

UNIVERSIDADE FEEVALE
Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas
Mestrado em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais

Raul Faviero de Mesquita

**CONSTRUÇÃO DE UM MINI MOTOR COM NÚCLEOS DO ESTATOR E ROTOR
A PARTIR DA METALURGIA DO PÓ**

Dissertação para obtenção do título de Mestre em
Tecnologia de Materiais e Processos Industriais

Novo Hamburgo
2013

UNIVERSIDADE FEEVALE
Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas
Mestrado em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais

Raul Faviero de Mesquita

**CONSTRUÇÃO DE UM MINI MOTOR COM NÚCLEO DO
ESTATOR E ROTOR A PARTIR DA METALURGIA DO PÓ**

Trabalho realizado nos laboratórios da Universidade Feevale, dentro do programa de pós-graduação como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais.

Linha de Pesquisa: Otimização de Processos Industriais

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

Novo Hamburgo
2013

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

Mesquita, Raul Faviero de.

Construção de um minimotor com núcleos do estator e rotor a partir da metalurgia do pó / Raul Faviero de Mesquita. – 2013. 70 f. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais) – Feevale, Novo Hamburgo-RS, 2013.

Inclui bibliografia.

“Orientador: Prof. Dr. Moisés de Mattos Dias”.

1. Motores elétricos. 2. Materiais magnéticos. 3. Metalúrgica do pó. I. Título.

CDU 621.313

Bibliotecário responsável: Fabrício Schirmann Leão – CRB 10/2162

UNIVERSIDADE FEEVALE
Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas
Mestrado em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais

Raul Faviero de Mesquita

Dissertação de Mestrado com título “**CONSTRUÇÃO DE UM MINI MOTOR COM NÚCLEOS DO ESTATOR E ROTOR A PARTIR DA METALURGIA DO PÓ**” submetido à banca examinadora composta pelos profs. signatários abaixo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais.

Aprovado por:

Prof. Dr. Eng^o Moisés de Mattos Dias

Prof. Dr. Eng^o Lírio Schaeffer

Prof. Dr. Eng^o Vicente Mariano Canalli

Prof. Dr. Ricardo Martins

Novo Hamburgo, 27 de Março de 2013.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Eng^o. Moisés de Mattos Dias pelo grande apoio, grandiosa orientação, dedicação e confiança dedicada a mim, sem o qual dificilmente estaria defendendo este trabalho neste momento.

Ao Prof. Dr. Eng^o Lírio Schaeffer pela dedicação em disponibilizar parte de seu tempo na leitura e avaliação do presente trabalho como professor participante da banca examinadora do mestrado.

Ao Prof. Dr. Eng^o Vicente Mariano Canalli também pela dedicação em disponibilizar parte de seu tempo na leitura e avaliação do presente trabalho como professor participante da banca examinadora do mestrado.

Ao Prof. Dr. Ricardo Martins por sua dedicação em ler e corrigir o presente trabalho, bem como em disponibilizar parte de seu tempo na leitura e avaliação do presente trabalho como professor participante da banca examinadora do mestrado.

Aos funcionários da Oficina do Curso de Mecânica Pedro, Geison e Matias pelo seu empenho, dedicação e colaboração nos vários momentos em que necessitei.

Aos meus colegas de Mestrado pela amizade e auxílio nos estudos nos momentos difíceis.

Aos professores do Mestrado em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais pelos conhecimentos transmitidos, o que possibilitou a execução do presente trabalho.

Aos meus colegas professores da Liberato pela colaboração prestada.

Aos meus pais, Álvaro Raul de Mesquita e Carmen M. Faviero de Mesquita, irmãos, tios, cunhados e cunhadas, meu sogro e minha sogra pela esperança depositada de que eu conseguiria finalizar o presente trabalho.

Em especial, à minha esposa Jussara Cristina Deboni Mesquita, minha filha Francine Cibele Deboni Mesquita e meu pequeno filho Arthur Francisco Deboni Mesquita, o qual não sabia o que estava ocorrendo, por saberem relevar as minhas angústias nos vários momentos da minha pesquisa.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um motor de passos de 3 fases, 6 polos com núcleo do estator e rotor construídos a partir da mistura de pó de ferro com pó de níquel nas mesmas proporções em peso, formando uma liga Fe-50%Ni obtida por Metalurgia do Pó M/P. Devido à elevada resistividade elétrica, e em consequência, baixas perdas por correntes parasitas, optou-se pela liga Fe-50%Ni e, a partir de um projeto pré-concebido, foram realizadas simulações do motor a partir do programa de elementos finitos Femm 4.2. O passo seguinte foi a construção do motor a partir da compactação e sinterização de cilindros. Na sequência, foi realizada a usinagem, obtendo-se a forma final dos núcleos do rotor e estator e sua bobinagem. Finalmente, foram realizados ensaios de desempenho, a partir de um *drive* específico para acionamento de motor de passos. Nestes ensaios foram medidos alguns parâmetros do motor, como resistência série equivalente ($2,0 \Omega$) e indutância própria ($2,5 \mu\text{H}$) das bobinas, variações de tensão e corrente para o acionamento (corrente mínima e máxima de 0,6A e 0,8A respectivamente), e frequência máxima de giro do motor (5 rpm). Destaca-se aqui, que o presente trabalho está vinculado a um projeto de pesquisa em rede de cooperação, envolvendo várias instituições, onde um dos objetivos desta rede é o desenvolvimento de um mini motor de diâmetro de 8,0 mm, com núcleos do rotor e estator a serem obtidos a partir da moldagem de pós metálicos por injeção, de construção e acionamento idênticos. Salienta-se também que o motor proposto neste trabalho, é um protótipo em escala três vezes maior, onde, a partir deste, estão sendo realizados estudos visando a construção do motor de menor escala. Salienta-se também que os processos de Metalurgia do Pó e Moldagem de Pós por Injeção são bastante semelhantes, o que justifica a construção em escala do protótipo maior.

Palavras Chave: Material magnético macio, metalurgia do pó, núcleos de máquinas elétricas, simulação de elementos finitos.

ABSTRACT

This study aimed to develop a 3-phase stepper motor, 6-pole stator core and rotor constructed from a mixture of iron powder with nickel powder in the same proportions by weight, forming an alloy Fe-50% Ni obtained by Powder Metallurgy M / P. Initially, it's described in this work, studies and characterization of sintered soft magnetic materials such as pure iron, Fe-P, Fe-Si and Fe-Ni regarding the electrical properties, magnetic and mechanical. Due to the high electrical resistivity, and consequently, low eddy current losses, we opted for alloy Fe-50% Ni and from a pre-conceived design, simulations were performed motor from the finite element program FEMM 4.2. The next step was the construction of the motor from the roller compaction and sintering, the following was performed machining to give the final shape of the cores of the rotor and stator and its windings. Finally, performance tests were carried out from a specific drive for driving stepper motor. In these assays it was measured several parameters of the engine, as equivalent series resistance (2.0Ω) and self-inductance ($2.5 \mu\text{H}$) coils, variations in voltage and current to the drive (minimum and maximum current of 0.6 A and 0.8 A respectively) and maximum frequency of rotation of the motor (5 rpm). It should be noted here that the present work is linked to a research project in cooperation network involving several institutions, where one of the goals of this network is developing a mini 8mm diameter motor, with the rotor and stator cores to be obtained from molding metallic powders by injection, construction and commissioning identical. It should be also noted that the engine proposed in this paper is a prototype-scale three times larger, which, from this, studies are being conducted for the construction of the engine smaller scale. It should be noted also that the processes of Powder Metallurgy and Injection Molding Powders are quite similar, which justifies the construction of the prototype larger scale.

Keywords: Soft magnetic material, powder metallurgy, electrical machines cores, finite element simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –Etapas da Metalurgia do Pó	17
Figura 2.2 – Processo de obtenção de pós por atomização	18
Figura 2.3 – Moinho de bolas – (a) Esboço de um modelo – (b) Fotografia (Feevale)	19
Figura 2.4 – Exemplos de modelos de misturadores (a)cone duplo, (b)dupla concha ou “V”	20
Figura 2.5 – Etapas da compactação em matriz de duplo efeito – (1, 2 e 3) preenchimento da matriz; (4) compactação; (5 e 6) ejeção e remoção do compactado verde	21
Figura 2.6 – Forno contínuo industrial empregado na sinterização de pós metálicos e cerâmicos	21
Figura 2.7 – Ciclo de histerese – (a) para um material magnético duro; (b) comparação entre material magnético macio e duro	23
Figura 2.8 – (a) Curva de magnetização típica – (b) relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado H.....	24
Figura 2.9 – Desenho esquemático do dispositivo para determinação da resistividade de materiais	25
Figura 2.10 – (a) Partículas de Pó Ferromagnético Microencapsuladas com uma camada isolante elétrica – (b) Núcleo de um motor síncrono fabricado	31
Figura 2.11 – Motor de passo de relutância de 8 polos	33
Figura 2.12 – Motor de passo de ímãs permanentes	34
Figura 2.13 – Diagrama mostrando o circuito de potência de motor de passo bipolar	34
Figura 2.14 – Metodologia FEM	35
Figura 3.1 – Amostras na forma de anel – (a) Matriz – (b)Corpo de Prova (régua em cm)	38
Figura 3.2 – Amostras na forma de cilindro – (a) Matriz – (b) Corpo de Prova	38
Figura 3.3 – Prensa hidráulica de 40 t – Laboratório de Mecânica – Feevale	39
Figura 3.4 – Temperatura x tempo no processo de sinterização	39
Figura 3.5 – Forno elétrico utilizado para a sinterização – Lab. Mecânica – Feevale	40
Figura 3.6 – Etapas de preparação do anel de Rowland: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento primário	40
Figura 3.7 – Anel segmentado com terminais para medida da resistividade elétrica	42
Figura 3.8 – Projeto do mini motor: (a) rotor e (b) estator	44
Figura 3.9 – Projeto do mini motor: (a) eixo e (b) motor completo	44
Figura 3.10 – Projeto das tampas do mini motor	45
Figura 3.11 – Detalhamento do pré-processador (malha)	46

Figura 3.12 – Detalhe da malha formada por triângulos produzida na simulação	47
Figura 3.13 – Desenho do projeto da matriz para compactação do estator, do rotor e das tampas	48
Figura 3.14 – Peças sinterizadas em forma de “tarugo” cilíndricos antes da usinagem	49
Figura 3.15 – Desenhos dimensionais da forma final do mini motor	49
Figura 3.16 – Foto de parte do circuito de acionamento do bobinador	50
Figura 3.17 – Foto de uma bobina em processo de secagem	51
Figura 3.18 – Etapa de bobinagem, mostrando molde com carretel	51
Figura 3.19 – Circuito de acionamento do mini motor de passos	53
Figura 3.20 – Programa em linguagem C referente ao acionamento do mini motor	53
Figura 4.1 – Corpos de prova: (a) cilindro; (b) anel	54
Figura 4.2 – Curva de magnetização obtida com auxílio do traçador de ciclos de histerese relativa ao corpo de prova em anel B da liga Fe-50%Ni sinterizada	56
Figura 4.3 – Ciclo de histerese relativo ao corpo de prova A em anel	57
Figura 4.4 – Ensaio para determinação da resistividade das ligas sinterizadas	58
Figura 4.5 – Curva de deformação obtida no ensaio de compressão	59
Figura 4.6 – Micrografia da microestrutura de uma amostra Fe-50%Ni visualizada no MEV – Feevale – aumento de 1000x	60
Figura 4.7 – Densidade de fluxo de entreferro com alimentação de 610 mA	61
Figura 4.8 – Densidade de fluxo de entreferro com alimentação de 1,0 A	62
Figura 4.9 – Fotos do (a) estator, (b) rotor e (c) da tampa – dimensões em cm	63
Figura 4.10 - Fotos do (a)estator bobinado e (b)do mini motor montado - dimensões em cm	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – quadro comparativo das propriedades físicas das diversas ligas sinterizadas magneticamente macias	30
Tabela 2.2 – sequência de comando para avanço de 01 passo polar no sentido anti-horário	35
Tabela 4.1 – determinação das densidades dos corpos de prova (cilindros)	55
Tabela 4.2 – levantamento das propriedades magnéticas dos corpos de prova	56
Tabela 4.3 – medições realizadas para determinação da resistividade elétrica	58
Tabela 4.4 – ensaio de dureza – Escala Rockwell B	60
Tabela 4.5 – grandezas elétricas e magnéticas obtidas a partir da simulação	61
Tabela 4.6 – grandezas elétricas e magnéticas obtidas a partir da simulação	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

μ_{\max} – permeabilidade magnética máxima.

μ_r – permeabilidade magnética relativa.

A – área da seção transversal (m^2).

A – área da superfície sob compressão (m^2).

A – fase A.

B – fase B.

B – indução magnética (T).

B_r – indução magnética residual (retentividade magnética).

C – fase C.

C – capacitância em paralelo (F);

CA – corrente alternada.

CAD – *Computer Aided Design* .

CC – corrente contínua.

CGS – sistema de medidas adotado expressar comprimento em centímetros, massa, em gramas e tempo, em segundos.

CI – circuito integrado (componente eletrônico contendo vários pinos).

D1 – diodo de roda livre 1.

F – Força de compressão (kgf)

f – frequência (Hz).

Fe – ferro.

FEMM 4.2 – programa de computador para projeto magnético de motores e transformadores versão 4.2.

H – intensidade de campo magnético (A/m).

H_c – intensidade de campo magnético coercitivo (A/m).

I – intensidade de corrente elétrica aplicada (A).

k – constante de proporcionalidade.

l – comprimento da barra (m).

L – indutância própria da bobina (H).

M/P – Metalurgia do Pó.

MEV – microscópio eletrônico de varredura.

Ni – níquel.

P – pressão (Pa).

P_h – perdas por histerese (W/kg).

P_{mag} – perdas magnéticas (W/kg).

P_p – perdas por calor (W/kg).

Q1 – transistor 1.

R – resistência elétrica (Ω).

SMC – *Soft Magnetic Composites*.

V – tensão elétrica (V).

W_{cmp} – densidade de energia armazenada no campo magnético (J/m^3).

x – espessura da peça magnética (m).

ρ – resistividade elétrica ($\Omega.m$).

ρ_e – resistividade elétrica ($\Omega.m$).

ρ_m – densidade do material magnético (kg/m^3).

σ_e – tensão de escoamento convencional (kgf/mm^2).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	METALURGIA DO PÓ	16
2.1.1	Introdução	16
2.1.2	Obtenção e preparação dos pós	17
2.1.3	Compactação	20
2.1.4	Sinterização	21
2.2	PROPRIEDADES FÍSICAS DE INTERESSE	22
2.2.1	Introdução	22
2.2.2	Propriedades magnéticas dos materiais aplicados em motores elétricos	22
2.2.3	Resistividade elétrica	24
2.2.4	Propriedades mecânicas	26
2.3	FATORES CONSTRUTIVOS QUE INFLUENCIAM NO DESEMPENHO MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS	26
2.4	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS SINTERIZADOS	28
2.5	MOTORES ELÉTRICOS OBTIDOS A PARTIR DA M/P	30
2.6	MOTORES DE PASSOS	32
2.6.1	Introdução às máquinas elétricas	32
2.6.2	Introdução aos motores de passos	32
2.6.3	Topologias dos motores de passos	33
2.6.4	Acionamento de motores de passos	34
2.7	SIMULAÇÕES POR ELEMENTOS FINITOS	35
3	PARTE EXPERIMENTAL	37
3.1	OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	37
3.1.1	Introdução	37
3.1.2	Matrizes para obtenção dos corpos de prova	37
3.1.3	Compactação e sinterização dos corpos de prova	38
3.2	PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS	40
3.2.1	Introdução	40
3.2.2	Curvas de histerese	40
3.2.3	Resistividade elétrica	41
3.2.4	Propriedades mecânicas e micrografia	43
3.3	PROJETO DO MOTOR	43
3.4	SIMULAÇÃO DO MOTOR	45

3.5	MONTAGEM DO MOTOR	47
3.5.1	Introdução	47
3.5.2	Obtenção dos núcleos do rotor e estator	47
3.5.3	Bobinamento do mini motor	50
3.6	DISPOSITIVO DE ACIONAMENTO DO MOTOR	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1	PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CORPOS DE PROVA	54
4.1.1	Introdução	54
4.1.2	Densidade dos corpos de prova	54
4.1.3	Propriedades magnéticas dos corpos de prova	55
4.1.4	Resistividade elétrica	57
4.1.5	Propriedades mecânicas e micrografia da estrutura dos corpos de prova	58
4.2.	SIMULAÇÕES DO MINI MOTOR	61
4.3.	MONTAGEM FINAL DO MINI MOTOR	63
4.4.	ENSAIOS DO MINI MOTOR	65
5.	CONCLUSÕES	66
6.	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	67
7.	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas podem funcionar como motor ou gerador e possuem duas partes básicas: os núcleos do estator e do rotor. Estes núcleos, com raras exceções, são construídos a partir de finas lâminas metálicas (chapas de aço baixo carbono) com espessura menor que 1,0 mm, agrupadas em pacotes de chapas. Algumas máquinas de melhor desempenho, como os geradores, são construídas com chapas de aço-silício, com percentual de aproximadamente 3% de silício. A confecção destes núcleos é constituída basicamente por laminação, estampagem, execução de um processo para isolação elétrica entre as chapas adjacentes, empacotamento e fixação(NASAR, 1987; FITZGERALD et al., 2008).

Os núcleos do rotor e estator, dependendo da configuração da máquina, são envolvidos por enrolamentos alimentados por corrente elétrica contínua ou alternada. Componentes magnéticos envolvidos por enrolamentos alimentados por corrente elétrica alternada estão sujeitos à ação de correntes parasitas, também conhecidas por correntes de Foucault, responsáveis por apreciável perda de potência nos mesmos. Com a construção de núcleos magnéticos a partir de chapas de aço isoladas eletricamente entre si, obtêm-se uma substancial diminuição nas correntes parasitas, reduzindo-se desta maneira as perdas por correntes de Foucault. Em alguns tipos de máquinas são colocados ímãs permanentes em substituição aos enrolamentos (ou do rotor ou estator), nestes casos, o fluxo magnético é constante(NASAR, 1987; FITZGERALD et al., 2008).

Contudo, utilizando-se os processos da Metalurgia do Pó (M/P), é possível construir núcleos em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética (característicos dos aços magnéticos) e alta resistividade elétrica(JANSSON,1992; KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997). Assim, menos etapas estarão presentes na construção dos mesmos e menos energia será consumida na produção de motores. Salienta-se, porém, que os motores elétricos convencionais com núcleos de chapas laminadas submetidos a fluxo magnético com frequência abaixo de 400Hz, geralmente, apresentam rendimento significativamente maior, se comparado a motores elétricos com núcleos maciços, mesmo aqueles obtidos a partir dos processos da metalurgia do pó. Assim, tal processo de metalurgia em núcleos de máquinas elétricas, fica restrito a motores elétricos especiais, como por exemplo, mini motores em que o rendimento não é o critério mais importante e servomotores (JANSSON,1992; KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997).

O presente trabalho está vinculado ao projeto de pesquisa “Desenvolvimento de próteses e implantes a partir de pós nanométricos aplicados à fabricação de microcompo-

mentes” com apoio da Rede Nanobiotec/Capes, em rede de cooperação entre as Instituições UFRGS/LdTM, ULBRA, FEEVALE e IFSUL-CEFET de Sapucaia do Sul, cujo propósito original foi o desenvolvimento de um micromotor para endoscopia (tipo de passo de relutância), com diâmetro de 8,0 mm, e núcleos do rotor e do estator obtidos por moldagem de pós metálicos por injeção.

Assim, de forma a realizar-se um comparativo de características de funcionamento entre os dois processos de construção a partir da Metalurgia do Pó (M/P), e com o intuito de obter-se uma maior facilidade de montagem, o motor aqui proposto será produzido pelo processo de compactação/sinterização, com dimensões físicas em escala três vezes maior. A matéria-prima utilizada tem a mesma composição do projeto original, sendo composta de 50% de pó metálico de Fe puro e de 50% de Ni puro.

Nos procedimentos iniciais, foram confeccionados os corpos de prova para a realização dos ensaios mecânicos e eletromagnéticos com o intuito da obtenção das propriedades físicas de interesse para aplicação do material em núcleos magnéticos de motores. A seguir, considerando a mesma topologia (projeto) do mini motor para endoscopia, foram realizadas simulações de desempenho a partir do programa de elementos finitos FEMM 4.2.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 METALURGIA DO PÓ

2.1.1 Introdução

Estudos arqueológicos mostram que remonta de 6000 anos A.C. a utilização pelo homem de armas e ferramentas produzidas a partir de aglomerados de ferro, mas foi somente no século XX que o homem empregou os processos de metalurgia do pó (M/P) na construção de peças a partir da sinterização do molibdênio e do tungstênio (TELECURSO 2000 Profissionalizante).

A M/P é um processo da metalurgia de transformação, onde as peças são obtidas a partir de pós, podendo ser de um metal puro ou da mistura de pós metálicos ou mesmo, metal e polímero. As etapas básicas da M/P (BRADBURY, S., 1986) são:

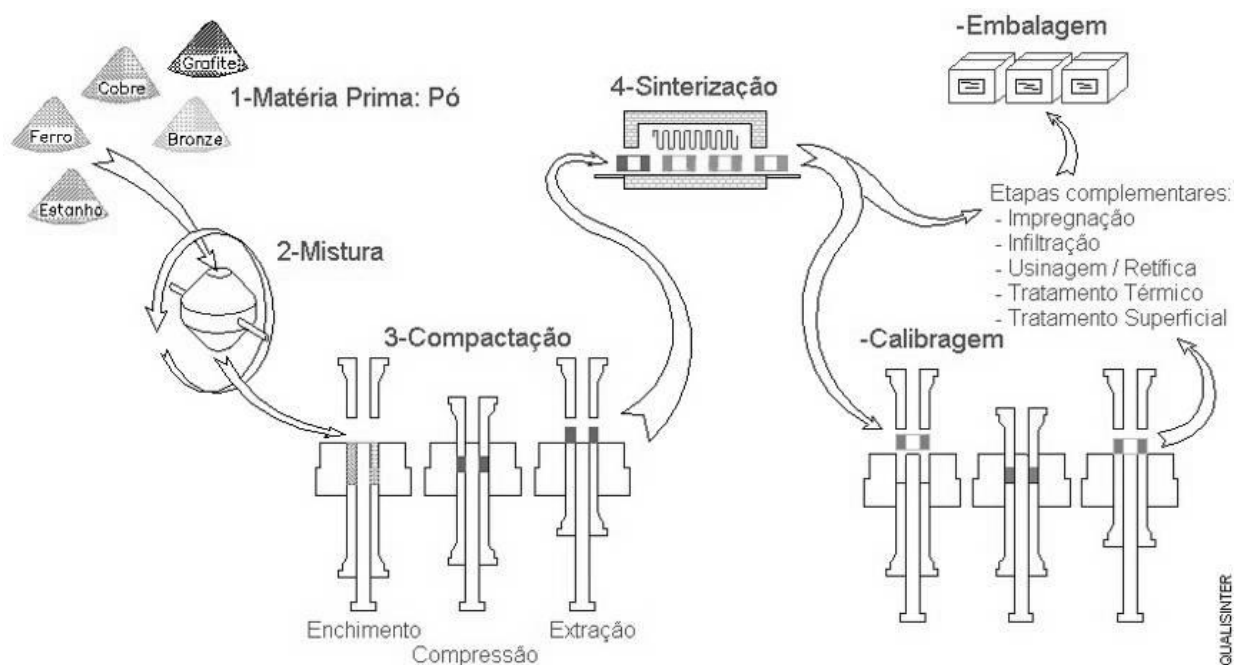
- obtenção do(s) pó(s);
- mistura;
- compactação;
- sinterização;
- usinagem (quando necessário).

Na Figura 2.1 tem-se o esquema das diversas etapas da M/P. Esta possui as seguintes características que se distinguem dos processos metalúrgicos convencionais (CHIAVERINI, 2001; MORO; AURAS, 2007):

- produção de peças com formas definitivas ou praticamente definitivas, dentro de tolerâncias muito estreitas, geralmente sem necessidade de operações posteriores de usinagem ou acabamento;
- utilização de pós metálicos e não metálicos como matérias-primas;
- produção de componentes com características estruturais e físicas impossíveis de serem obtidas por outros processos metalúrgicos;
- obtenção de peças em grande quantidade, tornando o processo altamente competitivo em relação aos processos convencionais;
- compactação dos pós à temperatura ambiente no interior de matrizes, cujas cavidades, normalmente, correspondem às formas e dimensões das peças finais;

- sinterização abaixo da temperatura de fusão do metal ou liga metálica considerada, sob condições controladas de temperatura, tempo e ambiente.

Figura 2.1 – Etapas da Metaurgia do Pó.



Fonte: MORO, 2007.

2.1.2 Obtenção e preparação dos pós

Para obtenção dos pós, foi desenvolvida uma série de processos, em função das propriedades do material (fragilidade, ponto de fusão, comportamento químico, etc.) e das características que a aplicação pretendida requer do pó. Há processos mecânicos, como a quebra e moagem, processos de atomização (pulverização), processos físicos, processos químicos e termoquímicos. Cada processo de produção do pó leva a um pó com um conjunto de propriedades distintas, e a escolha do método de fabricação do pó depende de características como tamanho e distribuição de tamanho de partícula, superfície específica, compressibilidade, escoabilidade e densidade aparente do pó, necessárias à obtenção do sinterizado com as propriedades mais adequadas a cada aplicação específica (CHIAVERINI, 1992; GERMAN, 1984).

A seguir estão relacionadas algumas das principais características dos pós metálicos (CHIAVERINI, 1992; GERMAN, 1984):

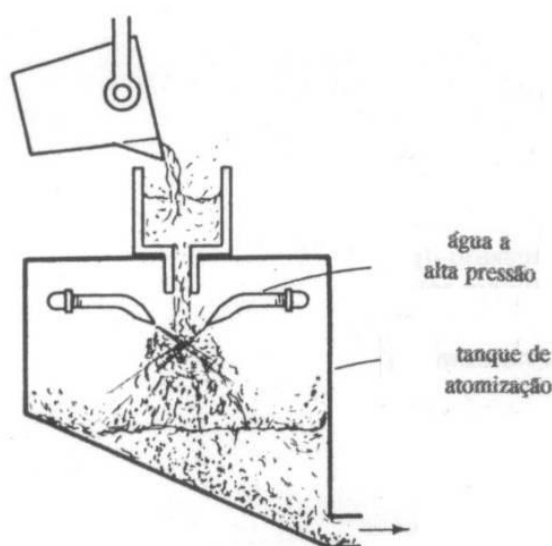
- a pureza e a composição química são muito importantes, pois um nível muito

elevado de impurezas pode alterar as propriedades do produto final, levando a resultados indesejáveis;

- a forma e o tamanho da partícula são outras duas características importantes no pó metálico, devido às influências que causam como densidade aparente, densidade verde, velocidade de escoamento, compressibilidade e superfície aparente. A resistência dos compactados decresce com o aumento do tamanho de partícula do pó, ao passo que a densidade verde cresce.

A Figura 2.2 a seguir mostra o processo de obtenção de pós por *atomização com água*, em que o material fundido é submetido a um jato de água, solidificando-se em partículas.

Figura 2.2 – Processo de obtenção de pós por atomização.



Fonte: KLAR, 1984.

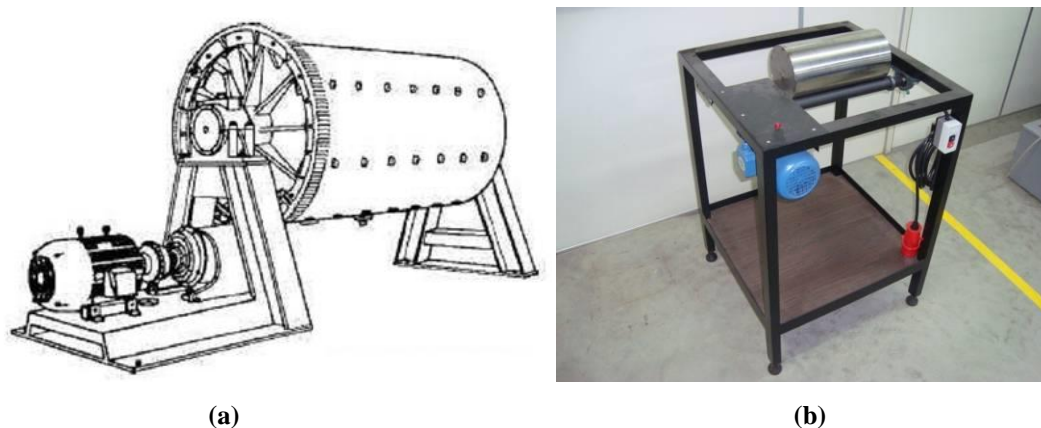
O processo de atomização é utilizado, por exemplo, para obtenção de pós metálicos ou ligas, e quando forem desejáveis partículas com dimensões menores ou de diferentes formatos, é possível submeter-se tais pós a processos de redução, tais como os processos de moagem em moinho de bolas ou em moinho atritor, de acordo com o requerido.

O moinho de bolas, basicamente, é um tambor, podendo ser construído de material cerâmico ou de aço, conectado a um eixo de um motor, ou a um conjunto motor-redutor, capaz de fazer o tambor girar. Para a preparação de pós para uso em M/P, os pós constituintes têm suas massas medidas nas devidas proporções, sendo colocados no interior do tambor. Este processo pode ser utilizado para duas funções: promover uma mistura mais homogênea do

material a ser compactado ou reduzir o tamanho das partículas de pó. O princípio de funcionamento consiste no impacto das esferas com as partículas de pós durante algumas horas, causando a diminuição do tamanho destas. O giro do tambor com as esferas em seu interior também proporciona a aproximação das partículas de diferentes pós, misturando-as de forma mais homogênea, facilitando assim, o processo de difusão quando da sinterização da liga (MORO; AURAS, 2007).

A Figura 2.3-(a) mostra um esboço de moinho de bolas, e a Figura 2.3-(b) mostra a fotografia de um moinho de bolas (oficina da Feevale).

Figura 2.3 – Moinho de bolas: (a) Esboço de um modelo, (b) Fotografia (Feevale).

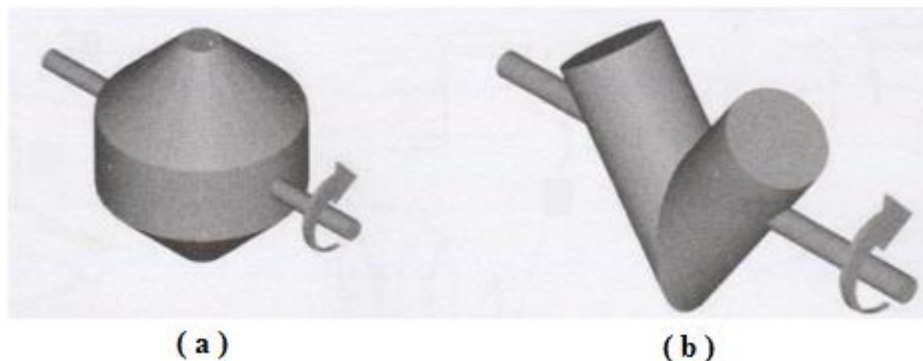


Fonte: (a) MORO, 2007; (b) AUTOR.

Na etapa de mistura dos pós é definida a composição química do material, pois no carregamento do misturador são adicionados os elementos de liga ao metal base nas devidas proporções em massa. Na carga de pó(s) no misturador deve ser adicionado um lubrificante, que tem por finalidade a redução do atrito do pó e da força de extração das peças da matriz durante a etapa de compactação. Esse lubrificante (ex.: estearato de zinco), geralmente é sólido e não deve ultrapassar a proporção de 2% da massa total do pó, sendo facilmente extraído durante o processo de sinterização. Assim, este não influencia a composição química da liga (CHIAVERINI, 1992; FUCHS, 2008).

A mistura realizada de forma correta evita a formação de aglomerados de pós, proporcionando uma homogeneização das partículas de pós. Para tanto, deve-se executar o controle do tempo de mistura, normalmente, em torno de 15 minutos. A Figura 2.4 mostra dois modelos utilizados para mistura de pós (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

Figura 2.4 – Exemplos de modelos de misturadores: (a) cone duplo, (b) dupla concha ou “V”.

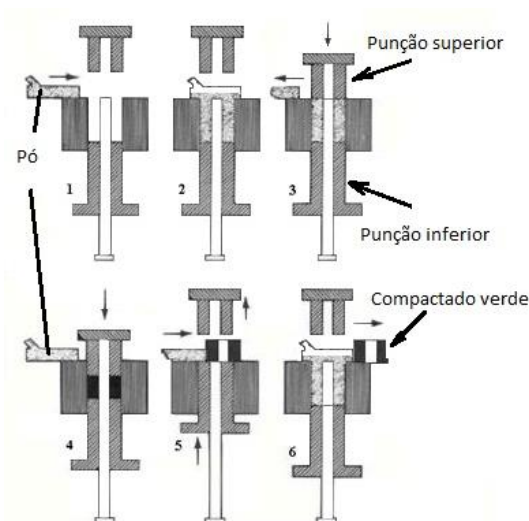


Fonte: GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009.

2.1.3 Compactação

Em sequência, após a mistura dos pós, na etapa seguinte coloca-se o pó metálico misturado (liga em pó) em uma matriz e executa-se sua compactação, procedimento realizado pela pressão exercida por dois punções, um superior e outro inferior, à temperatura ambiente, Figura 2.5. A força dos punções sobre o pó na matriz proporciona o aumento na densidade do material, devendo ocasionar uma deformação plástica dos grãos, de modo que após sua ejeção da matriz, a peça compactada permaneça em sua forma final. A peça compactada e ainda não sinterizada recebe a denominação de compactado verde, sendo uma peça mecanicamente frágil (ESSWEIN, 2009).

Figura 2.5 – Etapas da compactação em matriz de duplo efeito: (1, 2 e 3) preenchimento da matriz; (4) compactação; (5 e 6) ejeção e remoção do compactado verde.

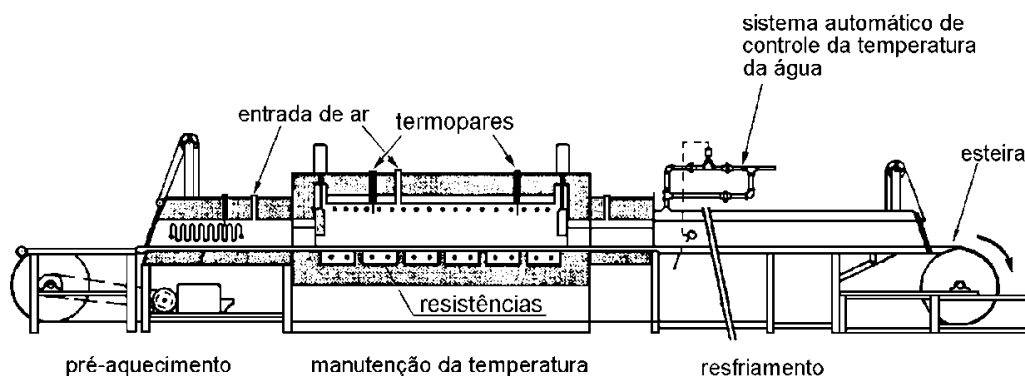


Fonte: ESSWEIN, 2009.

2.1.4 Sinterização

A resistência mecânica da peça recém compactada (verde) é obtida somente após o processo de sinterização, que consiste em colocar-se a peça verde em um forno com atmosfera controlada, Figura 2.6. Este é constituído de três zonas de operação: zona de preaquecimento, zona de aquecimento, aonde a temperatura tem valor de 70% a 80% da temperatura do ponto de fusão do metal base, e zona resfriamento. Em cada um dos estágios do forno a peça deverá permanecer por um período de tempo de acordo com as características desejadas para a peça sinterizada (ESSWEIN, 2009).

Figura 2.6 – Forno contínuo industrial empregado na sinterização de pós metálicos e cerâmicos.



Fonte: ESSWEIN, 2009.

2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DE INTERESSE

2.2.1 Introdução

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

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

As propriedades físicas dos materiais obtidos por metalurgia do pó (M/P) são influenciadas devido às imperfeições (poros) na estrutura. Uma das vantagens do processo da M/P consiste no controle sobre determinada característica desejada da peça (ESSWEIN, 2009).

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

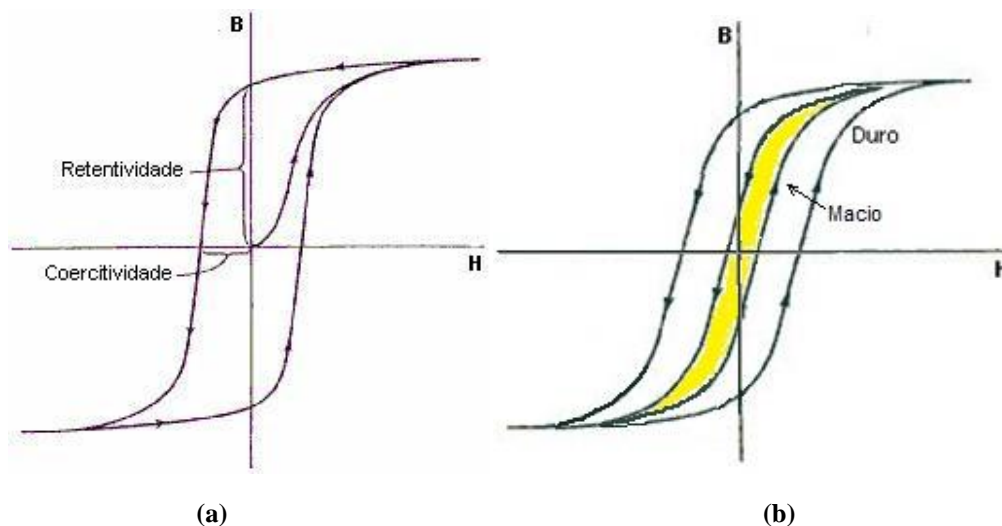
2.2.2 Propriedades magnéticas dos materiais aplicados em motores elétricos

As propriedades magnéticas são obtidas a partir da curva de histerese, que relaciona campo magnético \mathbf{H} aplicado a um material magnético, com a indução magnética \mathbf{B} resultante. Para os materiais magnéticos duros ou ímãs permanentes, a relação $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$ tem as características mostradas na Figura 2.7-(a). Os materiais magnéticos macios como os aços magnéticos, possuem um ciclo de histerese mais estreito com baixa coercitividade. A Figura 2.7-(b) mostra gráficos comparativos entre estes dois tipos de materiais (JILES, 1991; KRAUS, 1978).

O ponto em que a curva intercepta o eixo de \mathbf{B} , nos quadrantes superiores, é denominado de indução remanente ou retentividade \mathbf{B}_r e representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado ($H = 0$). No sistema CGS de unidades (mais utilizados para caracterização de materiais magnéticos), \mathbf{B} é dado em Gauss [G]. O ponto em que a curva intercepta o eixo de \mathbf{H} nos quadrantes do lado esquerdo é denominado de força coercitiva ou coercitividade, \mathbf{H}_C , e representa o campo magnético

necessário para desmagnetizar o material ($B = 0$). No sistema CGS \mathbf{H} tem como unidade o Oersted (Oe) (BULARZIK; KOKAL, 1997; JANSSON, 1992; KRAUSE, 1997).

Figura 2.7 – Ciclo de histerese – (a) para um material magnético duro; (b) comparação entre material magnético macio e duro.



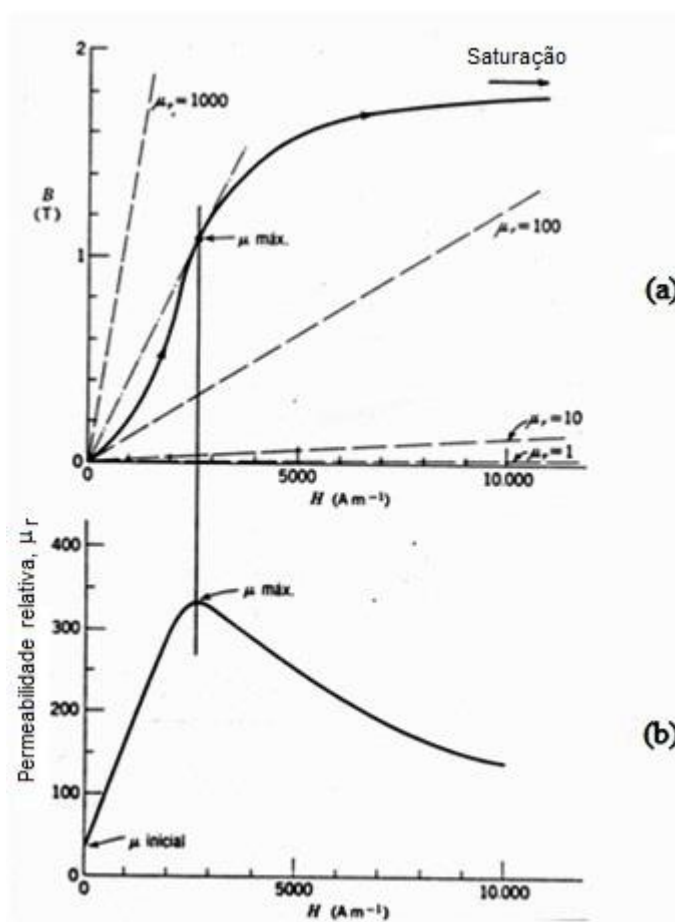
Fonte: KRAUSE, 1997.

A permeabilidade magnética do material ferromagnético corresponde à tangente da curva $B \times H$, ou seja, está relacionada com a declividade da curva de histerese. Para o seu valor é considerado o trecho de maior declividade, sendo expressa pela seguinte relação

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.1)$$

Uma curva típica de um material magnético é mostrada pela curva sólida da Figura 2.8-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 Figura 2.8-b, por sua vez, mostra um gráfico de permeabilidade relativa como função do campo \mathbf{H} aplicado. A permeabilidade relativa máxima está no ponto da curva de magnetização onde a relação $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$ é máxima, designada por μ_{\max} (JANSSON, 1992; KRAUSE; BULARZIK; KOKAL, 1997).

Figura 2.8 – (a) Curva de magnetização típica; (b) relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado H.



Fonte: JANSSON,1992.

2.2.3 Resistividade Elétrica

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

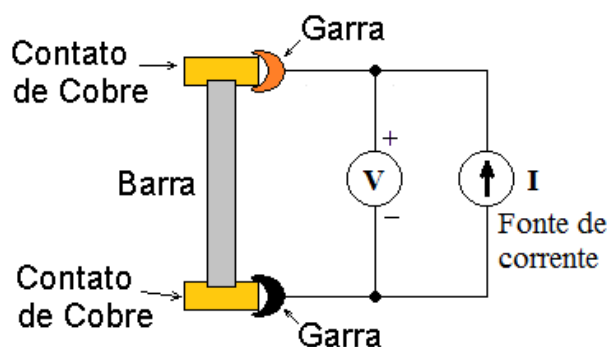
$$R = \frac{V}{I} \Rightarrow \rho = R \frac{A}{l} = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{l} \quad (2.2)$$

sendo, R: resistência elétrica (Ω);
 V: tensão elétrica aplicada (V);

- I : corrente elétrica aplicada (A);
 ρ – resistividade elétrica ($\Omega.m$);
 A : área da seção transversal da barra (m^2);
 l : comprimento da barra (m).

A Figura 2.9 mostra o desenho esquemático do dispositivo para determinação da resistividade. Uma fonte de tensão contínua V fornece uma corrente contínua I , e um voltímetro de precisão indica a tensão sobre a barra. Observa-se neste desenho a existência de contatos de cobre e garras, tornando possível a aplicação de uma pressão sobre os contatos de cobre, diminuindo a resistência de contato.

Figura 2.9 – Desenho esquemático do dispositivo para determinação da resistividade de materiais.



Fonte: AUTOR.

Com relação à resistividade elétrica, esta deve possuir o maior valor possível para minimizar o efeito das correntes parasitas. Sempre que há a incidência de um fluxo alternado sobre um núcleo magnético, haverá também correntes induzidas (correntes parasitas ou de Foucault) sobre este núcleo. Tanto o estator como o rotor são construídos com chapas laminadas e isoladas uma vez que esta isolamento entre chapas restringe as correntes induzidas a uma menor área de circulação. As perdas por correntes parasitas em um núcleo maciço são consideravelmente maiores que as perdas em núcleos obtidos a partir de chapas isoladas eletricamente. Quanto menores as espessuras das chapas, menores são as correntes parasitas e menores as perdas 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 et al., 2008).

2.2.4 Propriedades mecânicas

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

2.3 FATORES CONSTRUTIVOS QUE INFLUENCIAM NO DESEMPENHO DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

Para a construção dos núcleos do rotor e do estator, devem ser empregados materiais com alta permeabilidade magnética relativa, de maneira que quanto mais elevado for o valor desta, maior será o rendimento da máquina (NASAR, 1987; FITZGERALD et al., 2008).

A seguir, são apresentados os principais fatores relacionados aos aspectos construtivos que interferem no desempenho das máquinas elétricas rotativas, quais sejam:

- o conjugado magnético das máquinas elétricas rotativas está diretamente relacionado à intensidade do fluxo magnético no entreferro. Assim, torna-se necessário que as peças magnéticas possuam uma elevada permeabilidade magnética, minimizando as perdas magnéticas nestas, concentrando um maior número de linhas de fluxo nas mesmas (NASAR, 1987; FITZGERALD et al., 2008);

- a indução magnética de saturação deve ser a maior possível, tal que as peças magnéticas da máquina elétrica rotativa possam funcionar com alto fluxo magnético, mas sem que a saturação seja atingida (NASAR, 1987; FITZGERALD et al., 2008);

- outro fator que interfere no rendimento das máquinas elétricas rotativas refere-se às perdas por ciclos de histerese, as quais devem ser as menores possíveis. Por este motivo, os núcleos do rotor e do estator são construídos de material magnético com baixos valores de coercitividade e de retentividade, obtidos a partir de laços de histerese mais delgados. A área interna dos ciclos de histerese corresponde a uma densidade de energia consumida na

orientação dos domínios magnéticos, que produz calor. Os materiais que apresentam ciclos estreitos são denominados de materiais magneticamente macios, possuindo baixa coercitividade e baixa retentividade. Determinam-se as perdas por histerese P_h (W/kg) utilizando-se a expressão (2.3) abaixo(NASAR, 1987; FITZGERALD et al., 2008):

$$P_h = \frac{f \cdot W_{cmp}}{\rho_m} \quad (2.3)$$

sendo:

f : frequência do fluxo magnético (Hz);

ρ_m : densidade do material magnético (kg/m³);

W_{cmp} : densidade de energia armazenada no campo magnético [J/m³] (área do laço de histerese);

- a diminuição do rendimento tem origem também nas perdas devido às correntes parasitas, conhecidas como correntes de Foucault, as quais são decorrentes da circulação no interior do núcleo magnético do fluxo magnético alternado, que induz correntes transversais. Deste modo, há a redução da intensidade destas correntes a partir de dois caminhos, ou se laminam os núcleos, restringindo-se o caminho percorrido pelas correntes parasitas, uma vez que são transversais; ou aumenta-se a resistividade elétrica transversal dos mesmos. Em termos práticos, na realidade aumenta-se a resistividade elétrica de todo o material, o que produz uma diminuição na intensidade do fluxo magnético. Assim, quando é necessário um motor com elevado rendimento, o fabricante opta por construir os núcleos do rotor e do estator usando chapas de aço silício, que apresentam uma resistividade elétrica maior que aquelas de aço de baixo carbono. A circulação das correntes secundárias (parasitas) gera calor por efeito Joule, cujas perdas podem ser determinadas a partir da equação 2.4, aonde P_p se refere às perdas por calor (J), k , à constante de proporcionalidade, B , à indução magnética (T), f , à frequência elétrica do campo magnético [Hz], x , à espessura da peça magnética (m) e ρ_e corresponde à resistividade elétrica (Ω.m) (NASAR, 1987).

$$P_p = k \frac{B^2 \cdot f^2 \cdot x^2}{\rho_e} \quad (J) \quad (2.4)$$

Portanto, baseado no que foi descrito acima, os núcleos do rotor e do estator devem possuir as seguintes características:

- elevada indução magnética de saturação;
- elevada permeabilidade magnética;
- baixa coercitividade magnética;
- baixa retentividade magnética;
- elevada resistividade elétrica transversal, ou resistividade elétrica relativamente alta, de forma a diminuir as perdas por correntes parasitas, sem comprometer o fluxo magnético.

2.4 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS SINTERIZADOS

As propriedades físicas dos materiais obtidos por M/P convencional ou por moldagem de pós por injeção (MPI ou MIM) como, por exemplo, as magnéticas e elétricas, são influenciadas por vários fatores, dos quais, aqueles considerados de maior importância no desenvolvimento deste trabalho, estão relacionados a seguir:

- a resistividade de um elemento metálico aumenta quando são adicionadas impurezas, uma vez que estas impurezas provocam distorções no reticulado cristalino. Quanto maior as imperfeições da rede cristalina, maior será sua resistividade. Por esta razão, as maiores resistividades em metais são obtidas em ligas compostas de dois ou mais metais, nas mesmas proporções, ou em proporções próximas. Nestas condições, há uma interpenetração das redes cristalina dos materiais presentes na liga. Por este motivo, ocorre um aumento da resistividade do ferro sinterizado, quando outros elementos como o Si, P ou Ni são adicionados (LUBORSKY; LIVINGSTON; CHIN, 1996);

- a adição de silício ao ferro, além de aumentar a resistividade elétrica, aumenta também a permeabilidade magnética relativa máxima, diminui a coercitividade, contudo, diminui também a indução de saturação (LALL; BAUM, 1998);

- a maioria dos materiais metálicos ferrosos obtidos a partir da M/P ou MIM possuem resistividade elétrica maior do que materiais maciços de mesma composição química, devido, principalmente, à porosidade e a oxidação superficial das partículas (LALL, 1992). Com o aumento da porosidade, há uma diminuição da permeabilidade magnética, uma diminuição da indução de saturação e um aumento da coercitividade (JAMES, 1979);

- a resistividade elétrica para a maioria das ligas metálicas também é função do tamanho de grão. Quanto menor o tamanho de grão, maior a quantidade de contornos de grãos, que também provocam distúrbios na rede cristalina, aumentando a resistividade. Entretanto, a diminuição do tamanho de grão causa um decréscimo da permeabilidade magnética e um aumento da coercitividade (LANDGRAF, 1989);

- o aumento da granulometria do pó aumenta a permeabilidade magnética, mas aumenta também a coercitividade (LANDGRAF; PLAUT, 1989). Além disto, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização também alteram algumas propriedades físicas (LALL, 1992);

- impurezas como carbono, nitrogênio e oxigênio também afetam as propriedades magnéticas das ligas de ferro sinterizadas. Quando o objetivo é a obtenção de materiais magnéticos de boas propriedades, é conveniente que os percentuais destas impurezas sejam mantidos nos seguintes níveis (LALL, 1998):

- carbono: 0,01% máximo;
- oxigênio: 0,02% máximo;
- nitrogênio: 0,01% máximo;

Os materiais sinterizados mais comumente utilizados são os seguintes (LALL, 1998; LENEL, 1984; BAS, 1988):

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

A Tabela 2.1 mostra o quadro comparativo resumido, das propriedades físicas de interesse das principais ligas magneticamente macias sinterizadas (JANSSON, 1992).

Tabela 2.1 - quadro comparativo das propriedades físicas das diversas ligas sinterizadas magneticamente macias (1).

Liga	ρ_s (g/cm ³)	B_m (T)	B_m (kG)	B_r (T)	B_r (kG)]	H_c (A/m)	H_c (Oe)	μ_r	ρ_e ($\mu\Omega.m$)
Fe	6,8	1,14	11,40	0,96	9,60	131	1,65	2900	0,14
	7,2	1,36	13,60	1,18	11,80	127	1,60	3700	0,12
	7,4	1,47	14,70	1,29	12,90	119	1,50	4700	0,11
Fe-0,45%P	7,0	1,23	12,30	0,99	9,90	96	1,20		0,23
	7,2	1,34	13,40	1,12	11,20	80	1,00	4800	0,21
	7,4	1,46	14,60	1,26	12,60	60	0,75		0,20
Fe-0,8%P	7,0	1,27	12,70	1,08	10,80	118	1,48		0,32
	7,2	1,32	13,20	1,13	11,30	119	1,49	-	0,30
	7,4	1,42	14,20	1,15	11,50	69	0,87		0,28
Fe-1,0%P	7,0	1,35	13,50	1,13	11,30	67	0,84		0,40
	7,2	1,38	13,80	1,15	11,50	64	0,80	-	0,38
	7,4	1,47	14,70	1,25	12,50	62	0,78		0,35
Fe-3%Si	6,8	1,17	11,70	0,94	9,40	104	1,30		0,59
	7,0	1,31	13,10	1,09	10,90	92	1,15	4900	0,55
	7,2	1,39	13,90	1,18	11,80	80	1,00		0,52
Fe-50%Ni	6,8	0,93	9,30	0,71	7,10	21	0,26		0,78
	7,1	1,09	10,90	0,80	8,00	20	0,25	21000	0,69
	7,5	1,27	12,70	0,94	9,40	19	0,24		0,60
Fe-81%Ni-2%Mo	7,8	0,72	7,20	0,48	4,80	6	0,07	77000	0,60
Fe-50%Co-2%V	7,2	1,24	12,40	0,73	7,3	175	2,20	-	-

Fonte: JANSSON, 1992

(1) As unidades estão apresentadas no SI e no sistema CGS.

2.5 MOTORES ELÉTRICOS OBTIDOS A PARTIR DA M/P

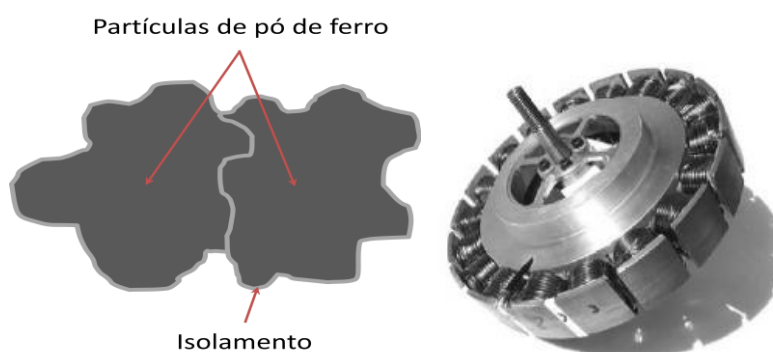
Utilizando-se os processos da M/P, é possível fabricar estes núcleos em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética (característicos dos aços magnéticos) e alta resistividade elétrica (JANSSON, 1992; KRAUSE, 1997). Na medida em que for possível construir motores elétricos em blocos únicos e maciços, menos etapas estarão presentes e menos energia será consumida na produção dos motores. Salienta-se, porém, que os motores elétricos convencionais com núcleos de chapas laminadas, via de regra, apresentam rendimento significativamente maior, se comparado a motores elétricos com núcleos maciços, mesmo aqueles obtidos a partir dos processos da metalurgia o pó. Assim, a aplicação da metalurgia do pó em núcleos de máquinas elétricas, fica restrita a motores elétricos especiais onde o rendimento não é o critério mais importante, ou em alguns servomotores onde os enrolamentos de armadura são alimentados com corrente elétrica de frequência elevada, podendo atingir até 600 Hz, por exemplo. Outra aplicação, é em geradores

com ímãs permanentes com grande quantidade de polos. Neste caso, apesar das correntes elétricas envolvidas serem de alta frequência, o giro do rotor pode ocorrer em baixas frequências, uma vez que a velocidade angular de giro de um rotor e a frequência das correntes neste são proporcionais, porém, esta relação depende também do número de polos da máquina. Observa-se também que, a partir dos 400 Hz de frequência de corrente elétrica, os núcleos magnéticos obtidos a partir dos processos da metalurgia do pó apresentam rendimento similar aos núcleos de chapas laminadas, podendo até mesmo atingir desempenho superior (JANSSON, 1992; KRAUSE, 1997).

Motores miniaturizados ou mini motores têm configurações idênticas às máquinas rotativas convencionais, porém em dimensões reduzidas, sendo os mais comuns o motor de passos, motor eletrostático e o motor de corrente contínua (GIERAS, 2008).

Um método alternativo da M/P para obtenção de núcleos de máquinas elétricas rotativas é a partir de Materiais Microencapsulados (*Soft Magnetic Composites*, ou simplesmente SMC). Estes são, basicamente, partículas de pó ferromagnético revestidas por filme isolante elétrico como polímeros e óxidos (Figura 2.10-a). Componentes SMC são produzidos utilizando técnicas tradicionais de metalurgia do pó. O processo de produção desses componentes, em linhas gerais, consiste em compactação e posterior tratamento térmico para cura da resina ou consolidação. A Figura 2.10-b mostra um núcleo do rotor de motor síncrono produzido por SMC (MATS, 1997).

Figura 2.10 – (a) Partículas de pó ferromagnético microencapsuladas com uma camada de isolante elétrico – (b) Núcleo de um motor síncrono fabricado.



Fonte: MATS, 1997

2.6 MOTORES DE PASSOS

2.6.1 Introdução às máquinas elétricas rotativas

As principais partes de uma máquina elétrica rotativa são o rotor e o estator. Algumas partes de um motor elétrico podem diferir em razão da alimentação (CC ou CA), e no caso de alimentação CA, diferem com relação ao tipo de alimentação, se monofásica ou trifásica.

Basicamente, as máquinas elétricas rotativas são classificadas segundo sua alimentação ou fonte. Estas podem ser:

- alimentação em corrente contínua (CC);
- alimentação em corrente alternada (CA);
- alimentação em corrente pulsante.

As máquinas com alimentação CC e CA não fazem parte do escopo do presente estudo, assim não serão tratadas. Os motores de passos são alimentados com corrente pulsante, em que as bobinas do estator deste motor são alimentadas com pulsos de corrente na forma de ondas retangulares, tipicamente geradas a partir de circuitos lógicos digitais. Enquanto os motores CC e CA geralmente são utilizados em acionamento contínuo, ou seja, com um eixo girando a uma velocidade angular, os motores de passos, geralmente, são utilizados para girar somente uma quantidade angular, múltiplos de um passo. Como exemplo, cita-se um motor de 180 passos, que corresponde aos passos necessários para este motor executar uma revolução em torno do seu eixo, ou seja, a cada passo o motor rotaciona 2 graus. Assim, para girar 60 graus, são necessários 30 passos.

2.6.2 Introdução aos motores de passos

O motor de passos é um dispositivo eletro-mecânico com capacidade de converter pulsos elétricos em movimento de rotação, movimentando uma carga a incrementos precisos, normalmente, com controle em malha aberta (QUEIROZ, RICARDO). Apresentam uma excelente resposta à partida, à parada e à reversão de movimento (MANTOVANI, SUELY; OKI, NOBUO).

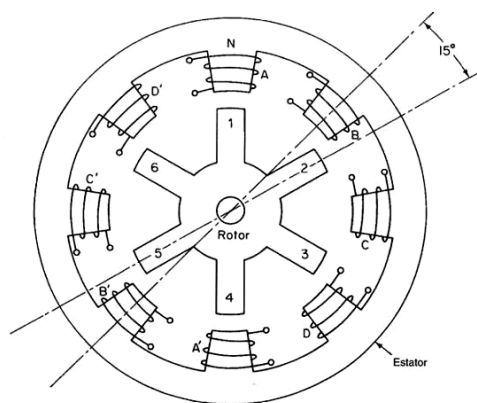
A primeira patente concedida para uma estrutura de motor de passo data do ano de 1919, na cidade de Aberdeen, na Escócia, a C. L. Walker, um engenheiro civil, que consistia de um motor de passo de relutância. Seu desenvolvimento comercial ocorreu somente a partir

de 1960, graças à invenção do transistor. Na década de 1970, sua produção teve rápido crescimento em função de sua aplicação bem sucedida em periféricos de informática, apresentado novo crescimento na década de 1980, quando passou a ser utilizado pela indústria (CATÁLOGO DE INFORMAÇÕES SOBRE MOTORES DE PASSOS. KALATEC).

2.6.3 Topologias dos motores de passos

Existem três tipos de motor de passos: de relutância, de ímãs permanentes e híbridos. A Figura 2.11 apresenta o motor de relutância de oito polos, sendo o estator constituído por quatro pares de pólos. O torque motor é produzido pela força magnética necessária ao alinhamento dos dentes do rotor com os pólos do estator, de forma a minimizar a relutância do caminho magnético entre o rotor e o estator. Neste tipo de topologia, o torque estacionário é zero, pois o rotor não possui magnetismo de retenção, sendo normalmente construído de ferro doce.

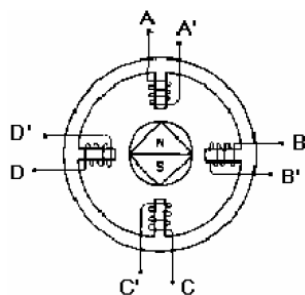
Figura 2.11 – Motor de passo de relutância de 8 polos.



Fonte: TORO, 1994

Na Figura 2.12 é mostrada a estrutura de um motor de passos de ímãs permanentes, em que estes constituem o núcleo do rotor (distribuído paralelamente ao eixo). Neste caso, como o núcleo do rotor possui um campo magnético retentor, existe um torque motor estacionário de retenção. O torque motor produzido por este tipo de topologia é maior que o de relutância. A máquina da Figura 2.12 dará passos de 90° quando as bobinas ABCD forem energizadas em sequência. Este tipo de motor possui, normalmente, passos de 45° ou de 90°, a taxas de passo relativamente baixas, mas possui alto torque (QUEIROZ, RICARDO).

Figura 2.12 – Motor de passo de ímãs permanentes.



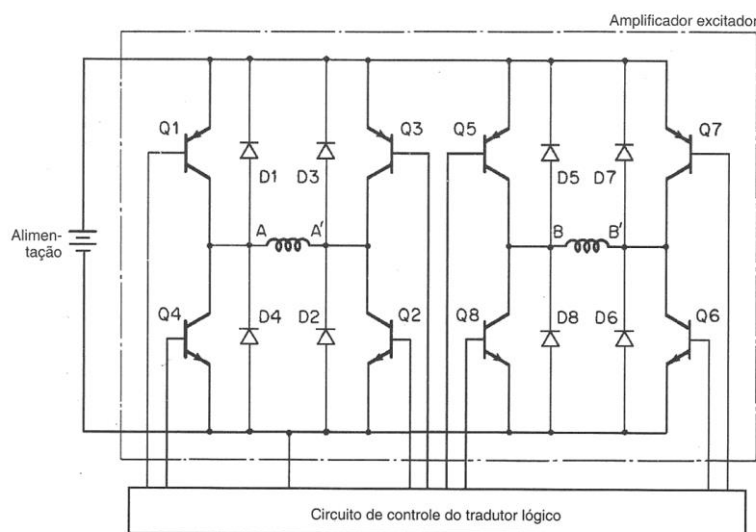
Fonte: TORO, 1994

Os motores de passos podem ser ainda unipolares ou bipolares, sendo que a vantagem dos unipolares consiste na facilidade do controle, porém o torque destes é inferior ao dos bipolares, os quais apresentam uma maior complexidade no seu circuito de controle, uma vez que a corrente nas bobinas do estator deve circular nos dois sentidos.

2.6.4 Acionamento de motores de passos

A Figura 2.13 mostra um circuito de acionamento de motor de passos bipolar de duas fases (A-A' e B-B') e quatro polos no estator. Para o correto acionamento deste tipo de motor a passo inteiro no sentido anti-horário, é necessário que as bobinas sejam energizadas segundo a sequência mostrada na Tabela 2.3, aonde o valor binário "1" representa condução e o valor binário "0", bloqueio (TORO, 1994).

Figura 2.13 – Diagrama do circuito de potência de um motor de passo bipolar.



Fonte: TORO, 1994

Tabela 2.2 – sequência de comando para avanço de 01 passo polar no sentido anti-horário.

Condução A-A'				Condução B-B'			
Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1

Fonte: TORO, 1994

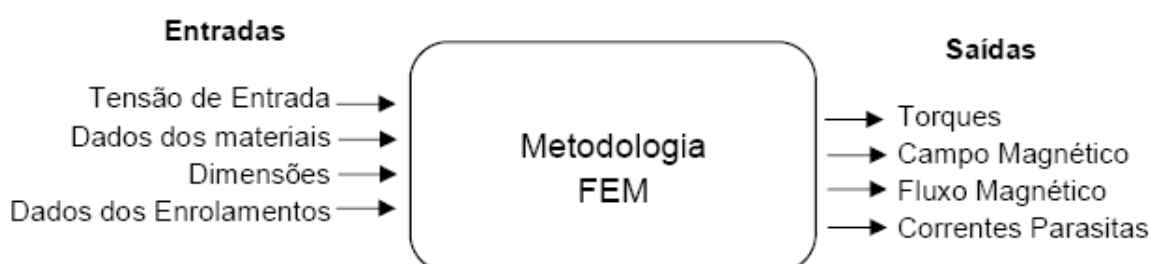
2.7 SIMULAÇÕES POR ELEMENTOS FINITOS

Os resultados das iterações eletromagnéticas de uma máquina elétrica rotativa podem ser obtidos através de simulações em *software* de elementos finitos FEMM 4.2 (*Finite Element Method Magnetics*) (MEEKER, 2010).

A metodologia de elementos finitos tem como objetivo a solução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas. A ideia principal consiste em dividir o material magnético em um grande número de regiões, cada uma delas com a geometria do triângulo. Em cada elemento, a solução é aproximada através de uma interpolação dos valores de cada vértice do triângulo.

A vantagem de dividir a área inicial em pequenos elementos é que a partir de uma área conhecida, torna-se possível resolver o sistema de equações diferenciais mais facilmente. Através do processo de discretização, é gerado um sistema de álgebra linear com milhares de variáveis. A solução do sistema ocorre com o auxílio de processadores, os quais através de algoritmos específicos são capazes de encontrar a solução em pouco tempo. A Figura 2.14 mostra um diagrama esquemático sobre a metodologia FEM.

Figura 2.14 – Metodologia FEM.



Fonte: MEEKER, 2010

O FEMM 4.2 é um conjunto de programas para resolver problemas de baixa frequência eletromagnética em planos bidimensionais com simetria axial. O *software* é dividido em três partes:

- ***Interactive Shell***: Múltipla interface com pré e pós processamento para os vários tipos de problema. Contém uma interface CAD (*Computer Aided Design*) para definição das propriedades do material e as condições de limite.

- ***Triangle.exe***: Modifica a região a ser solucionada em um número grande de triângulos, operação fundamental para a aplicação da metodologia de elementos finitos.

- ***Solvers***: Algoritmo para solução de problemas magnéticos e eletrostáticos. Cada solver utiliza os dados configurados que descrevem o problema para resolver as equações diferenciais de Maxwell, obtendo-se os valores de campo magnético desejado.

Através do FEMM 4.2, é possível verificar dados importantes, tais como o torque momentâneo da máquina elétrica, o fluxo concatenado em cada bobina e as perdas por corrente de Foucault. O conhecimento destes resultados permite ao projetista verificar a eficiência do motor e as propriedades que devem ser trabalhadas para atingir o ponto ideal de trabalho.

3 PARTE EXPERIMENTAL

3.1 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

3.1.1 Introdução

Para a fabricação dos núcleos do rotor e estator do mini motor, foi definida a liga Fe-50%Ni, uma vez que este estudo foi concebido tendo em vista a construção de um protótipo em escala três vezes maior que o protótipo original de um mini motor obtido a partir da moldagem de pós por injeção (MPI). Salienta-se que materiais obtidos a partir da M/P e MPI têm características semelhantes por se tratarem de processos também semelhantes. Assim, como a liga é idêntica ao projeto original, não houve a necessidade de se fazer maiores estudos comparativos entre as duas ligas mostradas na Tabela2.1. Entretanto, uma análise de tal Tabela permite concluir que a liga Fe-50%Ni possui, comparativamente, a maior resistividade elétrica, embora com decréscimo das propriedades magnéticas. Por se tratar de um projeto de um mini motor para movimento de uma pequena câmera para endoscopia, o torque exigido não possui valor elevado. Assim, o fluxo de entreferro é pequeno, bem como a indução de saturação.

A fim de verificar se as peças sinterizadas atendem às especificações requeridas de funcionamento do mini motor, foi realizado o levantamento das propriedades mecânicas, magnéticas e de resistividade elétrica das mesmas. Também, a partir da análise das imagens produzidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), foi possível visualizar-se a microestrutura do material.

Portanto, em função das necessidades iniciais apresentadas, foram produzidas peças sinterizadas na forma de cilindros e anéis, as quais serviram como corpos de prova para o estudo aqui proposto.

3.1.2 Matrizes para obtenção dos corpos de prova

A verificação das propriedades físicas de interesse para análise dos materiais estudados ocorreu a partir da geometria dos corpos de prova relacionados a seguir:

a) Corpos de prova na forma de anel (Figura3.1). Amostra utilizada para medição das propriedades magnéticas e valor de resistividade elétrica.

**Figura 3.1 – Amostras na forma de anel – (a) Matriz –
(b) Corpo de Prova (régua em cm).**



Fonte: PAULETTI, 2012.

b) Corpo de prova na forma de cilindro (Figura 3.2). Amostra utilizada para avaliação das propriedades mecânicas e micrografia.

**Figura 3.2 – Amostras na forma de cilindro – (a) Matriz –
(b) Corpo de Prova.**



Fonte: PAULETTI, 2012; (b) AUTOR.

3.1.3 Compactação e sinterização dos corpos de prova

Inicialmente, o pó de ferro puro foi colocado em um recipiente apropriado e sua massa foi medida em balança de precisão. Adicionou-se pó de níquel puro até que a massa deste se igualasse à massa do pó de ferro. A seguir, acrescentou-se estearato de zinco (lubrificante em pó) na proporção de 1% da massa total (pó de ferro e pó de níquel).

No procedimento seguinte, os componentes foram misturados em um misturador convencional durante o tempo de 15min, a uma velocidade de aproximadamente 1,0 rpm. Todos os corpos de prova foram compactados na prensa hidráulica mostrada na Figura 3.3, à pressão P de 500 MPa, ou seja:

$$P = 500MPa = 5 \times 10^8 \frac{N}{m^2} = 5 \times 10^4 \frac{ton}{m^2} = 5 \frac{ton}{cm^2} \quad (3.1)$$

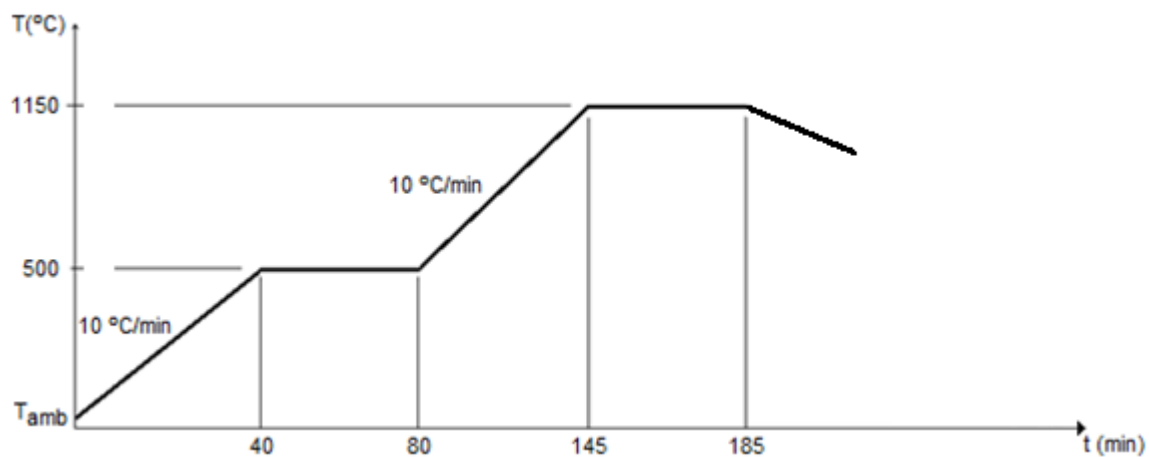
Figura 3.3 – Prensa hidráulica de 40 t – Laboratório de Mecânica – Feevale.



Fonte: AUTOR.

As peças compactadas verdes foram sinterizadas de acordo com a curva de sinterização mostrada na Figura 3.4 em forno fabricado pela Empresa Sanchis, Figura 3.5, com atmosfera de gás verde (composição com 5% de gás H_2) e deixadas para resfriar naturalmente até a temperatura ambiente.

Figura 3.4 – Temperatura x tempo no processo de sinterização.



Fonte: PAULETTI, 2012.

Figura 3.5 – Forno elétrico utilizado para a sinterização - Lab. Mecânica – Feevale.



Fonte: AUTOR.

3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS

3.2.1 Introdução

Na presente pesquisa, as propriedades físicas de interesse são: as magnéticas, sendo que há especial interesse no comportamento da magnetização do material; as elétricas, no caso, a resistividade elétrica apresentada; e as mecânicas, de forma a conhecer se a peça suportará as solicitações mecânicas durante o funcionamento da máquina.

3.2.2 Curvas de histerese

Na determinação das propriedades magnéticas básicas dos materiais utilizados em núcleos de máquinas elétricas rotativas, faz-se o uso da norma ASTM A773 (*American Society for Testing and Materials*, 2009), a qual determina o método e as condições para realizar-se a “plotagem” das curvas de magnetização e de histerese dos materiais magnéticos.

Figura 3.6 – Etapas de preparação do anel de Rowland: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento primário.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: AUTOR.

O método inicia pela preparação das amostras sinterizadas, que consiste na construção do enrolamento do primário e do secundário no anel, denominado Anel de Rowland – Figura 3.6. O procedimento é o seguinte:

- isola-se o anel com um filme de PVC (fita isolante) com o intuito de se evitar que os ângulos retos do anel coloquem espiras em curto circuito, Figura 3.6-a;
- bobinam-se as espiras do enrolamento secundário, Figura 3.6-b;
- ao fim desta etapa, fotografa-se o anel “enrolado” com o objetivo de se contar o número de espiras na imagem produzida;
- a seguir, faz-se um novo isolamento, semelhante àquele do 1º passo, Figura 3.6-c;
- bobina-se agora o enrolamento primário, Figura 3.6-d;
- por fim, fotografa-se a bobina do secundário e se conta a quantidade de espiras deste.

As perdas por laço de histerese foram calculadas a partir do próprio traçador de curvas magnéticas modelo *TLMP-TCH-14*. Salienta-se que este equipamento é conectado a um computador, e possui um *software* de controle e aquisição de dados, previamente instalado. Integrando a área do laço de histerese, resulta em J/m^3 , e a partir dos dados inseridos no *software*, com o número de espiras, corrente elétrica e massa, tal programa calcula as perdas por laço de histerese em W/kg . A seguir, recorre-se ao programa Microsoft Excel e obtém-se o desenho das curvas de magnetização e laço de histerese.

3.2.3 Resistividade elétrica

A obtenção da resistividade elétrica da liga Fe-50%Ni sinterizada é realizada por método indireto. Para tanto, aplica-se uma intensidade de corrente elétrica a partir de uma fonte de corrente contínua e mede-se o valor da tensão elétrica diretamente nos terminais da

respectiva peça, empregando-se um voltímetro na escala de milivolts. O corpo de prova para determinação da resistividade deve ter a forma de uma barra fina e comprida. Um artifício realizado consiste na utilização de anel, Figura 3.7, cortando-se um segmento do mesmo, fazendo que este tenha a forma de uma barra curvada, ou seja, de grande comprimento e pequena área de seção transversal. A unidade de resistividade elétrica no SI é [$\Omega \cdot m$]. Assim, para a determinação da resistividade elétrica da amostra sinterizada utiliza-se, primeiramente, a lei de Ohm, a qual é expressa por

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

sendo:

R : resistência elétrica (Ω)

V : tensão elétrica aplicada (V)

I : corrente elétrica aplicada (A)

A seguir, determina-se a resistividade elétrica aplicando-se a equação a seguir:

$$\rho = R \frac{A}{l} = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{l} \quad (3.2)$$

em que:

A : Área da Seção Transversal da Barra (m^2)

l : Comprimento da Barra (m)

ρ : resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$)

Figura 3.7 – Anel segmentado com terminais para medida da resistividade elétrica.



Fonte: AUTOR.

3.2.4 Propriedades mecânicas e micrografia

Para as propriedades mecânicas dos corpos de prova tem-se especial interesse na ductibilidade e na resistência à compressão, tendo em vista os esforços a que o motor será submetido quando em operação a plena carga, em virtude do torque resistivo da carga e das vibrações produzidas dentre outros.

Assim, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de Dureza Brinell e de resistência à compressão segundo as normas ASTM E10 e ASTM E9.

3.3 PROJETO DO MOTOR

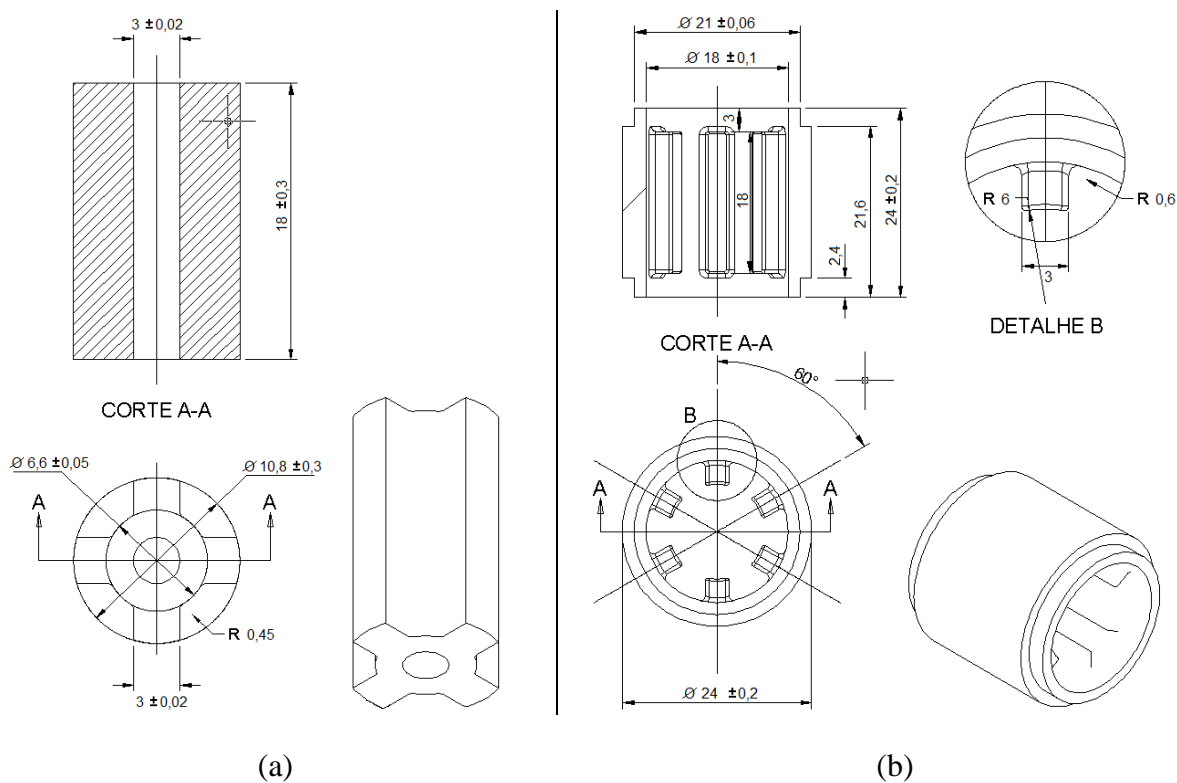
A seguir, é apresentado o desenho do mini motor realizado em CAD, sendo utilizado o projeto original realizado pelo prof. Egomar Rodolfo Locatelli, contratado pelo LdTM/GDER/UFRGS, engenheiro ex-projetista da Eberle Motores (atual Voges). O projeto teve origem a partir de um motor de passos, de dimensões três vezes menor, obtido a partir da moldagem de pós metálicos por injeção (MPI). O mini motor original foi projetado para ser acoplado à uma câmera para endoscopia. Assim, como o foco desta pesquisa não é o projeto do mini motor, não estão citadas as considerações de projeto do mesmo, as quais estão sob responsabilidade do Eng. Locatelli.

O mini motor da presente pesquisa possui exatamente a mesma topologia daquele em escala menor, sendo realizados apenas os ajustes necessários no bobinamento das espiras do estator. As Figuras 3.8 (a) e (b) mostram, respectivamente, o desenho dimensional dos núcleos do rotor e do estator. As Figuras 3.9 (a) e (b) mostram por sua vez, o desenho dimensional do eixo e uma vista completa do mini motor, e a Figura 3.10 apresenta o desenho dimensional das tampas. As características de bobinamento e corrente propostas inicialmente para simulação do mini motor estão relacionadas a seguir:

- bobinagem com fio bitola 34 AWG;
- 196 espiras para cada polo (392 por fase);
- corrente de 0,09A.

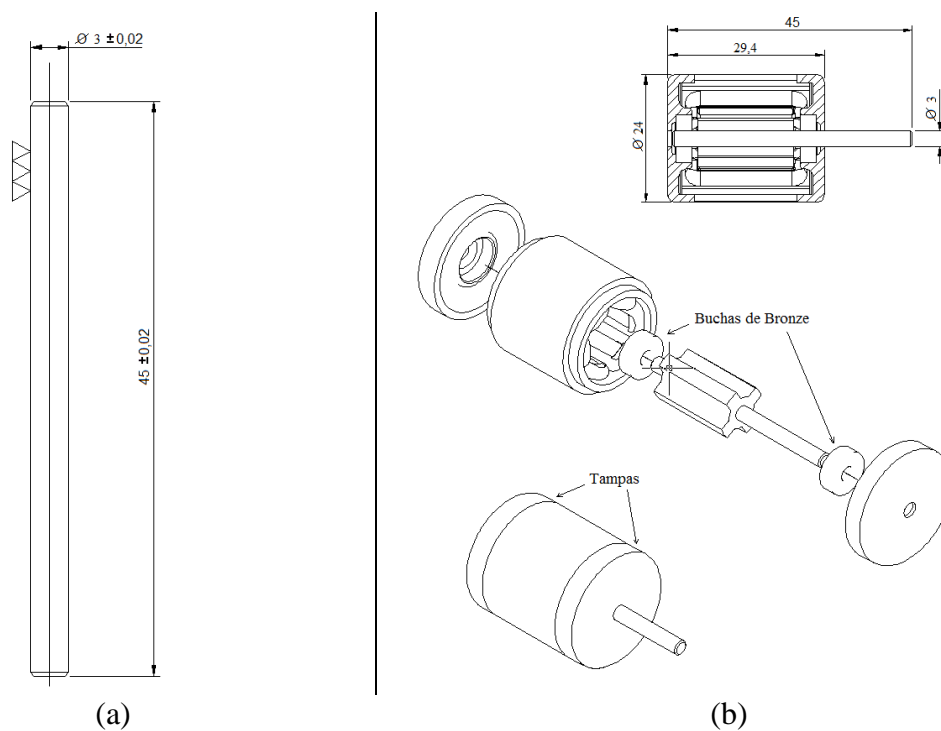
A partir do projeto e desenhos dimensionais, o mini motor resultante foi definido como um mini motor de passos com três fases (A, B e C). Considerando-se seis saliências no estator, ou seja, duas saliências por fase, obtém-se como resultado passos do rotor com deslocamento angular de 60° e para acionamento de meio passo, um deslocamento angular de 30° .

Figura 3.8 – Projeto do mini motor: (a) Rotor e (b) Estator.



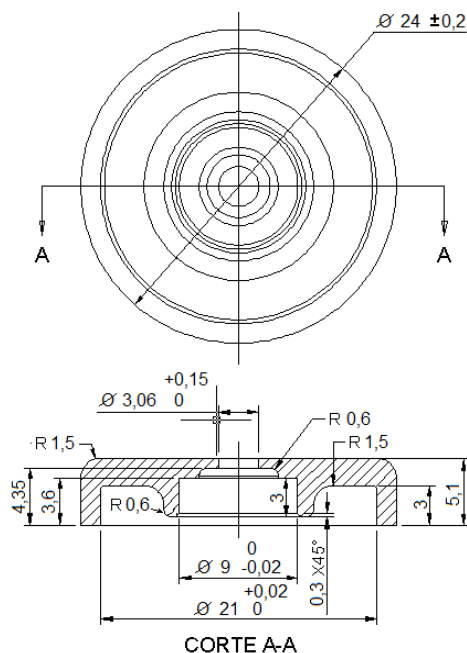
Fonte: LdTM/GDER/UFRGS

Figura 3.9 – Projeto do mini motor: (a) eixo e (b) motor completo.



Fonte: LdTM/GDER/UFRGS

Figura 3.10 – Projeto das tampas do mini motor.



Fonte: LdTM/GDER/UFRGS

3.4 SIMULAÇÃO DO MOTOR

As características de bobinamento e corrente propostas inicialmente para simulação do mini motor, estão relacionadas a seguir:

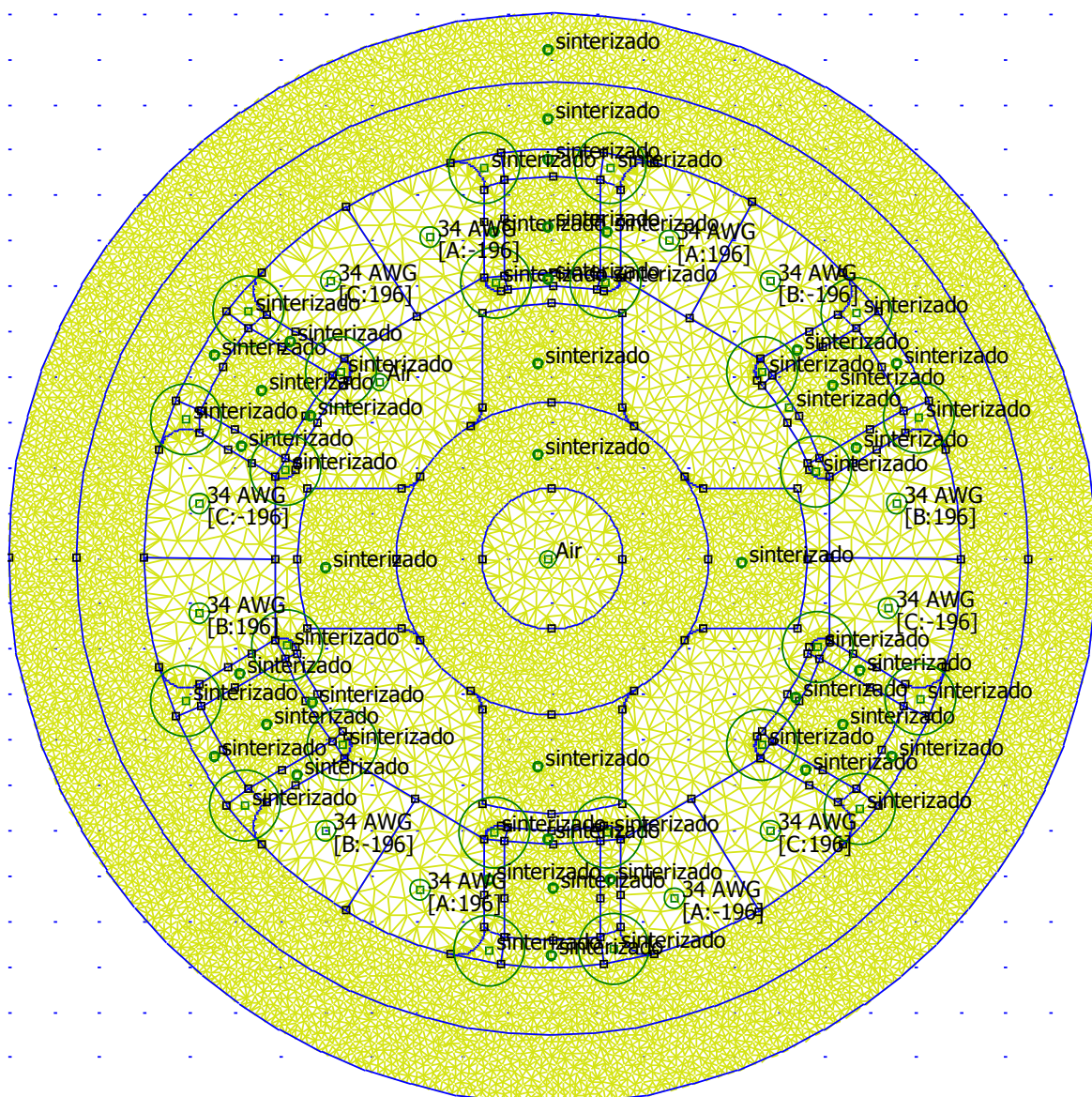
- Bobinagem com fio bitola 34 AWG
- 196 espiras para cada polo (392 por fase)
- Corrente de 0,09A

A simulação foi realizada a partir do programa FEMM 4.2, consistindo de simulações em *software* de elementos finitos (*Finite Element Method Magnetics*). Os dados iniciais de intensidade de corrente e número de espiras por polo na simulação inicial foram extrapolados no mini motor em escala menor, ou seja, do protótipo tomado como base para o desenvolvimento deste projeto. As extrapolações se deram a partir de considerações empíricas e da relação dimensional entre os dois motores.

O desenho dimensional do motor projetado (Seção 3.3) a partir da representação do mesmo em *Solid Works* foi inserido no FEMM 4.2, bem como os dados de corrente, número de espiras, diâmetro dos fios (escala AWG) e curva de magnetização do material do núcleo (seção 4.1.2).

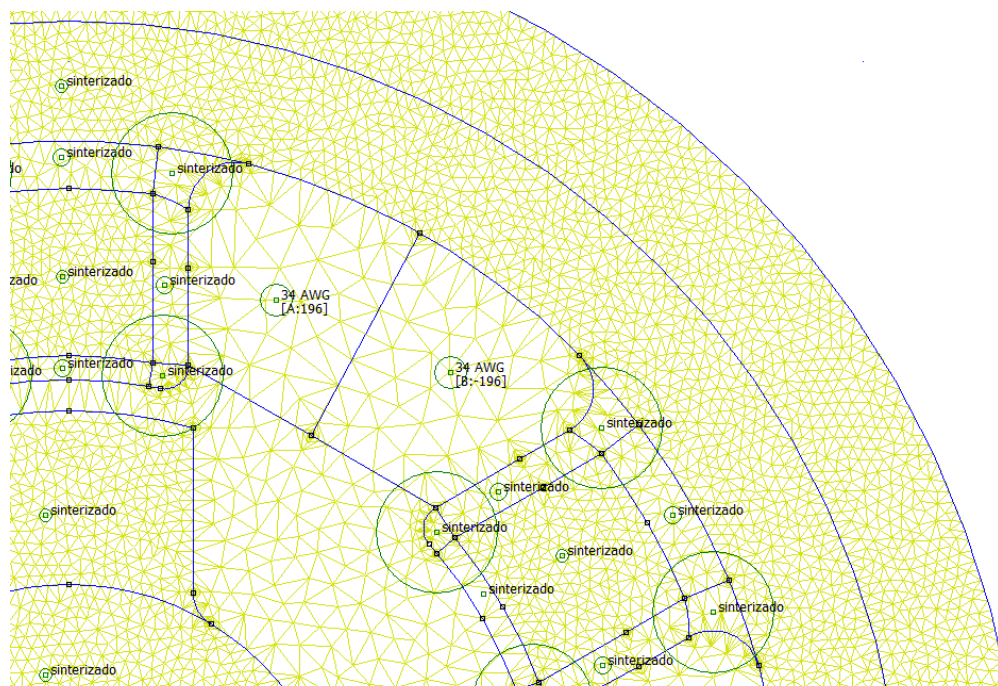
A Figura 3.11 mostra apresenta o detalhamento do pré-processamento (malha) e, pelo fato de ser uma imagem poluída de informações, o leitor deve recorrer à Figura 3.12, a qual mostra os detalhes da malha formada pelos triângulos produzida na simulação no FEMM 4.2.

Figura 3.11 - Detalhamento do pré-processamento (malha).



Fonte: Programa FEMM 4.2 – LdTM/GDER/UFRGS

Figura 3.12 – Detalhe da malha formada por triângulos produzida na simulação.



Fonte: Programa FEMM 4.2 – LdTM/GDER/UFRGS

3.5 MONTAGEM DO MOTOR

3.5.1 Introdução

Em motores com dimensões muito reduzidas, como o protótipo em escala menor tomado como base deste estudo, cujas dimensões são de 8 mm x 9,8 mm, a grande dificuldade reside na montagem do enrolamento do estator, visto que existe um compromisso da relação entre as indutâncias máxima e mínima no conjunto rotor/estator em motores de relutância variável, de modo a se obter o maior valor possível para tal relação (FITZGERALD et al., 2008). Isto tem influência na relação corrente elétrica x número de espiras do estator necessária ao fornecimento do torque exigido. Simplificando, normalmente encontrar-se-á como fator limitante na construção do enrolamento do estator a máxima ocupação da “janela” dos polos pelos condutores elétricos.

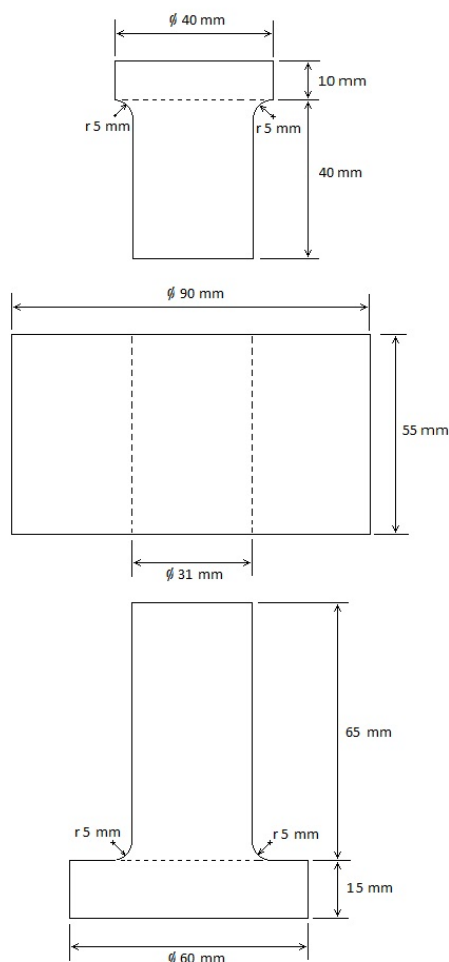
3.5.2 Obtenção dos núcleos do rotor e do estator

Os núcleos do rotor e estator e tampas foram usinados para a forma final do projeto dimensional do mini motor a partir de tarugos cilíndricos, da liga sinterizada Fe-50%Ni.

Optou-se pela confecção de cilindro e posterior usinagem devido ao alto custo de duas matrizes com os detalhamentos necessários para a compactação das três peças (rotor, estator e tampas). Salienta-se que a construção de matrizes para obtenção de peças com geometria complexa a partir dos processos da M/P tem um custo elevado, sendo na maioria dos casos viável somente quando tais peças forem produzidas em escala industrial. Assim, em muitos casos de desenvolvimento de protótipos, usa-se o artifício de se compactar cilindros, cubos ou anéis e, a partir destes, a usinagem para a forma final da peça em questão.

A Figura 3.13 mostra o desenho dimensional da matriz utilizada, pode-se observar que cilindros compactados a partir desta matriz possuem diâmetro de 31 mm.

Figura 3.13 – Desenho do projeto da matriz para compactação do estator, do rotor e das tampas.



Fonte: AUTOR.

Após a sinterização, ocorre uma contração de aproximadamente 1%, resultando, porém, em cilindros de diâmetro suficiente para a devida usinagem dos núcleos do rotor e estator e

tampas. A peça de maior diâmetro é o estator, possuindo 24 mm. Assim, o sobre-metal (metal em excesso) é mais que suficiente para a usinagem do mesmo.

As peças na forma de cilindros foram compactadas e sinterizadas de acordo com os parâmetros dos corpos de prova, ou seja, com pressão de 500 MPa e temperatura de 1.150 °C. A Figura 3.14 mostra as peças obtidas na forma de tarugos cilíndricos.

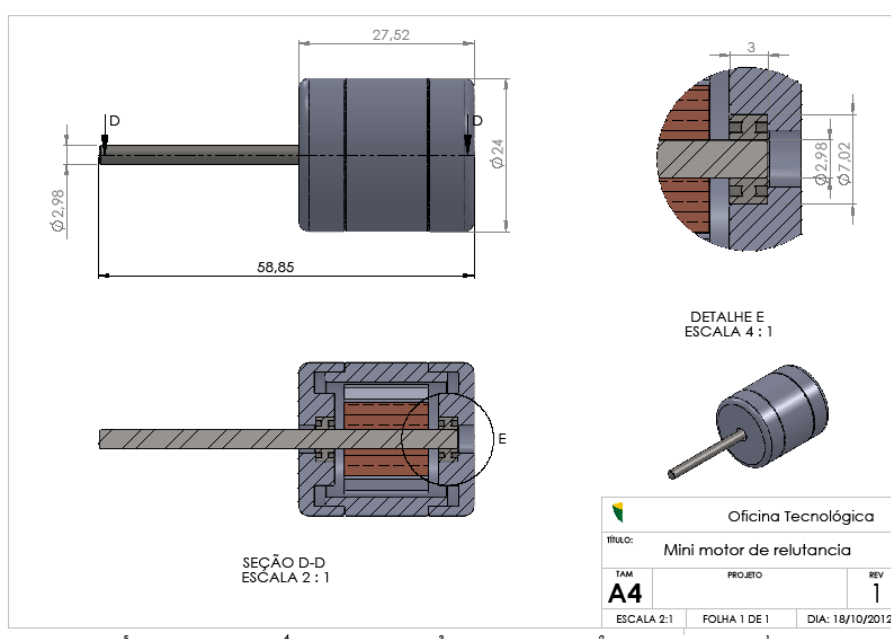
Figura 3.14 – Peças sinterizadas na forma de “tarugo” antes da usinagem.



Fonte: AUTOR.

A partir das peças sinterizadas na forma de tarugos cilíndricos, foram usinados os núcleos do rotor e do estator e as tampas para a forma final do projeto dimensional do mini motor. Inicialmente, foi realizada uma pré-usinagem nas peças e posteriormente, executada a eletro-erosão a fio, devido à complexidade na geometria das peças. A Figura 3.15 mostra desenhos dimensionais da forma final do mini motor.

Figura 3.15 – Desenhos dimensionais da forma final do mini motor.

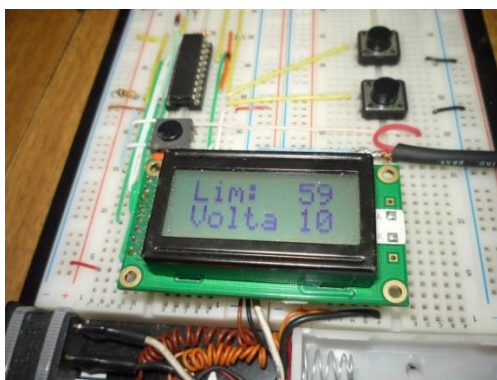


Fonte: Programa *Solid Works* – Laboratório Mecânica Feevale

3.5.3 Bobinamento do Mini motor

O mini motor foi bobinado com fio 33 AWG esmaltado, cada bobina com 59 espiras, na configuração de unipolar. Para tanto, foi produzido um bobinador, utilizando-se uma parafusadeira eletrônica da marca Tramontina de 12 V, sendo que a mesma foi alimentada com tensão de 1,5 V, de modo que girasse a baixa velocidade, algo em torno de 1,0 rpm, o circuito de controle da parafusadeira possuía um microcontrolador PIC16F690, um LCD 8x2, 02 botões: 01 para definir o número de voltas e o outro para ligar e desligar a parafusadeira através de um relé e um sensor do tipo *reed-switch*. Quando o número de voltas fosse atingido, o sistema desligava a parafusadeira automaticamente e uma mensagem era escrita no LCD (“FINAL OK”). Caso fosse necessário executar mais voltas, bastava pressionar no botão específico e definia-se a quantidade de voltas a mais. A partir daí, executava-se o controle do processo no botão liga/desliga. Na Figura 3.16 visualiza-se o LCD mostrando o limite de voltas igual a 59 e o número da volta em que se encontra a bobina. Também visualiza-se na respectiva figura parte do circuito de controle montado em matriz de contatos.

Figura 3.16 – Foto de parte do circuito de acionamento do bobinador.



Fonte: AUTOR.

Para bobinar-se cada uma das bobinas, foi necessário construir manualmente um carretel com as paredes em papel vegetal colado em camadas com adesivo instantâneo de acetato, de forma a dar sustentação suficiente e manter a bobina na sua forma final. Enrolavam-se umas 18 espiras e passava-se uma camada de verniz de secagem rápida, isto também era feito ao final do processo, de maneira a fornecer firmeza ao conjunto. A seguir, a bobina montada no carretel era colocada para secar por um tempo de 1,5 h -Figura 3.17, sendo retirada do carretel ao final deste processo.

Figura 3.17 – Foto de uma bobina em processo de secagem.



Fonte: AUTOR.

Com a bobina fora do carretel, era passada uma fina camada do adesivo instantâneo na sua parte interna, o que lhe conferia firmeza e maior proteção contra arranhões, quando fosse alojada no polo do estator. Após a secagem da cola interna, a bobina era colocada no molde de *nylon*, Figura 3.18, e eram executados os serviços de soldagem do cabinho encapado de bitola de $0,10 \text{ mm}^2$ (condutor de saída do mini motor). A outra extremidade da bobina era deixada com aproximadamente 8,0cm de comprimento, as quais formaram o comum do mini motor e foram conectadas a um cabinho de cor preta, que foi levado para a saída do motor, juntamente com os demais cabinhos coloridos. Assim, as conexões executadas tornaram o motor com configuração de unipolar, ou seja, (06 + 01) fios - um para cada bobina, mais o comum.

Figura 3.18 – Etapa de bobinagem, mostrando molde com carretel.



Fonte: AUTOR.

3.6 DISPOSITIVO DE ACIONAMENTO DO MOTOR

O mini motor foi bobinado como unipolar, possuindo seis bobinas com um condutor comum, no qual uma das extremidades das bobinas foi conectada. O comando foi concebido

para acionar duas bobinas de uma mesma fase. Assim, o mesmo pode ser considerado um motor de passos de relutância unipolar trifásico, com duas bobinas diametralmente opostas por fase sempre acionadas.

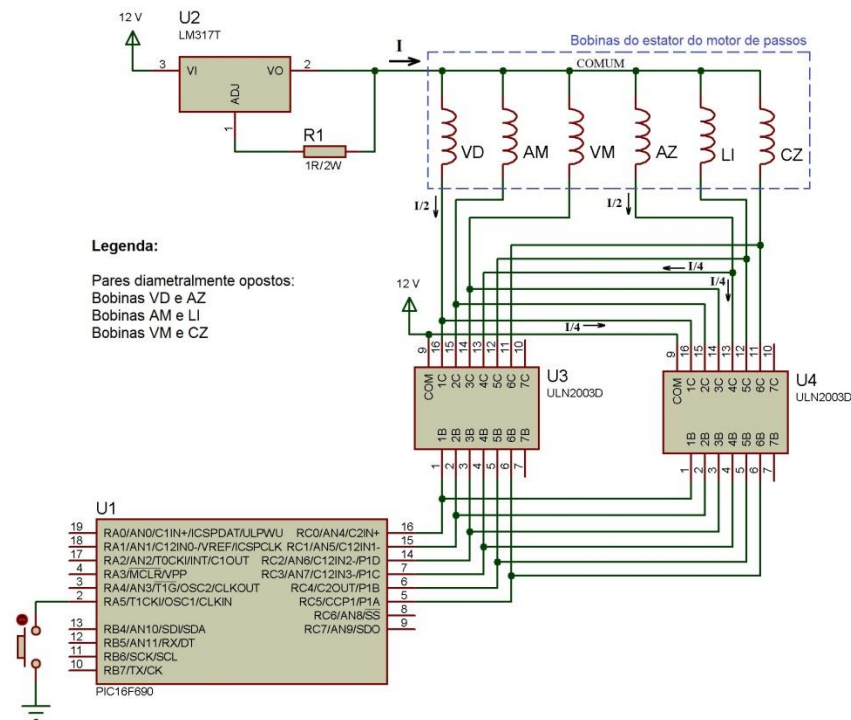
O circuito de acionamento foi projetado para acionar o mini motor de passos em corrente, sendo mostrado na Figura 3.19. No circuito o CI LM317T (U3) na configuração de fonte de corrente, a qual é mantida constante no valor de 1,2 A.

Os passos são definidos pelo cérebro do circuito, um microcontrolador da Microchip, o PIC 16F690. Este envia os pulsos digitais aos CIs ULN2003D (U2 e U4), os quais possuem em suas saídas transistores em coletor aberto. Cada saída destes CIs funciona como “chave” que liga e desliga uma bobina específica, de acordo com o comando enviado pelo microcontrolador.

O circuito eletrônico aciona duas bobinas opostas por vez, de modo a produzir torque suficiente para fazer o motor girar. Como a corrente elétrica entra no condutor comum do mini motor, circula em cada bobina a metade da corrente fornecida pela fonte de corrente, ou seja, 600 mA. Devido ao CI ULN2003D possuir capacidade máxima em corrente contínua de 500 mA e de pico de 600 mA, optou-se por conectar duas saídas deste componente em paralelo. Ainda, as bobinas de uma mesma fase (diametralmente opostas) foram conectadas em CIs distintos, de modo a manter-se a corrente máxima em cada CI em 600 mA por pino de saída. Como as bobinas são acionadas durante 1/3 do tempo, a corrente média por pino é de 200 mA, valor que é inferior aos 500 mA do CI.

Na Figura 3.20 é mostrado o programa, o qual foi editado em linguagem C para compilador *Hi-Tech* da *Microchip*. Após compilado, o programa foi armazenado no microcontrolador PIC16F690.

Figura 3.19 – Circuito de acionamento do mini motor de passos.



Fonte: circuito projetado pelo autor.

Figura 3.20 – Programa em linguagem C referente ao acionamento do mini motor.

```
#include <htc.h>

__CONFIG(FOSC_INTRCIO & MCLRE_ON
& WDTE_OFF & PWRTE_ON & BOREN_OFF
&
FCMEN_OFF & IESO_OFF);
#define _XTAL_FREQ (4000000)
unsigned char n=1;
#define BT RA5 //pino 2
void main(void)
{ ANSEL=0;
  ANSELH=0;
  TRISA=0b00100000;
  TRISB=0;
  TRISC=0;
  OPTION_REG=0b00111111;
  PORTA=0;
  PORTB=0;
  PORTC=0;

  while(1) {
    PORTC=0;
    while(BT==0) {
      switch(n) {
        case 1: PORTC=0b00001001;
                 break;
        case 2: PORTC=0b00010010;
                 break;
        case 3: PORTC=0b00100100;
                 n=0;
                 break;
        case 4: PORTC=0b00001001;
                 break;
        case 5: PORTC=0b00010000;
                 break;
        case 6: PORTC=0b00100000;
                 n=0;
                 break;
        default: break; }
      n++;
      __delay_ms(25); } } }
```

Fonte: AUTOR.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CORPOS DE PROVA

4.1.1 Introdução

Os corpos de prova obtidos a partir da liga sinterizada Fe-50%Ni possuem geometrias na forma de anel para avaliação das propriedades magnéticas e elétricas (Figura 4.1 –a) e na forma de cilindro para avaliação das propriedades mecânicas e estrutural (Figura 4.1-b).

Figura 4.1 – Corpos de prova: (a) cilindro; (b) anel.



Fonte: AUTOR.

4.1.2 Densidade dos corpos de prova

A Tabela 4.1 mostra os valores dimensionais, massa e densidade de quatro corpos de prova na forma de cilindros, considerando-se os valores compactados (verde) e após a sinterização (peça final). Na referida Tabela observa-se que após a sinterização, na média dos quatro corpos de prova, houve uma redução de massa de aproximadamente 1% (perda de massa do lubrificante), contração linear aproximada de 6,08% no diâmetro e na altura de 6,38%, e aumento da densidade de 18,6% na peça final, atingindo uma densidade 7.648,17 kg/m³ ou 7,65 g/cm³. Estes valores estão próximos aos valores encontrados nas referências bibliográficas para esta liga, os quais situam-se na faixa de 6,8 a 7,5 g/cm³ (JANSSON, 1992). Na verdade, a densidade obtida está um pouco acima da faixa da referência bibliográfica, contudo, tal referência não especifica exatamente a pressão aplicada na compactação, assim, os corpos de prova apresentam menor porosidade em sua estrutura interna. Importante salientar que pressões mais elevadas na compactação resultam em maior

densidade. Também fatores como pureza e granulometria dos pós constituintes e patamares de sinterização, entre outros, influenciam na densidade (CHIAVERINI, 2001).

Tabela 4.1 – determinação das densidades dos corpos de prova (cilindros).

Amostra	Massa verde (g)	Diâmetro verde (mm)	Altura verde (mm)	Massa Final (g)	Diâmetro Final (mm)	Altura Final (mm)	Densidade Verde (kg/m^3)	Densidade Final (kg/m^3)
1	44,06	31,03	8,99	43,61	29,28	8,51	6480,38	7610,33
2	47,50	31,07	9,81	47,03	29,27	9,12	6386,19	7664,61
3	48,28	31,04	9,94	47,82	29,25	9,39	6418,96	7578,34
4	49,23	31,04	9,95	48,72	29,28	9,35	6538,95	7739,40
Média	47,27	31,04	9,67	46,80	29,27	9,09	6456,12	7648,17

Fonte: AUTOR.

4.1.3 Propriedades magnéticas dos corpos de prova

A Tabela 4.2 mostra o levantamento dos dados relativos às propriedades magnéticas fornecidos pelo traçador de ciclos de histerese modelo *TLMP-TCH-14* (LdTM/GDER/UFRGS). É possível observar-se nela que a média da retentividade B_r resultou em 0,25 T, ficando fora da faixa de 0,71 a 0,94T, a média da coercitividade H_c resultou 273,44 A/m, ficando muito distante da faixa de 19 a 21 A/m, e a média da permeabilidade μ_r resultou em 372,64, ficando muito distante do valor indicado na literatura de 21.000 (JANSSON, 1992).

Salienta-se que, corpos de prova obtidos no LdTM / UFRGS com pressão de compactação de 600 MPa resultaram em coercitividade próxima de 1.000. Mesmo assim, as diferenças são bastante significativas quando comparadas aos dados literários. Entretanto, estudos preliminares no LdTM/GDER/UFRGS constataram que as ligas Fe-50%Ni obtidas a partir da simples mistura de pós elementares de Fe e Ni jamais resultaram em valores sequer próximos daqueles citados na literatura. Isto se deve ao fato de que os dados literários referem-se a corpos de prova obtidos a partir de pós pre-ligados, por atomização ou mecânico-síntese. De fato, dados experimentais realizados no LdTM com ligas pré-ligadas por Mecano-Síntese como Fe-Si e Fe-P resultaram em melhores propriedades magnéticas destas ligas aproximando-se dos dados bibliográficos, o que nunca ocorreu em ligas obtidas pela simples mistura dos pós constituintes, compactação e sinterização.

Tabela 4.2 – levantamento das propriedades magnéticas dos corpos de prova.

Amostra	B_r (T)	H_c (A/m)	B (μ_r) (T)	H (μ_r) (A/m)	μ_r	P_{mag} (W/kg)
Fe-50%Ni_A	0,25	233,52	0,20	368,80	438,87	0,005
Fe-50%Ni_B (*)	0,02	290,17	0,02	371,80	60,88	0,0005
Fe-50%Ni_C	0,25	313,35	0,18	458,19	306,40	0,005
Média	0,25	273,44	0,19	413,50	372,64	0,005

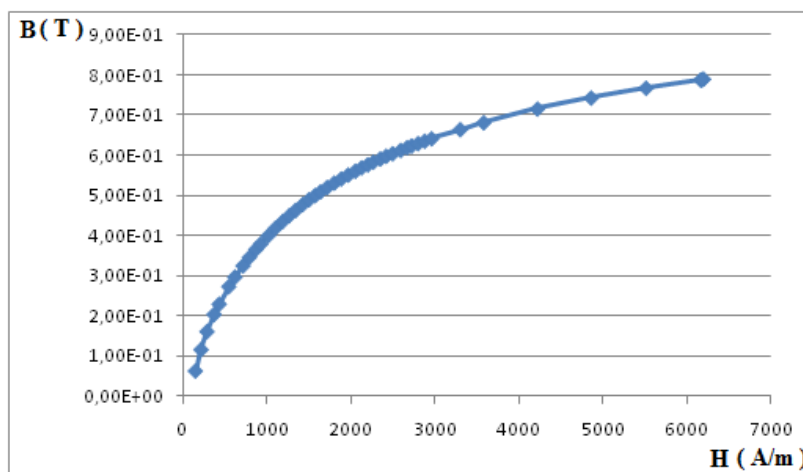
(*) Valor desprezado para cálculo da média.

Fonte: AUTOR.

Tal fato ocorre uma vez que, em ligas com percentuais elevados de ambos componentes, na sinterização, não ocorre difusão homogênea dos elementos da liga, resultando então, em regiões da peça sinterizada contendo aglomerados heterogêneos de Fe e Ni. Assim, a formação da liga ocorre somente nos limites das partículas dos pós constituintes, sendo que em outros domínios da peça tem-se somente partículas unidas de Fe puro ou Ni puro. Este é o motivo pelo qual se encontrou grandes diferenças nas propriedades da liga Fe50%Ni obtida pela simples mistura dos pós constituintes com ligas de pós pré-ligados (CHIAVERINI, 2001).

A Figura 4.2 abaixo mostra a curva de magnetização (amostra A – Tabela4.2) obtida com os dados fornecidos pelo traçador de ciclos de histerese modelo *TLMP-TCH-14* (LdTM/GDER/UFRGS). Esta mesma curva de magnetização foi utilizada para simulação do mini motor (FEM 4.2)

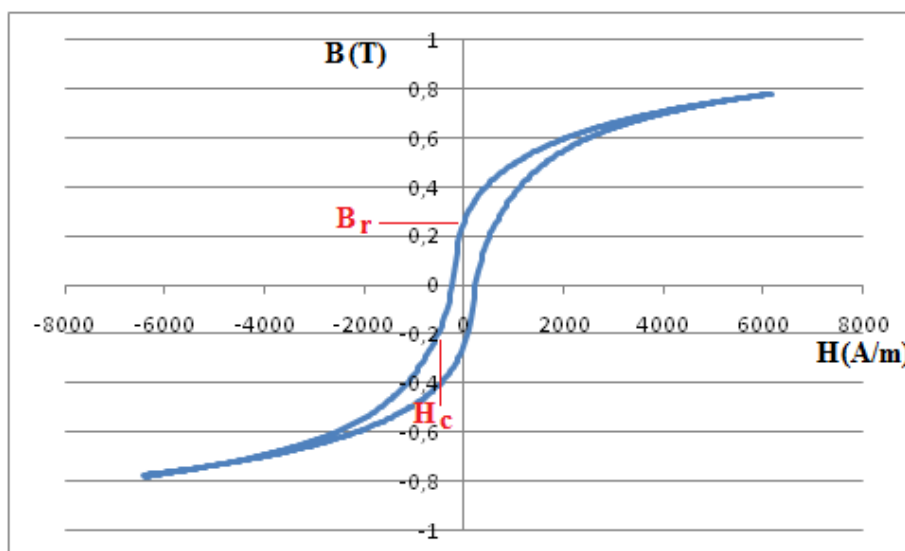
Figura 4.2 – Curva de magnetização obtida com auxílio do traçador de ciclos de histerese relativa ao corpo de prova em anel B da liga Fe-50%Ni sinterizada.



Fonte: traçador de ciclos de histerese modelo *TLMP-TCH-14* – LdTM/GDER/UFRGS

Na Figura 4.3 visualizam-se os ciclos de histerese para liga Fe-50%Ni sinterizada (a mostra A), obtidos a partir do traçador de curva de histerese modelo *TLMP-TCH-14* (LdTM/UFRGS), empregando-se o ensaio relacionado ao anel de Rowland, sendo evidenciados os pontos de indução magnética de retentividade (B_r) e o campo magnético coercitivo (H_c).

Figura 4.3 – Ciclo de histerese relativo ao corpo de prova A em anel.

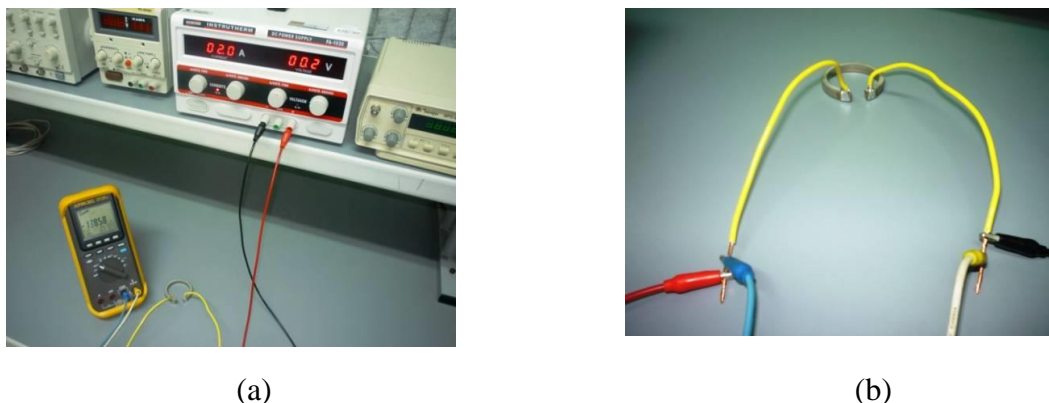


Fonte: traçador de ciclos de histerese modelo *TLMP-TCH-14*-LdTM/GDER/UFRGS

4.1.4 Resistividade Elétrica

Na Figura 4.4 visualiza-se as fotografias do procedimento realizado em bancada no laboratório de Eletrônica da Universidade Feevale para a medição da resistividade elétrica dos corpos de prova, conforme Tabela 4.3, onde utilizou-se a metodologia indicada na seção 3.2.3. Em (a) são mostrados a fonte de corrente de bancada e o multímetro empregado no ensaio e em (b), as conexões elétricas executada no segmento em anel.

Figura 4.4 – Ensaio para determinação da resistividade das ligas sinterizadas.



Fonte: AUTOR.

Considerando-se a Tabela 4.3, observa-se uma resistividade de $0,91 \mu\Omega.m$, ficando acima dos valores indicados na literatura que compreendem uma faixa de $0,60$ a $0,78 \mu\Omega.m$ (JANSSON, 1992). Entretanto, tais característica de maior resistividade já era esperada, uma vez que os corpos de prova estudados foram compactados com pressão de 500 MPa , o que resultou em maior porosidade. É importante salientar o que já foi colocado anteriormente, ou seja, de que a matéria-prima utilizada nestes ensaios não se tratava de um pré-ligado, e sim de uma simples mistura dos pós constituintes.

Tabela 4.3 – medições realizadas para determinação da resistividade elétrica.

	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Diâm. Médio (mm)	Área transv. (mm^2)	I (A)	V (mV)	Resistividade elétrica ($\Omega.m$)
Corpo de prova A	48,58	40,55	44,56	27,18	5,0	7,7	$9,39 \times 10^{-05}$
Corpo de prova B	48,81	40,80	44,80	33,12	5,0	5,9	$8,72 \times 10^{-05}$
Corpo de prova C	48,62	40,53	44,57	28,93	5,0	7,1	$9,22 \times 10^{-05}$
Resistividade elétrica média ($\Omega.m$)							$9,11 \times 10^{-05}$

Fonte: AUTOR.

4.1.5 Propriedades mecânicas e micrografia da estrutura dos corpos de prova

O ensaio de compressão foi realizado na máquina universal EMIC com capacidade de 200kN , pertencente à ULBRA-RS, na velocidade de 2mm/min , sendo calculada a tensão por:

$$\sigma_e = \frac{F}{A} \quad (4.2)$$

sendo:

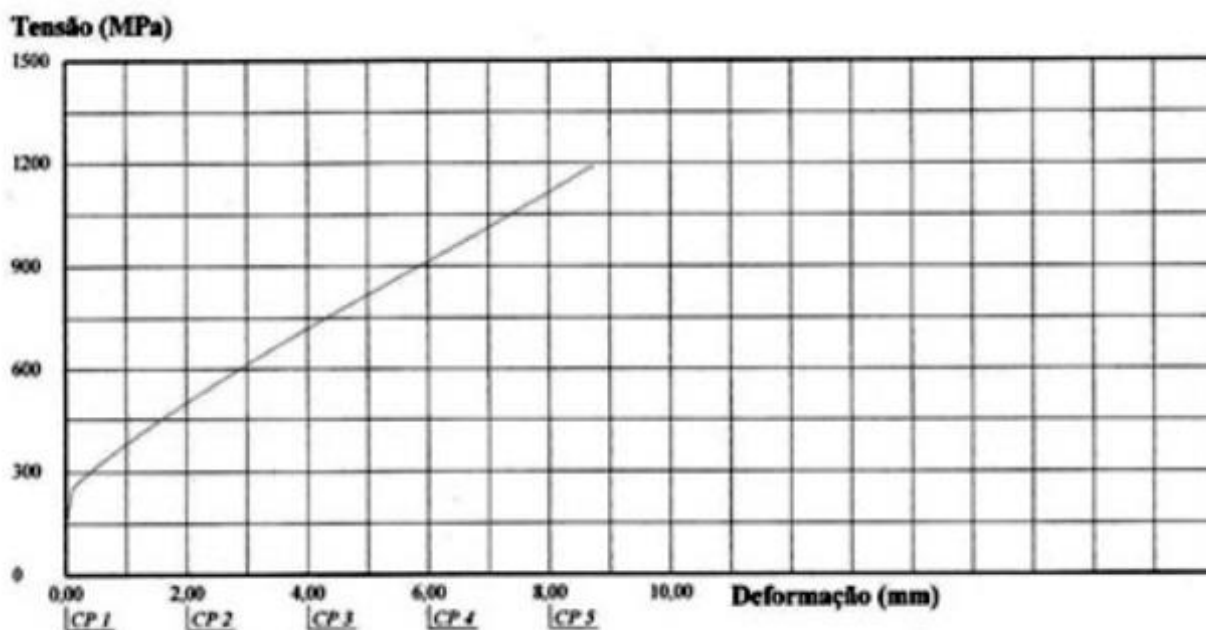
F - Força de compressão (kgf)

σ_e - Tensão de escoamento (kgf/mm²)

A - Área da superfície sob compressão, sendo 142,07 mm²

Para a realização dos ensaios de compressão, foram utilizadas três peças sinterizadas como corpos de prova, sendo que a Figura 4.5 mostra um destes ensaios. Considerando-se a média obtida de três ensaios em três corpos de prova diferentes, resultou em uma tensão de escoamento de 16,49 kgf/mm². O aço 1008 apresenta tensão de escoamento na faixa 18,0 a 22,5 kgf/mm² (dependendo de alguns fatores como composição, forma de laminação e tratamento térmico) (HANDBOOK. AÇOS & LIGAS.).

Figura 4.5 – Curva de deformação obtida no ensaio de compressão.



Fonte: Máquina Emic DL20000 – ULBRA

Para o ensaio de dureza, utilizou-se a escala Rockwell B, com uma esfera de aço de 1/16 polegada de diâmetro, com carga de 100 kgf no dispositivo empregado para o ensaio, obtendo-se os dados mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – ensaio de dureza – escala Rockwell B.

	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média
Corpo de Prova 1	53,5	57,0	58,5	57,5	56,6
Corpo de Prova 2	42,0	51,0	48,0	50,5	48,0
Corpo de Prova 3	49,0	56,5	57,5	56,5	54,9
Corpo de Prova 4	60,0	58,0	56,0	60,0	58,5
Dureza Média					54,5

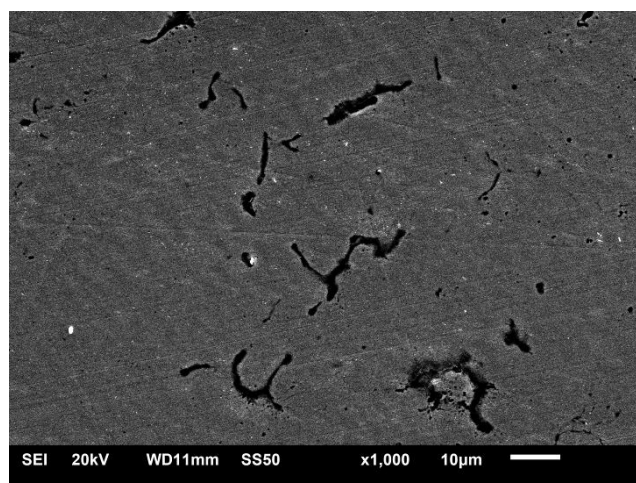
Fonte: AUTOR.

O aço AISI 1008, laminado a quente de barra 19-32 mm redonda, possui dureza de **49** Rockwell B, o que está próximo da média encontrada de **54,5** Rockwell B para a liga Fe-50%Ni sinterizada estudada neste trabalho.

Assim, com relação às características mecânicas de dureza e tensão de escoamento, a liga sinterizada Fe-50%Ni está muito próxima dos limites do aço 1008 muito utilizado em núcleos de motores elétricos.

Na Figura 4.6 é mostrada a fotografia obtida no MEV da microestrutura da liga Fe-50%Ni obtida por metalurgia do pó, pode ser vista a formação de alguns poros ao longo da superfície da peça sinterizada.

Figura 4.6 – Micrografia da microestrutura de uma amostra Fe-50%Ni visualizada no MEV – Feevale - aumento de 1000x.



Fonte: AUTOR.

4.2 SIMULAÇÕES DO MINI MOTOR

O mini motor foi simulado a partir do programa FEM 4.2 a partir da geometria e os dados indicados na seção 3.5. Foram realizadas duas simulações, uma com uma intensidade de corrente de 1,0 A e outra, com 610 mA. A Tabela 4.5 mostra os resultados das grandezas elétricas e magnéticas obtidas a partir da simulação, considerando as três fases (circuitos A, B e C), considerando a simulação com corrente de 1,0 A.

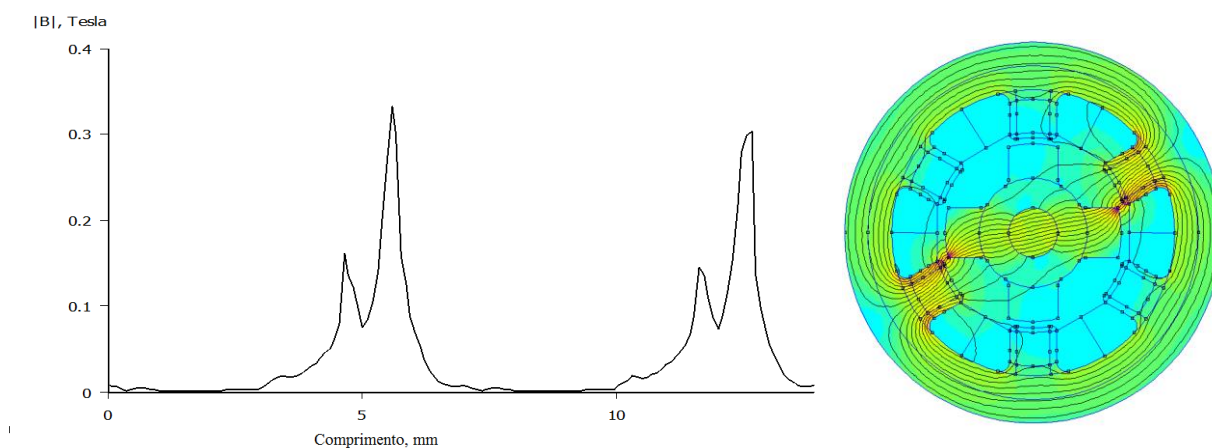
Tabela 4.5 – grandezas elétricas e magnéticas obtidas a partir da simulação

	Corrente Total (A)	Queda de Tensão (V)	Fluxo de entreferro (Wb)	Indutância (H)	Tensão/corrente (Ω)	Potência (W)
Circuito A	0,0	0,00	$2,33 \cdot 10^{-7}$	0,00	0,00	0,00
Circuito B	1,0	2,88	$6,38 \cdot 10^{-4}$	$6,38 \cdot 10^{-4}$	2,88	2,88
Circuito C	0,0	0,00	$1,36 \cdot 10^{-7}$	0,00	0,00	0,00

Fonte: Programa FEMM 4.2.

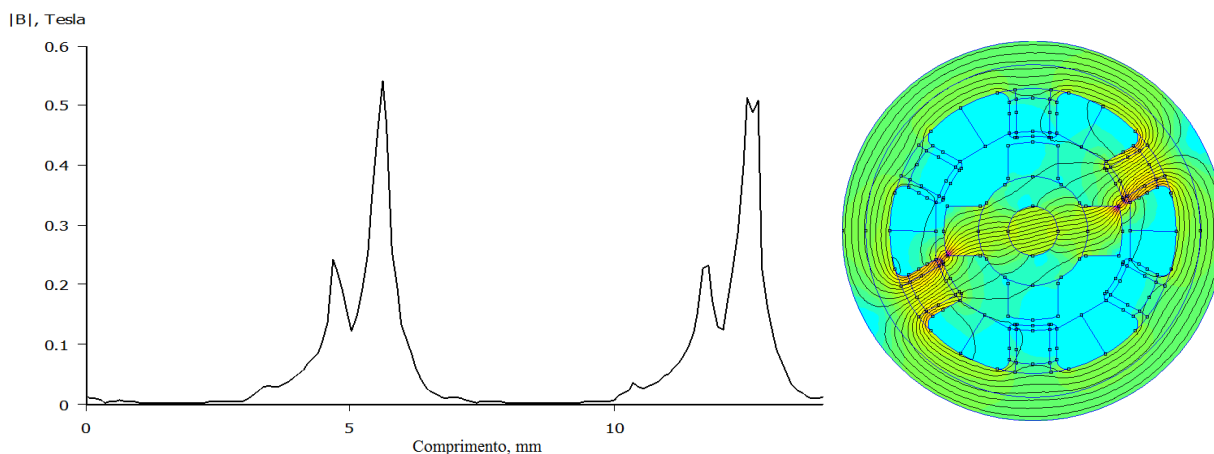
A figura 4.7 mostra a densidade de fluxo de entreferro para alimentação das bobinas com corrente de 610 mA e a figura 4.8, para uma alimentação com 1,0 A.

Figura 4.7 – Densidade de fluxo de entreferro com alimentação de 610 mA.



Fonte: Programa FEMM 4.2.

Figura 4.8 – Densidade de fluxo de entreferro com alimentação de 1,0 A.



Fonte: Programa FEMM 4.2.

A partir das Figuras 4.7 e 4.8, pode-se observar que a indução magnética de entreferro apresenta valores máximos entre 0,3 e 0,35 T para alimentação com corrente de 610 mA e entre 0,5 a 0,55 T para alimentação com 1,0 A. O torque desenvolvido na ponta do eixo do motor é proporcional ao fluxo magnético de entreferro (FITZGERALD et al., 2008). Uma máquina elétrica rotativa, dependendo da configuração, pode trabalhar com fluxos de entreferro bem superiores aos encontrados neste trabalho, na faixa de 1 a 1,5 T (FITZGERALD et al., 2008).

Através da simulação no programa FEMM 4.2, obteve-se também o valor do **Torque Resultante de $2,54 \times 10^{-4}$ N.m** para a corrente de 610 mA e de **$6,81 \times 10^{-4}$ N.m** para a corrente de 1,0 A. A tabela 4.6 mostra os valores de corrente, indução de entreferro e torque, considerando os dados obtidos a partir das simulações no referido programa.

Tabela 4.6 – grandezas elétricas e magnéticas obtidas a partir da simulação

Corrente nas Bobinas (A)	Indução de Entreferro (T)	Torque (N.m)
0,61	0,35	$2,54 \times 10^{-4}$
1,00	0,55	$6,81 \times 10^{-4}$
2,00	1,10	$2,72 \times 10^{-3}$

Fonte: Programa FEMM 4.2

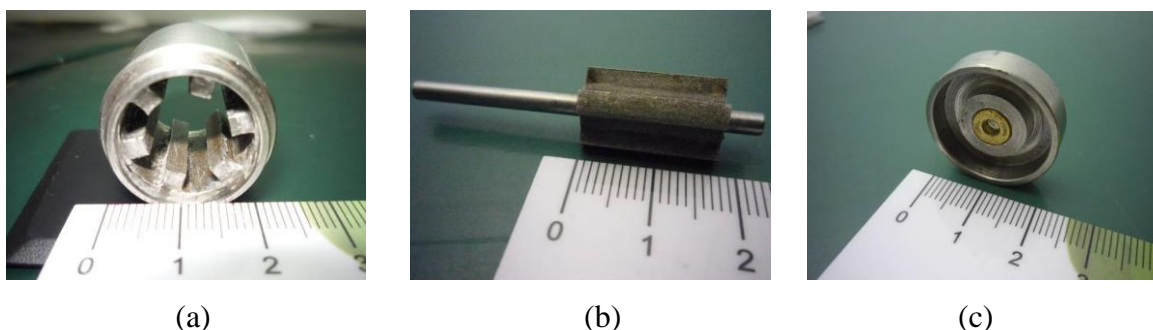
Da tabela 4.6 pode-se observar que a indução no entreferro aumenta diretamente com a corrente, uma vez que esta também é proporcional o fluxo magnético de entreferro, porém o torque aumenta proporcionalmente com o quadrado da intensidade da corrente. Considerando que a indução possa ser de 1,1 T, mais precisamente de 1,09 T, conforme referências bibliográficas (NASAR, 1987), a corrente poderia ser de 2,0 A, e o torque seria quatro vezes maior, ou seja, de $2,72 \times 10^{-3}$ N.m.

Assim, para aumentar-se o fluxo magnético de entreferro é necessário aumentar a corrente elétrica nas bobinas do estator, contudo, a intensidade destas correntes está limitada pela bitola do fio utilizado no bobinamento (FITZGERALD et al.,2008). Portanto, com o redimensionamento das bobinas (diâmetro dos fios e números de espiras) e da corrente elétrica, para mesma topologia, é possível obter-se um torque maior que o atual. Observa-se nas figura 4.7 e 4.8 que é possível aumentar-se o fluxo magnético de entreferro, uma vez que as peças magnéticas do motor não sofreram saturação magnética para uma corrente de 1,0 A.

4.3 MONTAGEM FINAL DO MINI MOTOR

Os tarugos obtidos (seção 3.6.2) foram pré-usinados e posteriormente realizada eletroerosão a fio para a forma final das peças do mini motor. As Figuras 4.12 (a) e (b) mostram, respectivamente, os núcleos do estator e do rotor. A Figura 4.12(c) mostra uma das tampas, em que se pode observar a inserção de uma bucha de bronze no lugar do rolamento (fixação do eixo do mini motor).

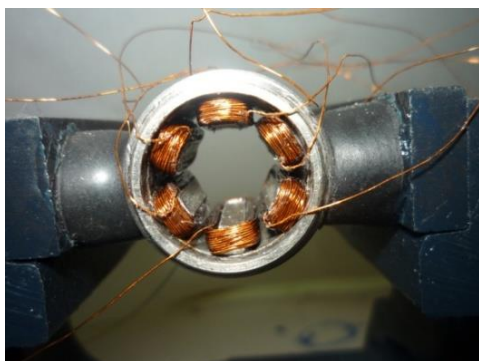
Figura 4.9 – Fotos do (a) estator, (b) rotor e (c) da tampa – dimensões em cm.



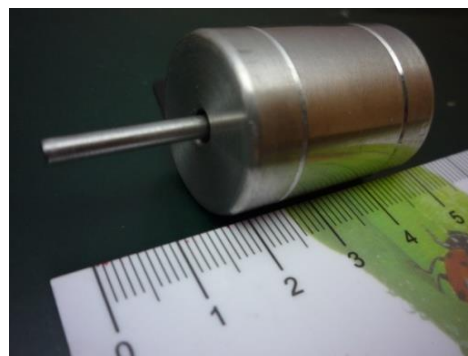
Fonte: AUTOR.

Na Figura 4.13(a) visualiza-se a foto de uma etapa da bobinagem do enrolamento do estator e na Figura 4.13(b), a foto do motor montado, sendo mostradas as duas tampas, o eixo do motor e a parte externa do estator.

Figura 4.10 - Fotos do (a) estator bobinado e (b) do mini motor montado – dimensões em cm.



(a)



(b)

Fonte: AUTOR.

Inicialmente, tentou-se realizar o bobinamento previsto no projeto inicial e nas simulações, contudo, não foi possível executar-se tal montagem, devido ao reduzido espaço das janelas para colocação dos enrolamentos. Assim optou-se pela seguinte configuração:

- bitola do fio de cobre esmaltado – 33 AWG;
- número de espiras – 59;
- bobinas com uma das extremidades conectadas entre si (comum) – mini motor conectado como motor de passos unipolar;
- corrente nas bobinas – 0,61 A (com duas bobinas alimentadas por passo);
- corrente máxima do fio esmaltado 33AWG – 0,076 A.

Ao manter-se a mesma relação A.espira (força magnetomotriz) original, cujo valor era de 17,64 A.espira, o motor não apresentou torque motor suficiente para girar. Assim, a relação A.espira foi aumentada para 71,98 A.espira e, neste caso, o motor apresentou torque capaz de girar o rotor a vazio. Contudo, verifica-se que a corrente na bobina é bem superior ao valor máximo permitido para o condutor elétrico em questão (fio esmaltado 33 AWG).

Ensaio de aquecimento e capacidade de condução de corrente elétrica foram realizados em uma bobina similar às bobinas do mini motor, com o intuito de preservar o mini motor. Fez-se circular inicialmente corrente contínua de valor de 0,6 A durante 45 min e o aquecimento da bobina foi mínimo e não houve ruptura do fio esmaltado. Aumentou-se então a corrente para 1,0 A durante 30 min, produzindo um aquecimento na bobina, mas possível de se mantê-la na mão e também neste caso, não houve o rompimento do condutor elétrico da mesma. Assim, concluiu-se que seria possível fazer circular uma corrente pulsante de valor de 1,0 A nas bobinas sem o risco de ocasionar danos ao mini motor.

4.4 ENSAIOS DO MINI MOTOR

A impedância de cada bobina do mini motor foi determinada por método indireto, em que, primeiramente, foi medida diretamente a resistência série equivalente da mesma, com auxílio de um multímetro, obtendo-se o valor de $2,0 \Omega$, valor este que se iguala ao calculado, utilizando-se os dados de catálogo. O condutor 33 AWG possui resistência ôhmica de $0,678 \Omega/\text{m}$, sendo que as bobinas possuem comprimento médio de $3,0 \text{ m}$, o que resulta em $2,037 \Omega$ de resistência elétrica. A indutância da bobina foi obtida a partir da conexão em paralelo com um capacitor de 200 nF . O circuito LC ressonante foi conectado na saída de um gerador de sinal. A seguir, variou-se a frequência no gerador de sinal e encontrou-se a frequência de ressonância do circuito LC.

Assim, para a determinação da indutância de uma bobina do mini motor utilizou-se a expressão (4.1).

$$L = \frac{1}{C(2\pi f)^2} \quad (4.1)$$

sendo:

L : indutância própria da bobina (H);

C : capacitância em paralelo (F);

f : frequência de ressonância (Hz).

A capacitância do capacitor medida através de um capacitômetro foi de 192 nF . A frequência de ressonância encontrada foi de 28 kHz . Deste modo, a partir da expressão 4.1 determinou-se o valor da indutância própria da bobina, cujo valor foi de $168 \mu\text{H}$. Assim, o circuito equivalente de cada bobina corresponde a uma indutância de $168 \mu\text{H}$ em série com uma resistência de $2,0 \Omega$.

O motor foi colocado a girar inicialmente com uma frequência do trem de pulsos em 2 Hz . A seguir, variou-se a frequência dos pulsos de acionamento fazendo com que o motor girasse com uma frequência de até $5,5 \text{ Hz}$, o equivalente a 333 rpm . A partir desta frequência, o motor perdia o sincronismo. Contudo até os $5,5 \text{ Hz}$ observou-se que a rotação do motor era uniforme e precisa. Também foram realizados ensaios de posicionamento angular, resultando exatamente nos deslocamentos angulares definidos no projeto do motor.

5 CONCLUSÕES

De posse dos dados obtidos no presente trabalho, pode-se demonstrar que é possível construir um motor de passos de relutância nas dimensões aqui trabalhadas, e o mesmo gerar torque motor capaz de movimentar pequenas cargas, devendo-se proceder ajustes na bitola do fio esmaltado, utilizando-se outro com bitola maior, de modo a ser possível circular pelas bobinas do estator uma corrente de 2,0 A, o que proporcionaria um torque de $2,72 \times 10^{-3}$ N.m, frente aos $2,54 \times 10^{-4}$ N.m para a corrente de 0,61 A, ou seja, o torque passaria a ser quase 11 vezes maior. Outra alternativa, seria diminuir-se a bitola do fio das bobinas do estator para 34 AWG. O que proporcionaria uma maior taxa de ocupação das janelas do estator, proporcionando um acréscimo no número de espiras de cada bobina. Isto resultaria em um aumento na força magnetomotriz, ou seja, em um aumento no fluxo magnético de entreferro, conseqüentemente, no torque do mini motor.

Considerando-se a montagem prática do mini motor conclui-se que o projeto das tampas deverá ser refeito, aumentando-se o espaço para a execução das conexões elétricas com os condutores de saída, a menos que não sejam realizadas conexões internamente, o que o torna menos manuseável (frágil devido à pequena bitola dos fios).

Muito embora o mini motor de passos de relutância tenha apresentado algum torque, principalmente, quando o mesmo funcionou como um motor bipolar, para o projeto original, um motor com 1/3 do tamanho deste, deveria ser reavaliada a hipótese de projetá-lo como um motor de passos híbrido bipolar, com rotor de ímãs permanentes, que apesar de sua concepção apresentar maior complexidade, o mesmo apresentará um melhor desempenho para a proposta do projeto original, devido apresentar conjugado estacionário resultando em um maior intertravamento magnético em marcha.

Assim, a reconstrução do motor com um pré-ligado de Fe-50%Ni e nova bobinagem, acarretaria em uma melhora significativa no desempenho do motor, embora nos testes de acionamento, o mesmo girou com precisão e sem oscilações em frequências do trem de pulsos entre 2 Hz e 5,5 Hz, após este valor, o sincronismo era perdido. Assim, a velocidade máxima obtida no mini motor foi de 333 rpm.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- que seja realizado a montagem do mini motor com os mesmos parâmetros daquele que foi aqui apresentado, porém com a utilização de pós metálicos Fe-50%Ni pré-ligados na compactação e estabeleça-se um comparativo de desempenho;
- a construção do mini motor, a partir das considerações no item anterior, outro do tipo híbrido realizando-se testes comparativos de desempenho estático e dinâmico.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM A773 / A773M – 01: Standard Test Method for dc Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with dc Electronic Hysteresigraphs*. West Conshohocken: ASTM, 2009.

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

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

CATÁLOGO DE INFORMAÇÕES SOBRE MOTORES DE PASSOS. Disponível em: <http://www.kalatec.com.br> – Fabricante de motores de passos. Acesso em 22/07/2012.

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

ESSWEIN, Junior; LEWIS, Jorge Albert. *Desenvolvimento de Compósitos Magnéticos Macios Utilizados em Núcleos de Máquinas Elétricas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2009

FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, Jr. Charles; UMANS, Stephen D. *Máquinas Elétricas*. São Paulo, Bookman, 2008 (reimpressão), 6ª Edição.

FUCHS, H. C. *Estudo do Tamanho de Grão em Amostras de Ferro Sinterizadas em Descarga Elétrica de Cátodo Oco*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. 119 p.

GIERAS, J. F. *Advancements in Electric Machines. Power Systems*, 2008; p135-156.

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

GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. *A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental*. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos e Científicos, 2009, 320 p.

HANDBOOK. AÇOS & LIGAS. INFORMAÇÕES TÉCNICAS. **Aços-carbono**. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=40&cod_conteudo=25>. Acesso em 23/11/2012.

JAMES, B. A.; WILLIAMS, G. *Review of the Magnetic Properties of Sintered Iron*. *Powder Metallurgy*, v.22, n.2, 1979. p.75-85.

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

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

KLAR, E. **Metals Handbook Ninth Edition**. Ohio, American Society for Metals, 1984, 897p.

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

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

LALL, C; BAUM L. W. **High Performance Soft Magnetic Components by Powder Metallurgy and Metal Injection Molding**. *Modern Developments in P/M*, v.18, 1998. p.363-389.

LALL, C. **The Effect Sintering Temperature and Atmosphere on the Soft Magnetic Properties of P/M Materials**. *Advances in Powder Metallurgy*, v.3, 1992.

LANDGRAF, F. J. G.; PLAUT, R. L. **Efeito do Tamanho de Grão na Permeabilidade Magnética Máxima da Liga Ferro 47,5% Níquel**. *Metalurgia – ABM*, v.45, n.380, 1989, p.677-681.

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

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

MANTOVANI, Suely C. Amaro; OKI, Nobuo. **Acionamento de Motores**. Disponível em: <<http://www.dee.feis.unesp.br/graduacao/disciplinas/ele0671.pdf>>. Acesso em 23/07/2012.

MATS, PERSSON. **SMC Update**, Vol.1. No. 1, April 1997.

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

Metalurgia do pó. Disponível em: <<http://www.essel.com.br/cursos/material/01/ProcessosFabricacao/65proc.pdf>>. Acesso em 07/07/2011.

MORO, N.; AURAS, A. P. **Metalurgia do Pó e o Futuro da Indústria**. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Curso Técnico de Mecânica Industrial, 2007, 28 p.

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

PAULETTI, Philippe. **Desenvolvimento de uma máquina síncrona trifásica com rotor a partir da M/P e ímãs permanentes**. 2012. 66 f. Dissertação (Mestrado PPGEM/UFRGS).

QUEIROZ, Ricardo Alexandre de A. **Motores de Passos**. Disponível em: <<http://www.ppgel.ufsj.edu.br/uaisoccer/downloads/1272062510.pdf>>. Acesso em 23/07/2012

TELECURSO 2000 PROFISSIONALIZANTE – **Mecânica**, vol. 4

TORO, Vincent del. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. LTC Editora. Rio de Janeiro, 1994.
550 p.