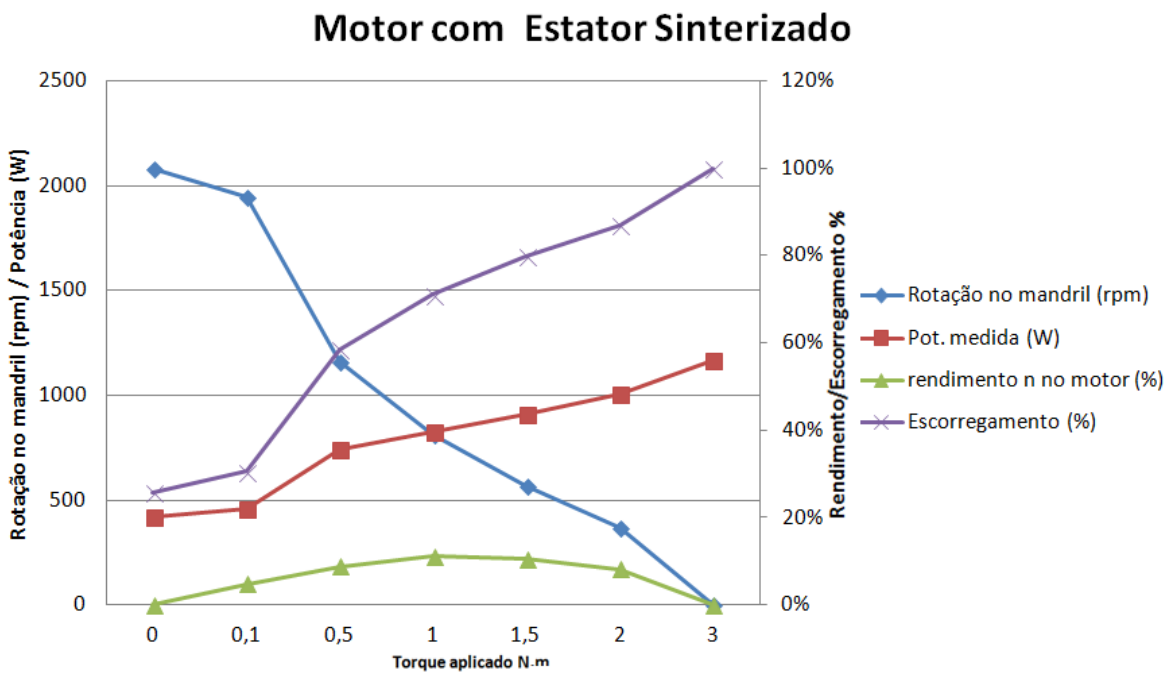
Os gráficos que relacionam as curvas de variação de potência e rotação com a carga imposta estão nas figuras 33 e 34.

Figura 33 - Variação de potência elétrica medida x torque e velocidade no motor original.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 34 - Variação de potência elétrica medida x torque e velocidade no motor com estator sinterizado.



Fonte: Arquivo pessoal.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para as simulações feitas com o software FEMM 4.2 a fim de determinar o material a ser utilizado, foram utilizados as curvas de histerese (BITTENCOURT, 2012) previamente obtidas.

Na compactação e sinterização do cilindro para confecção do estator foram utilizados os mesmos parâmetros dos trabalhos (GUTFLEISCH, 2011) (RICHARDSON, 1982) (SILVA, 2003), com isso obtivemos a densidade desejada de $6,07 \text{ g/cm}^3$.

Os resultados da simulação com o núcleo Chapas (M15-Steel), material original do motor, torque instantâneo de 0,379 N.m, e fluxo magnético de 2,25T.

Os resultados da simulação com núcleo de Fe1%P torque instantâneo de 0,276 N.m, e fluxo magnético de 3,07T, apresentaram os melhores resultados comparados com outras ligas simuladas. Mesmo nesta liga o torque foi 27% menor. Isso 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 (GUTFLEISCH, 2011) (RICHARDSON, 1982) (SILVA, 2003).

Os motores de indução monofásicos convencionais possuem maior eficiência quando comparados com motores universais, porém a relação peso potência é muito mais favorável nos motores universais. Isso pode ser verificado comparando os dados do motor monofásico convencional de 2 polos carcaça 71 ABNT, potência 550W/220V, pesa 12,5Kg, dimensões 248x139mm (largura x altura)/diâmetro 141mm e torque de rotor bloqueado 0,784Nm, e o motor universal da furadeira KR505 com potência 480W/220V, peso de 0,62Kg, dimensões 80x160mm e torque de rotor bloqueado 0,72Nm. Conforme pode ser observado na figura 35.


Como o estator obtido por MP foi bobinado de forma manual e com material semelhante ao original, optou-se por rebobinar o estator original afim de que a comparação entre os estatores fosse com a mudança apenas do núcleo.

Durante os ensaios verificou-se que realmente os dados do estator original comparados com o estator rebobinado apresentavam diferenças significativas e que a escolha por testar em comparação com este estator rebobinado foi bem sucedida.

Em situação de carga semelhante, o motor rebobinado ficou 3% em média com o rendimento inferior, já a potência consumida da rede entre 3,5% e 12% superior.

Figura 35 - Dados motor elétrico de indução monofásico comercial.

Motor monofásico com capacitor permanente



Potência		Carcaça	RPM	Corrente nominal em 220V (A)	Corrente com rotor bloqueado I_p / I_h	Conjugado nominal C_p (kgm)	Conjugado com rotor bloqueado C_p / C_n	Conjugado máximo C_{max} / C_n	Rendimento η %			Fator de potência $\cos \varphi$			Fator de serviço F S	Momento de inércia J (kgm ²)	Tempo máx. com rotor bloqueado (s) a quente	Nível médio de pressão sonora dB (A)	Peso aprox. (kg)
cv	kW								% da potência nominal										
									50	75	100	50	75	100					
2 Pólos - 60 Hz																			
0,12	0,09	63	3460	1,10	3,6	0,02	0,6	3,5	29,0	39,0	43,0	0,75	0,80	0,86	1,15	0,00001	6	60	7,0
0,16	0,12	63	3460	1,30	4,0	0,03	0,6	3,5	30,0	40,0	44,0	0,80	0,86	0,90	1,15	0,00001	6	60	7,0
0,25	0,18	63	3465	1,72	4,0	0,05	0,6	2,5	37,0	46,0	50,0	0,90	0,93	0,95	1,15	0,00001	6	60	7,5
0,33	0,25	63	3460	2,20	5,0	0,07	0,5	3,2	42,0	52,0	58,0	0,85	0,89	0,93	1,15	0,00002	6	60	8,5
0,50	0,37	71	3350	3,00	3,5	0,11	0,6	2,6	43,0	51,0	56,0	0,96	0,98	0,98	1,15	0,00037	6	65	11,0
0,75	0,55	71	3380	4,20	4,0	0,16	0,5	2,5	50,0	60,0	63,0	0,88	0,92	0,94	1,15	0,00053	6	65	12,5

Fonte: WEG, 2005

Através dos resultados dos ensaios verificou-se que o motor com estator sinterizado apresentou desempenho inferior ao motor padrão rebobinado. Rendimento máximo do Motor original bobinado 26% e estator MP 11%, estes dados são consequência de maior velocidade do motor original quando sujeitos a torques iguais.

O resumo abaixo descreve os resultados dos principais ensaios:

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 I_p/I_n similar ao motor convencional que para potências similares é na ordem de 3 a 4.

Observou-se que devido as menores velocidades com cargas iguais o sistema de refrigeração que depende da rotação foi afetado o que causou um maior aquecimento e consequentemente diminui a capacidade de utilização do equipamento. Com isso pode-se concluir que na futura utilização de um motor com núcleos feitos através da MP, deve-se considerar uma modificação no sistema de refrigeração.

5. CONCLUSÕES

Os ensaios realizados com o núcleo do estator feito através da MP com liga de Fe1%P, obteve um desempenho no rendimento 42% menor quando comparado com rendimento do motor original, este parâmetro é resultado do baixo torque da alta corrente e outros parâmetros medidos nos ensaios.

O aumento da temperatura de forma rápida quando comparado com o estator de chapas, é muito maior. Este aumento na temperatura do estator feito por MP mostrou ser um parâmetro fundamental para queda do desempenho, tendo em vista que a condutividade elétrica dos condutores diminui muito com o aumento da temperatura. Também é importante observar que o modo de funcionamento deste equipamento (Furadeira Manual), que é feito de forma intermitente, o que faz com que o projeto de cada máquina forneça um limite de utilização temporária diferente. Podemos identificar que devido ao aquecimento este limite de utilização caiu muito em relação ao original.

Conforme comprovado em estudos anteriores, (PAULETI, 2012) em frequências superiores a 400Hz os desempenhos dos núcleos feitos por MP se aproximam muito das chapas laminadas de silício. Com a crescente utilização de inversores de frequência para acionamento de motores, podemos no futuro utilizar os núcleos construídos com MP sendo acionados através de inversores de frequência, o que deve aumentar o desempenho do equipamento, mantendo as vantagens da metalurgia do pó.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros podemos citar:

- ✓ Analisar a viabilidade de melhorar o desempenho do motor com estator sinterizado utilizando outras ligas com maior percentual de fósforo, ou Fe-Si-P, o uso de material compósito como também o microencapsulamento. Estas ligas podem aumentar a resistividade do estator o que diminui as correntes parasitas e conseqüentemente a temperatura. A utilização de outras ligas para o trabalho em muitos casos inviabilizaria devido à dificuldade de usinagem e altos custos na confecção das matrizes;
- ✓ 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;
- ✓ Fazer os ensaios utilizando drives eletrônicos como inversores de frequência da bancada 02, em uma máquina similar porém trifásica e com núcleos obtidos pela metalurgia do pó, preferencialmente fabricados com a liga Fe1%P ou Fe2%P, possivelmente o rendimento será melhor devido a modulação da tensão e corrente em altas frequências.

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.

BARBOZA, J. S. **Caracterização de Compósitos Magnéticos Macios Desenvolvidos Através da Metalurgia 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.

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>>. Acesso em: 11 maio de 2013.

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.

BOSH. **Furadeira elétrica manual**. Disponível em: <<http://www.boschferramentas.com.br/br/pt/professional/ferramentas-elétricas/c101357/p7984/furadeira/gbm-13-2.html>>. Acesso em: 02 janeiro 2014.

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

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.

DT-5 - CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES DE GERADORES. Jaraguá do Sul: WEG 2012.

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.

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.

HONDA, F. **Motores de Corrente Contínua**: 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. *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.

JOHNSON ELECTRIC. **Aplicação de motores universais**. Disponível em: <<http://www.johnsonelectric.com/pt/resources-for-engineers/industries-applications/major-product-technologies/application-considerations.html>>. Acesso em: 02 janeiro 2014.

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.

PAULETI, P. **Construção e Análise do Desempenho de um Motor de Indução Trifásico com Núcleo Produzido via Metalurgia Do Pó**. 2012. 79 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.

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.

RICHARDSON, D.V. **Rotating Electric Machinery and Transformer Technology**. 2nd ed. Virginia: Reston Publishing Company, 1982.

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.

ANEXOS

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

Os processos básicos da Metalurgia do Pó são: obtenção dos pós, mistura, compactação e sinterização. Às vezes são necessárias etapas complementares, tais como, a retificação. Na M/P, os pós depois de serem misturados, são compactados em matrizes onde adquirem a forma da cavidade da matriz. Após, são colocados em fornos para sinterização onde adquirem consistência e resistência mecânica. Salienta-se que, pós de diferentes naturezas químicas podem ser obtidos, desde que sejam misturados homogeneamente (GERMAN, 1984) (MORO, 2007). A figura A.1 mostra um esquema das etapas da M/P (Powder Metallurgy Process, 2014).

As principais vantagens da Metalurgia do Pó, em relação aos processos convencionais de conformação mecânica são (GERMAN, 1984) (MORO, 2007):

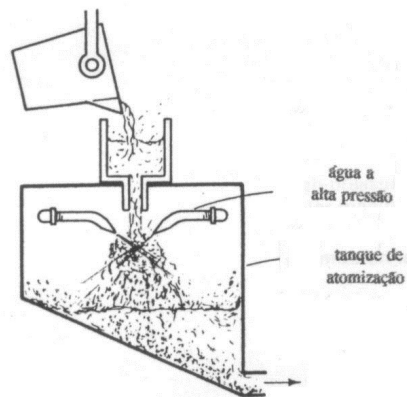
- Melhor aproveitamento de matéria-prima com mínimas perdas;
- Homogeneidade estrutural e de propriedades da peças, pois permite o controle da composição química do material, podendo ser produzidos componentes de alta pureza;
- Menor consumo de energia, pois as temperaturas de sinterização nos fornos são baixas em relação a outros processos;
- Produto final com excelente tolerância dimensional e acabamento superficial, em boa parte dos casos não necessitando de operações posteriores.
- Permite produzir componentes com formas complexas, muitas vezes inacessíveis a outros processos de fabricação.

Obtenção da matéria prima e mistura dos pós

Os pós são obtidos por uma série de processos, que variam em função das propriedades do material, tais como sua resistência mecânica, ponto de fusão e comportamento químico, é necessário também conhecer as características que a aplicação requer do mesmo. Os processos químicos mais utilizados para a obtenção de pós metálicos ou cerâmicos são: moagem, quebra, processos químicos, termoquímicos e atomização (BONATO, 2003).

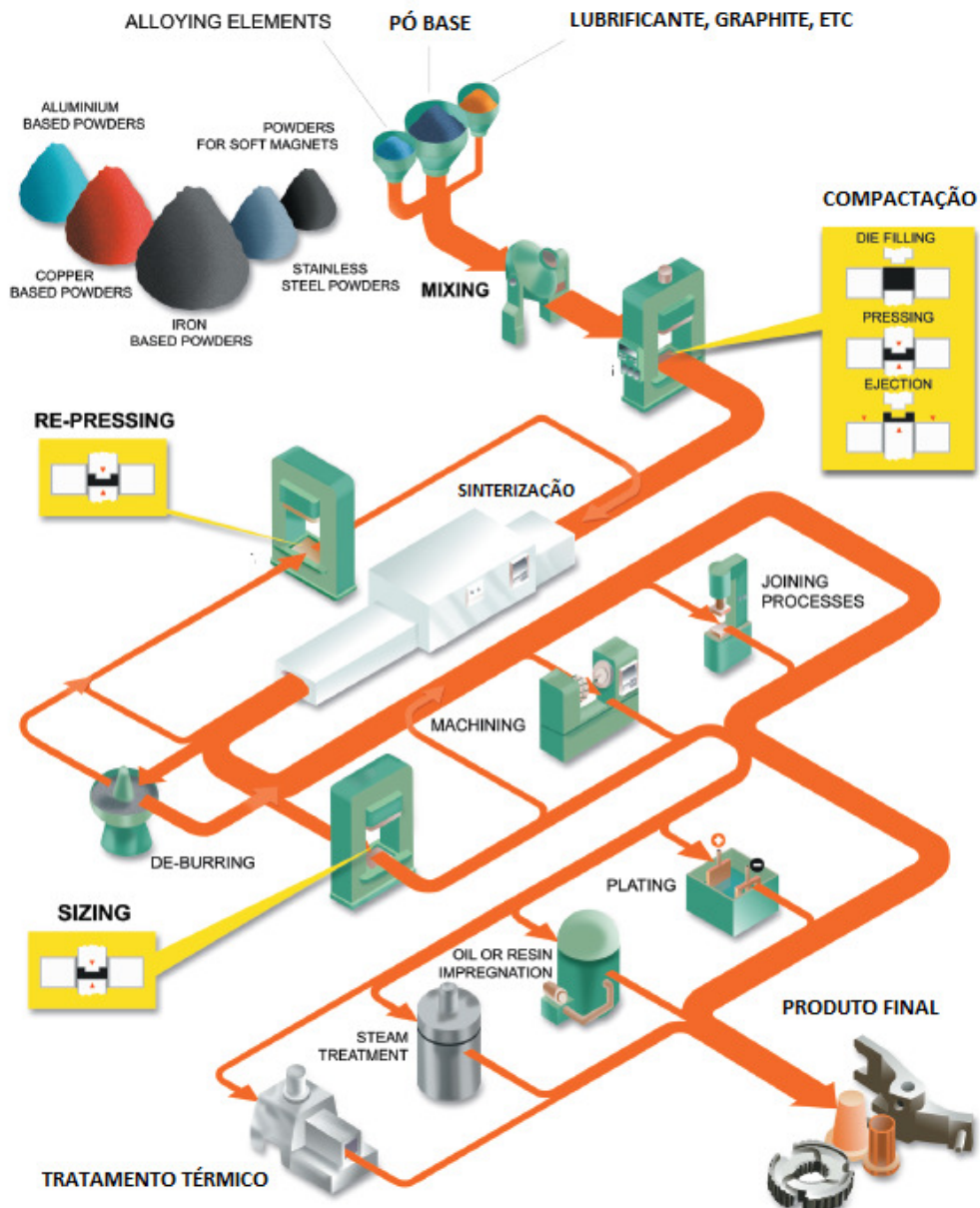
A figura A.2 mostra o processo de atomização de pós, que podem ser tanto metálicos quanto não metálicos.

Figura A.2 - Processo de atomização de pós.



Fonte: BONATO, 2003.

Figura A.1 - Etapas da M/P.



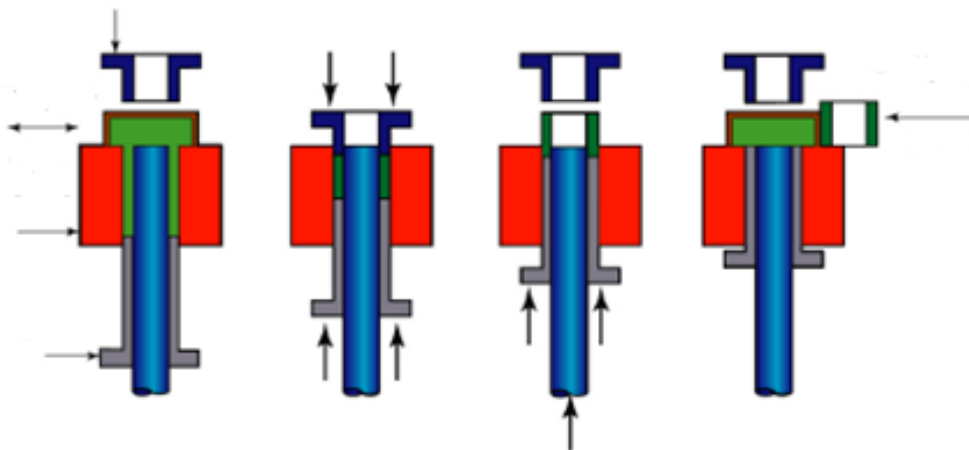
Fonte: Powder Metallurgy Process, 2014.

Compactação

No processo de compactação, usualmente, são aplicadas pressões na faixa de 400MPa a 600MPa. Entretanto, para aumentar a densidade da peça sinterizada podem ser requeridas pressões de até 800 MPa. Porém, deve ser observado o dimensionamento da matriz, uma vez que as forças necessárias na compactação são proporcionais à área da sua cavidade. Entre os parâmetros de controle do processo, a densidade a verde é a densidade da peça compactada antes de ser sinterizada. A densidade é função da pressão, composição da mistura, distribuição, tamanho e forma das partículas e uso ou não de lubrificante (BARBOZA, 2009).

O método mais utilizado é a compactação utilizando uma matriz, representado pela técnica de compactação de duplo efeito (Figura A.3). Consiste em pressionar as peças utilizando uma prensa com forças a partir de duas direções, produzindo peças com densidade uniforme (BARBOZA, 2009).

Figura A.3 - Sequência de compactação de duplo efeito.



Fonte: BARBOZA, 2009.

Sinterização

A sinterização consiste no aquecimento do compactado verde a temperaturas elevadas, porém abaixo do ponto de fusão do metal ou do principal constituinte da liga metálica considerada. Este é submetido sob controle de tempo, temperatura e meio ambiente. Como resultado, as partículas que constituem o compactado ligam-se entre si e o material adquire as características desejadas de densidade, dureza e resistência mecânica.

A temperatura especificada de sinterização é da ordem $2/3$ a $3/4$ da temperatura de fusão da liga considerada (DIAS, 1999).

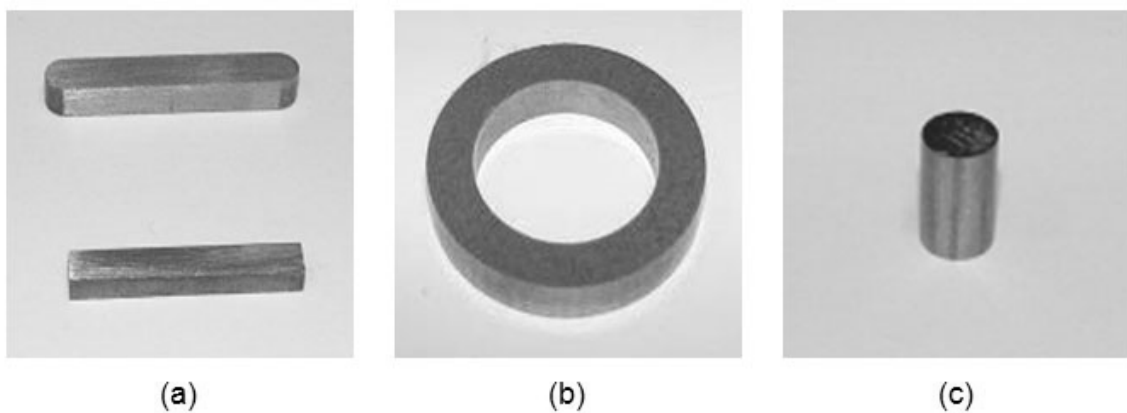
A sinterização é tipicamente um processo de difusão no estado sólido, podendo ocorrer em fase sólida e fase líquida. No primeiro caso a temperatura promove a união das partículas do pó sob temperaturas abaixo do ponto de fusão do material, porém suficiente para criar um “pescoço” de ligação entre as partículas de pó. Já na ocorrência de fase líquida, sinteriza-se o material utilizando elementos com ponto de fusão diferente e o material com menor ponto de fusão se liquefaz e interconecta a partícula do outro material (BONATO, 2003).

Na aplicação da metalurgia do pó no desenvolvimento de materiais magnéticos macios curados, a principal diferença destes compósitos (metal + resina) é que neste caso não ocorre a sinterização e sim a cura da resina que tem como finalidade agregar as partículas metálicas. Esta resina é responsável pela estabilidade mecânica da peça e pelo isolamento elétrico (BONATO, 2003).

ANEXO B - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS

A determinação do material para atender determinada aplicação em máquinas elétricas deve considerar características físicas como as propriedades magnéticas, fundamental para o rendimento e desempenho da máquina, propriedades mecânicas para garantir a resistência aos esforços solicitados e a resistividade elétrica que está relacionada com as perdas por aquecimento devido as correntes parasitas. Existem diversos estudos e trabalhos já executados por outros autores baseados nas medições a partir de corpos de prova, em que são obtidas as propriedades mecânicas, magnéticas e elétricas.

Figura B.1 - Corpos de prova: (a) barras, (b) anéis e (c) cilindros [19].



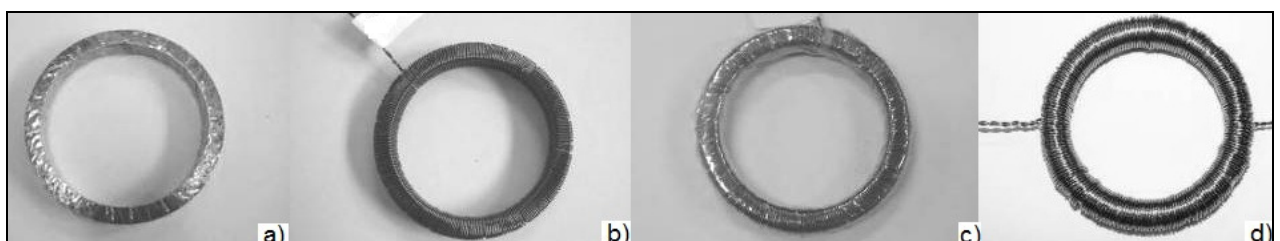
Fonte: BARBOZA, 2009.

B.1 Propriedades magnéticas dos materiais

O estudo das propriedades magnéticas é fundamental para o entendimento das diferenças entre as unidades de campo, indução e fluxo magnético, bem como, o que diferencia um material magnético macio de um ímã permanente.

As propriedades magnéticas são obtidas através de ensaios de anéis de Rowland (figura B.2), bobinados a utilizando como núcleo corpos de prova sinterizados.

Figura B.2 - Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento do primário.



Fonte: (BARBOZA, 2009)

Permeabilidade magnética relativa

A permeabilidade magnética do meio é representada como (DIAS, 1999) (JACK, 1997) (SILVA, 2003):

$$\mu = \mu_r \mu_o$$

A Tabela B.1 relaciona algumas substâncias com suas respectivas permeabilidades magnéticas relativas. Deve-se salientar que a permeabilidade magnética relativa não é constante para alguns materiais, principalmente os ferromagnéticos e, neste caso, a tabela apresenta os valores máximos (SILVA, 2003) (BAS, 2003).

Tabela B.1 - Permeabilidade relativa de alguns materiais (ANISIMOVA, 2009).

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

Da Tabela B.1 pode-se concluir o seguinte (JACK, 1997) (SILVA,2003) (FRAYMAN, 1998):

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

Outros tipos de materiais são os antiferromagnéticos, ferrimagnéticos e superparamagnéticos (JACK, 1997) (SILVA,2003).

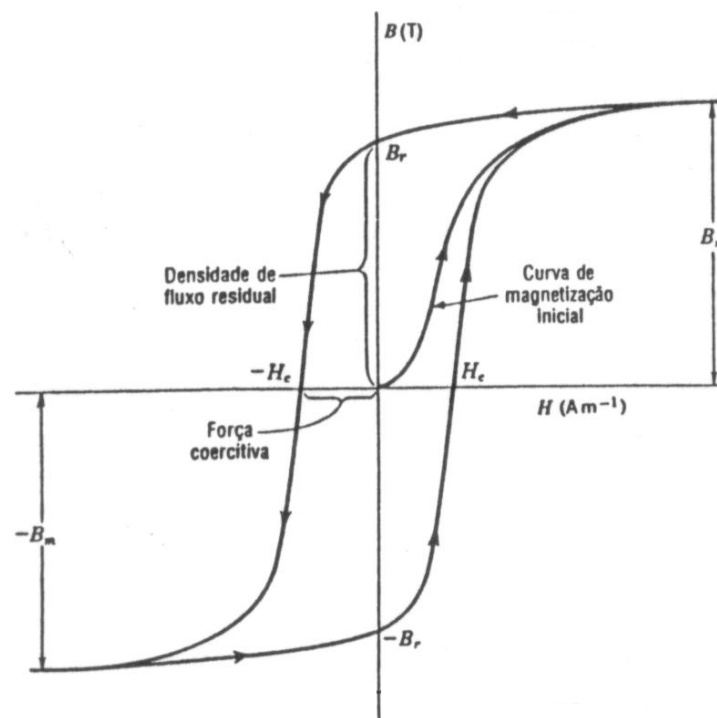
Curva de histerese

Se um material for colocado dentro de uma bobina na qual circula uma corrente elétrica I, um campo magnético H será gerado no interior desta bobina, e o material irá sofrer

uma indução magnética B . Se o material for diamagnético ou paramagnético poucas linhas de fluxo magnético serão induzidas e a relação $B \times H$ será aproximadamente linear. Se o material for ferromagnético muitas linhas de fluxo serão induzidas (fenômeno de magnetização) e a relação $B \times H$ apresenta as características de uma curva conforme a figura B.3. Observa-se que esta curva possui uma histerese sendo, portanto, denominada de *curva de histerese* ou *ciclo de histerese*. Os materiais que possuem características magnéticas semelhantes às mostradas pela curva da figura B.3 são conhecidos como materiais magnéticos (JACK, 1997) (SILVA, 2003) (FRAYMAN, 1998) (ANISIMOVA, 2009) (Furadeira de Impacto KR505, 2013).

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 ($B = 0$).

Figura B.3 - Ciclo de histerese para um material magnético.



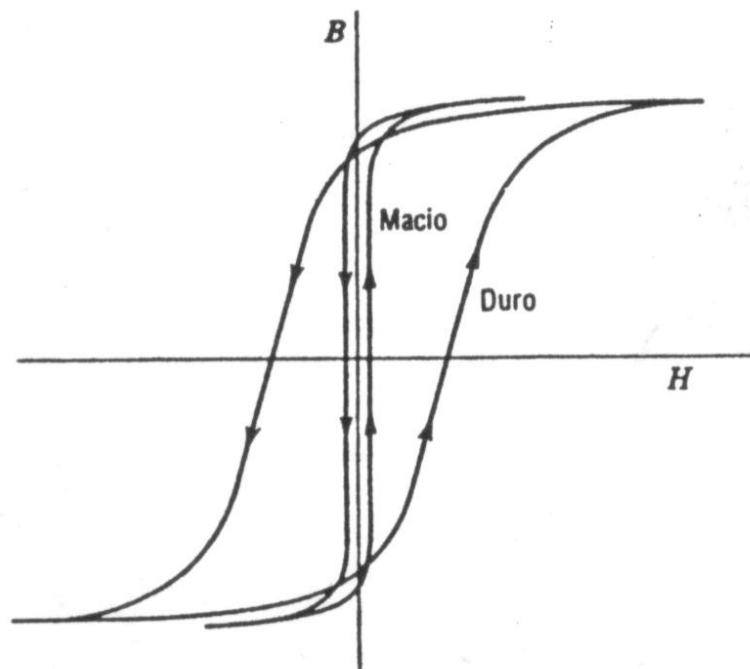
Fonte: ANISIMOVA, 2009.

O campo desmagnetizante máximo é denominado de coercitividade H_c . Outro fator importante na identificação dos materiais magnéticos é o produto energético $BH_{m\acute{a}x}$ [J/m^3] e

está associado com a densidade de energia armazenada num material magnético (JACK, 1997) (SILVA,2003).

A figura B.4 mostra dois ciclos de histerese, um largo que representa um material magnético duro também conhecido como ímã permanente (geralmente materiais ferrimagnéticos) e um estreito que representa um material magnético macio (geralmente materiais ferromagnéticos) (JACK, 1997) (SILVA,2003) (FRAYMAN, 1998).

Figura B.4 - Ciclo de histerese para materiais magnéticos duros e macios.



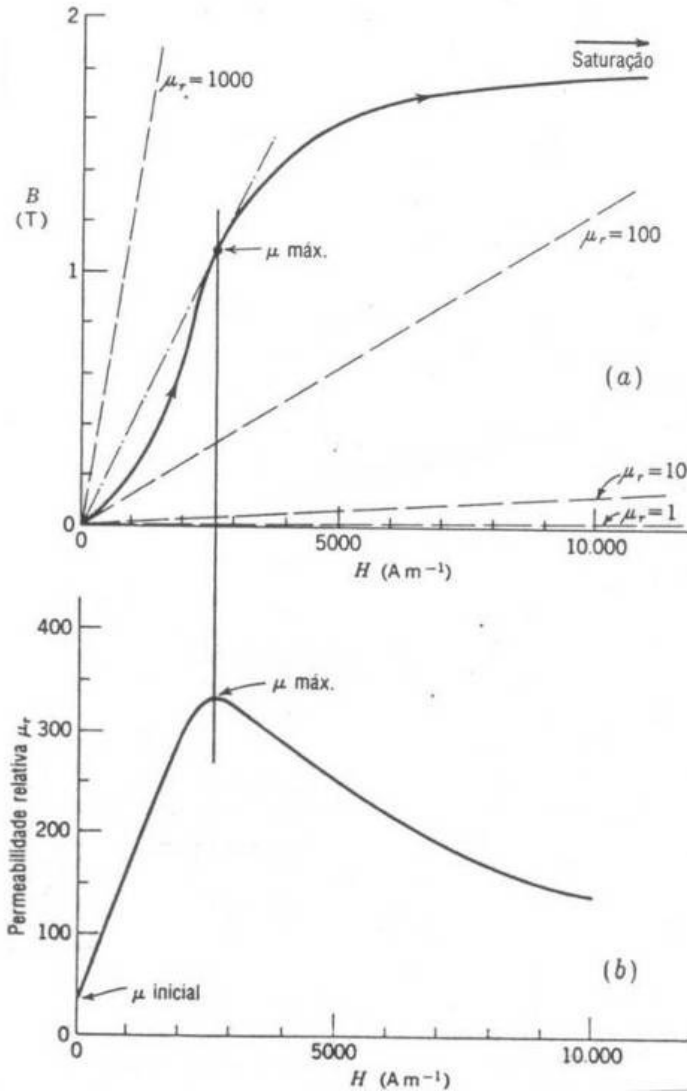
Fonte: ANISIMOVA, 2009.

Magnetização

Uma curva típica de um material magnético é mostrada na figura B.5(a). Para fins de comparação, esta figura mostra quatro linhas tracejadas, correspondendo às permeabilidades relativas constantes, μ_r , de 1, 10, 100 e 1000. A Figura B.5(b) apresenta um gráfico de permeabilidade relativa como função do campo H aplicado. A permeabilidade relativa máxima se encontra no ponto da curva de magnetização onde a relação de B e H é máxima, sendo designada por $\mu_{m\acute{a}x}$ (SILVA, 2003).

Quando o valor de H é aumentado, o de B aumenta rapidamente a princípio e depois mais lentamente. Quando aplicados valores elevados de campo magnético a curva tende a ficar assintótica. Esta condição é chamada de saturação magnética (JACK, 1997) (SILVA,2003) (FITZGERALD, 2008).

Figura B.5 - (a) Curva de magnetização, (b) Relação entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado.

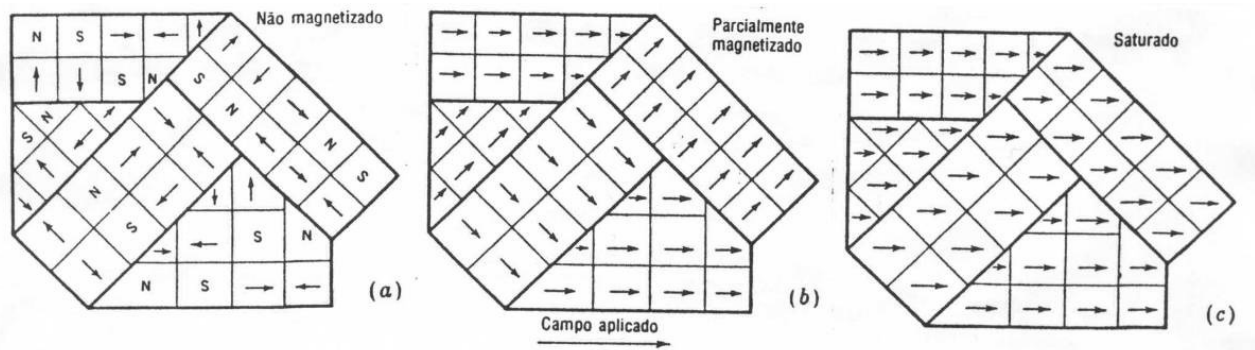


Fonte: ANISIMOVA, 2009.

Para se compreender o fenômeno da magnetização, pode-se tomar em consideração um fragmento de um material magnético. Este fragmento, geralmente, não consiste de um único cristal ou grão, mas de agregados de grãos que por sua vez se dividem nos domínios magnéticos, de acordo com a figura B.6(a). Os domínios se orientam de tal forma que a energia seja mínima, ou seja, os domínios adjacentes estão com polaridade contrária, diminuindo a energia no campo magnético, e tendo como consequência uma magnetização total nula. Com a aplicação de um campo magnético H conforme figura B.6(b), alguns domínios com polaridade opostas ou perpendiculares ao campo aplicado, tornam-se instáveis e giram rapidamente para outro sentido de fácil magnetização, na mesma direção do campo ou bem próximo a este. Aumentando-se

mais o campo aplicado como indicado na figura B.6(c), todos os domínios alinham-se na direção do campo. Entretanto, este aumento de magnetização é mais difícil e podem ser necessários campos muito fortes para a saturação plena ser obtida (JACK, 1997) (SILVA,2003) (Universal Motor, 2013).

Figura B.6 - Estágios de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo.



Fonte: ANISIMOVA, 2009.

B.2 Resistividade Elétrica

A determinação da resistividade elétrica de materiais pode ser realizada a partir da resistência elétrica de corpos com geometria perfeitamente conhecidas.

Em se tratando de núcleos de máquina elétrica é desejável que este se comporte como um circuito aberto, ou seja, com resistividade infinita. A forma construtiva destes núcleos é determinante para que se obtenha um núcleo magnético com alta resistividade. A alta resistividade evita que hajam perdas produzidas por correntes induzidas no núcleo que levam ao aquecimento e a respectiva perda de rendimento (FITZGERALD, 2008).

Tabela B.2 - Média de Resistividade das diversas ligas.

Liga	ρ ($\Omega.m$)
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, 2012.

Figura B.7 - Medição de resistividade em corpo de prova em formato de anel.



Fonte: BARBOZA, 2009.

B.3 Propriedades mecânicas dos materiais

Considerando que máquinas elétricas são utilizadas para gerar movimento, suas estruturas mecânicas podem estar sujeitas a vibrações, variações bruscas de carga e o próprio esforço solicitado pela carga que irá acionar. Desta forma os materiais utilizados devem atender certas características de dureza e ductilidade.

As ligas sinterizadas possuem dureza maior que o Fe-Puro, principalmente com a mistura de fósforo, conforme tabela B.3:

Tabela B.3 - Dureza Brinell de 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, 2012.

Tensão de escoamento é a tensão necessária para causar uma deformação plástica, em que o material se deforma e não retorna automaticamente a sua forma original. As ligas de FeSi são as que suportam maiores esforços, e em relação as ligas de FeP quanto maior a quantidade de P menor a sua ductilidade, o que pode ser observado na tabela B.4.

Tabela B.4 - Tensão de escoamento de ligas sinterizadas.

Liga	Força [N.m]	Tensão de Escoamento [N.mm ²]
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, 2012.

ANEXO C - MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

A função de uma máquina elétrica rotativa é transformar energia elétrica em mecânica (motor elétrico) ou mecânica em elétrica (gerador).

C.1 Motores elétricos

Os tipos mais comuns de motores elétricos são:

a) Motores de corrente contínua: são motores de custo mais elevado e, além disso, precisam de uma fonte de corrente contínua, ou de um dispositivo que converta a corrente alternada comum em contínua. Podem funcionar com velocidade ajustável entre amplos limites e se prestam a controles de grande flexibilidade e precisão. Por isso, seu uso é restrito a casos especiais em que estas exigências compensam o custo muito mais alto da instalação e da manutenção

b) Motores de corrente alternada: São os mais utilizados, porque a distribuição de energia elétrica é feita normalmente em corrente alternada. Os principais tipos são:

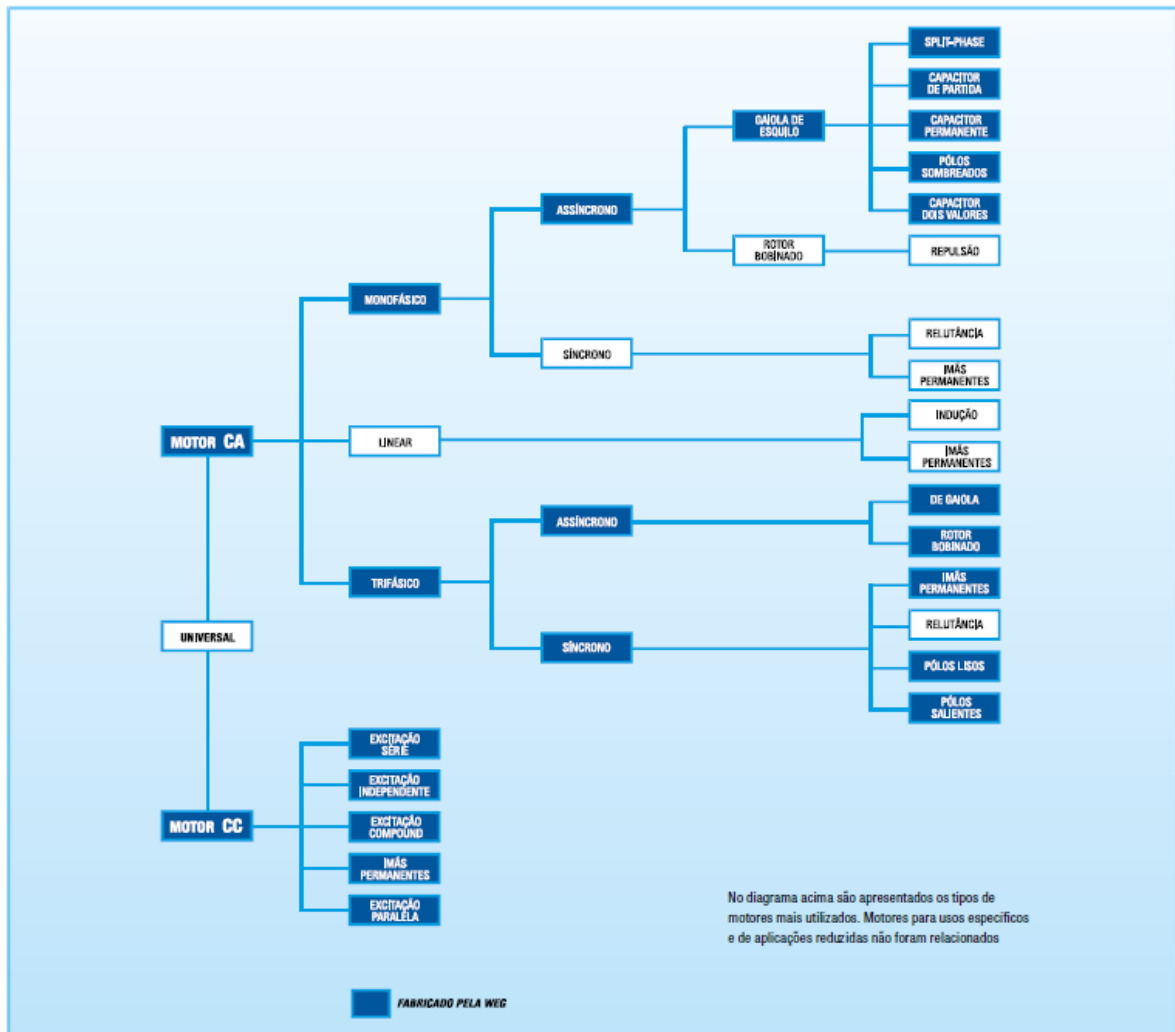
Motor síncrono: funciona com velocidade fixa, ou seja, sem interferência do escorregamento; utilizado normalmente para grandes potências (devido ao seu alto custo em tamanhos menores).

Motor de indução: funciona normalmente com uma velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo, é o motor mais utilizado de todos, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas, encontradas na prática. Atualmente é possível o controle da velocidade dos motores de indução com o auxílio de inversores de frequência.

c) Motor Universal: chama-se motor universal um tipo de motor que funciona tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada. O 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 às 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, 2009).

A figura C.1 mostra um panorama com os principais tipos de motores.

Figura C.1 - Tipos de motores elétricos.



Fonte: WEG, 2005.

São apresentados a seguir os conceitos de algumas grandezas básicas:

Conjugado: o conjugado (também chamado torque ou momento) é a medida do esforço necessário para girar um eixo. É dado pelo produto Força “F” dada em Newton “N” pela distância “E” em metro “m”. Conjugado é medido em Newton Metro ou N.m.

$$C = F \cdot E \text{ (N . m)}$$

Energia e potência mecânica: potência mede a “velocidade” com que a energia é aplicada ou consumida. A unidade usada no Brasil para medida de potência mecânica é o cv (cavalo-vapor), equivalente a 0,736 kW (unidade de medida utilizada internacionalmente para o mesmo fim) (WEG, 2005).

Relação entre unidades de potência:

$$P \text{ (kW)} = 0,736 \cdot P \text{ (cv)}$$

$$P \text{ (cv)} = 1,359 P \text{ (kW)}$$

Energia e potência elétrica

Embora a energia seja uma coisa só, ela pode se apresentar de formas diferentes. Se ligarmos uma resistência a uma rede elétrica com tensão, passara uma corrente elétrica que irá aquecer a resistência. A resistência absorve energia elétrica e a transforma em calor, que também é uma forma de energia. Um motor elétrico absorve energia elétrica da rede e a transforma em energia mecânica disponível na ponta do eixo.

Circuitos de corrente continua

A “potencia elétrica”, em circuitos de corrente continua, pode ser obtida através da relação da tensão (U), corrente (I) e resistência (R) envolvidas no circuito, ou seja:

$$P = U \cdot I \text{ (W)}$$

Onde: U = tensão em Volt

I = corrente Ampere

R = resistência em Ohm

P = potência media em Watt

Circuitos de corrente alternada

Para as “cargas reativas”, ou seja, onde existe defasagem entre o angulo da tensão e da corrente, como e o caso dos motores de indução, esta defasagem tem que ser levada em conta e a expressão fica:

$$P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi \text{ (W)}$$

Onde: U = Tensão de linha

I = Corrente de linha

$\cos \phi$ = Angulo de defasagem entre a tensão e a corrente de fase (fator de potência).

Potencias Aparente, Ativa e Reativa

Potência aparente (S)

E o resultado da multiplicação da tensão pela corrente ($S = U \cdot I$ para sistemas monofásicos e $S = 3 \cdot U \cdot I$, para sistemas trifásicos). Corresponde a potencia que existiria se não houvesse defasagem da corrente, ou seja, se a carga fosse formada por resistências.

A unidade de medida para potência aparente é o Volt-Ampere (VA) ou seu múltiplo, o quilo-Volt-Ampere (kVA) (WEG, 2005).

Potência ativa (P): é a parcela da potencia aparente que realiza trabalho, ou seja, que é transformada em energia.

$$P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi \text{ (W) ou } P = S \cdot \cos \phi \text{ (W)}$$

Potência reativa (Q): É a parcela da potencia aparente que “não” realiza trabalho.

Apenas é transferida e armazenada nos elementos passivos (capacitores e indutores) do circuito.

$$Q = 3 \cdot U \cdot I \cdot \sin \phi \text{ (VAr) ou } Q = S \cdot \sin \phi \text{ (VAr)}$$

Fator de Potência

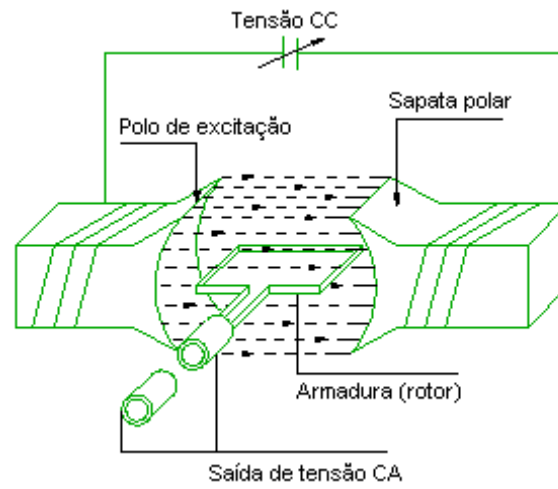
O fator de potência, indicado por $\cos \phi$, onde ϕ é o ângulo de defasagem da tensão em relação a corrente, e a relação entre a potencia ativa (P) e a potencia aparente (S).

Um motor não consome apenas potência ativa que é depois convertida em trabalho mecânico e calor (perdas), mas também potencia reativa, necessária para magnetização, mas que não produz trabalho (WEG, 2005).

C.2 Gerador elétrico

A característica principal de um gerador elétrico é transformar energia mecânica em elétrica. Para facilitar o estudo do princípio de funcionamento, vamos considerar inicialmente uma espira imersa em um campo magnético produzido por um ímã permanente (Fig. C.2). O princípio básico de funcionamento está baseado no movimento relativo entre uma espira e um campo magnético. Os terminais da espira são conectados a dois anéis, que estão ligados ao circuito externo através de escovas. Este tipo de gerador é denominado de armadura giratória.

Figura C2 - Esquemático de gerador elétrico.



Fonte: DT-5 - CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES DE GERADORES, 2012.