

# APLICAÇÃO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS SINTERIZADOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS SÍNCRONAS

*DIAS, Moisés de Mattos<sup>1</sup>; MARTINS, Ricardo Martins de<sup>2</sup>; AQUIM, Patrice Monteiro de<sup>3</sup>;  
BITTENCOURT, Sergio Deitos<sup>4</sup>; PAULETTI, Philippe<sup>5</sup>; SCHAEFFER, Lírio<sup>6</sup>*

## RESUMO

Este trabalho objetivou o estudo de materiais magnéticos macios sinterizados em núcleos de rotores e estatores de máquinas elétricas rotativas síncronas com ímãs de NdFeB. Tradicionalmente, esses núcleos são construídos a partir de chapas de aço laminadas. Contudo, neste trabalho, tais núcleos foram substituídos por peças maciças, obtidas da Metalurgia do Pó, na qual pó de ferro foi misturado a elementos de liga (P, Si e Ni), compactado e sinterizado. Inicialmente, corpos de prova foram confeccionados para obtenção de propriedades magnéticas, mecânicas e resistividade elétrica. Realizaram-se simulações no software FEMM 4.2, considerando-se núcleos de estator e rotor de materiais sinterizados e chapas de aço laminadas para análise de torque e fluxo magnético de entreferro. A máquina simulada a partir de núcleos de chapas laminadas apresentou densidade de fluxo magnético de 2,02 T e torque de 34,49 N.m. Por sua vez, a liga sinterizada Fe1%P, 2,00 T e 32,46 N.m para os mesmos parâmetros referenciados anteriormente. Também foram realizados ensaios destes materiais em núcleos magnéticos alimentados com variação da frequência da corrente elétrica, verificando-se que a partir de 500 Hz, as perdas magnéticas totais em núcleos de materiais magnéticos macios sinterizados tendem a se igualar às perdas em núcleo de chapas laminadas.

**Palavras-chave:** Materiais magnéticos macios. Metalurgia do pó. Núcleo de máquinas elétricas. Simulação por elementos finitos.

<sup>1</sup> Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais - Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Campus II. RS 239, 2755 – CEP 93.352-000 – Novo Hamburgo – RS – Brasil. Fone: (51) 3586.8800 – Fax: (51) 3586.8836 – E-mail: moisesdias@feevale.br.

<sup>2</sup> Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais - Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Campus II. RS 239, 2755 – CEP 93.352-000, Novo Hamburgo, RS, Brasil. Fone: (51) 3586.8800 – Fax: (51) 3586.8836 – E-mail: ricardomartins@feevale.br.

<sup>3</sup> Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais - Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Campus II. RS 239, 2755 – CEP 93.352-000, Novo Hamburgo, RS, Brasil. Fone: (51) 3586.8800 – Fax: (51) 3586.8836 – E-mail: patrice@feevale.br.

<sup>4</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). - Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500 – CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil – E-mail: sergio\_deitos\_bittencourt@hotmail.com.

<sup>5</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). - Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500 – CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil – E-mail: philippe.pauletti@ufrgs.br.

<sup>6</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500 – CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil – E-mail: schaefer@ufrgs.br.

## ABSTRACT

The aim of this work was to study the use of soft magnetic materials in rotor and stator cores of synchronous rotating electrical machines with NdFeB magnets. Traditionally, these cores are built from laminated steel sheets. However, in this study the cores of laminated sheets were replaced by massive pieces obtained from Powder Metallurgy processes, in which iron powder was mixed with different alloying elements (P, Si and Ni), compacted and sintered. Initially, specimens were made in order to obtain the magnetic and mechanical properties and electrical resistivity. In the sequence, simulations were performed using the finite element software FEMM 4.2 considering stator and rotor cores with sintered materials and laminated steel for comparative analysis of torque and magnetic flux of airgap. The simulated machine built with cores of laminated sheets presented a magnetic flow density of 2.02 T and torque of 34.49 N.m. In turn, the sintered alloy Fe1%P presented values of 2.00 T and 32.46 N.m respectively for the referred parameters. Tests of these materials were also performed in magnetic cores supplied with a variation of the frequency of the electric current, where it was found that from 500 Hz, the total magnetic losses in cores of soft magnetic materials tend to equal the losses attributed to laminated sheets.

**Keywords:** Soft magnetic materials. Powder metallurgy. Electric machine cores. Finite element simulation.

## 1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas podem funcionar como motor ou gerador, e possuem duas partes básicas que são os núcleos do estator e rotor. Estes núcleos, com raras exceções, são construídos a partir de finas lâminas metálicas (chapas de aço baixo carbono) com espessura menor que 1 mm, agrupadas em pacotes de chapas. Algumas máquinas de maior rendimento, como os geradores, são construídas com chapas de aço-silício, com percentual de aproximadamente 3% de silício. O processo total para confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, estampagem, isolamento elétrica, empacotamento e fixação. Com relação às chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento fundamenta-se em um tratamento térmico, no qual os pacotes de chapas são colocados em fornos durante certo tempo, havendo então a oxidação da superfície das chapas e, em consequência, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes. Alguns tipos de chapas de aço-silício são fornecidos pelos fabricantes com uma pintura à base de óxidos sobre uma das superfícies (FITZGERALD *et al.*, 1990; NASAR, 1987).

Núcleos magnéticos envolvidos por bobinas, nas quais circulam correntes alternadas, geram um fluxo magnético também alternado. Por este motivo, esses núcleos ficam sujeitos à

ação de correntes parasitas, também conhecidas por correntes de Foucault, que são responsáveis por apreciável perda de potência nestes núcleos. A construção destes núcleos magnéticos a partir de chapas de aço isoladas eletricamente reduz parcialmente as correntes parasitas, reduzindo as perdas por correntes de Foucault (FITZGERALD *et al.*, 1990; NASAR, 1987).

Com relação à construção, mudanças na forma e acionamento das máquinas elétricas encontram-se no limite do aprimoramento tecnológico e somente mudanças drásticas nos materiais utilizados na construção dos núcleos das máquinas elétricas ocasionarão melhora de rendimento das mesmas. Tal fato também ocorre com relação ao acionamento, no qual dispositivos a partir de semicondutores, como os inversores, igualmente se encontram no limite do desenvolvimento tecnológico.

Contudo, utilizando-se os processos da Metalurgia do Pó (M/P), é possível construir tais núcleos em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética e maior resistividade elétrica, se comparadas ao aço convencional, o que reduz as correntes parasitas (JANSSON, 1992; KRAUSE *et al.*, 1997). No caso da aplicação deste processo na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas, poderá haver algumas vantagens sobre aquelas com núcleos convencionais. Assim, na medida em que for possível construir núcleos em blocos únicos e maciços, menos etapas estarão presentes na construção das máquinas e, naturalmente, menos energia será consumida na fabricação das mesmas. Salienta-se também que com a utilização de ligas magnéticas de maior resistividade na construção dos núcleos do estator e do rotor haverá uma redução nas perdas por correntes parasitas, ocasionando um maior rendimento, resultando assim economia de energia elétrica.

A aplicação da M/P em núcleos de máquinas elétricas está restrita a motores elétricos especiais para os quais o rendimento não é o critério mais importante, como no caso de minimotores de geometria complexa, em alguns servomotores nos quais os enrolamentos de armadura são alimentados com corrente elétrica de frequência elevada e partes de máquinas nas quais não há variação de fluxo, como núcleos de rotores de máquinas síncronas (KRAUSE, 1997).

Assim, este trabalho teve por objetivo o estudo e testes de materiais magnéticos macios obtidos a partir de pó de ferro combinado com fósforo, silício e níquel e sua aplicação em núcleos de máquinas elétricas rotativas com alimentação de corrente trifásica de armadura, em substituição aos tradicionais pacotes de chapas de aço laminadas. Após a caracterização das diversas ligas sinterizadas, realizou-se um estudo de uma máquina elétrica síncrona com polos

salientes e ímãs permanentes (FITZGERALD et al., 1990; NASAR, 1987; KOSOW, 1991; BOLDEA, 1996). Deve-se enfatizar que a literatura acerca do tema deste trabalho, ou seja, a aplicação dos materiais em máquinas, é escassa. Há duas empresas que começaram a desenvolver, na década de 1980, servomotores, utilizando-se de algumas ligas aqui estudadas, porém, tais estudos nunca foram divulgados, em razão de sigilo industrial.

## 2 MOTORES ELÉTRICOS A PARTIR DA METALURGIA DO PÓ

### 2.1 PROCESSOS DA METALURGIA DO PÓ E SUAS VARIAÇÕES

Alguns tipos de motores elétricos especiais possuem os núcleos do rotor e estator obtidos a partir de pós-metálicos, utilizando-se os processos da Metalurgia do Pó, ou suas variações, conforme descrito a seguir:

**Metalurgia do Pó Convencional:** A M/P é um processo relativamente recente da metalurgia de transformação, no qual peças são obtidas a partir de seus pós-constituintes. Os processos básicos da M/P são: obtenção de pós e mistura, compactação e sinterização. Às vezes, é necessária uma quinta etapa, como a retificação. Na M/P, os pós, depois de serem misturados, são compactados em matrizes nas quais adquirem a forma da cavidade da matriz. Na sequência, são colocados em fornos para sinterização, adquirindo consistência e resistência mecânica. Os materiais obtidos pelo processo de M/P convencional também são denominados de sinterizados (BRADBURY, 1986; GERMAN, 1984).

**Materiais Microencapsulados:** *Soft Magnetic Composites*, ou simplesmente SMCs, são basicamente partículas de pó ferromagnético, revestidas por filme isolante elétrico como polímeros e óxidos. Componentes SMCs são produzidos, utilizando-se 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 (PERSSON, 1997).

**Moldagem de Pós Metálicos por Injeção:** A MPI (Moldagem de Pós por Injeção) é um processo alternativo da M/P que combina a M/P com a injeção. O processo baseia-se em uma mistura de pós (como pós metálicos) com um aglomerante (basicamente ceras e polímeros). A seguir, a mistura é injetada em um molde, adquirindo a forma da cavidade. Posteriormente a esta moldagem, ocorre a retirada do aglomerante por aplicação de solventes. Finalmente, é realizada a

extração completa do polímero por aquecimento e subsequente sinterização. Como resultado, obtêm-se peças metálicas de grande precisão e geometria complexa (GERMANN, BOSE, 1990).

## 2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES FÍSICAS DE MATERIAIS SINTERIZADOS

As propriedades magnéticas e elétricas de materiais obtidos por M/P são influenciadas por vários fatores, como, por exemplo, a formação de ligas, presença de porosidade e oxidação superficial de partículas dos pós, granulometria dos pós, tamanho de grãos do reticulado cristalino e presença de impurezas. Algumas destas características são positivas e outras negativas com relação às propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas e o uso destes materiais em núcleos de máquinas elétricas rotativas (LUBORSKY et al., 1996; LALL, 1992; JAMES, WILLIAMS, 1979; MOYER et al., 1981).

Os materiais sinterizados mais comumente utilizados em núcleos de dispositivos eletromagnéticos, como as máquinas elétricas rotativas, são o ferro puro, ligas ferro-cobalto; ligas ferro-fósforo, ligas ferro-silício, ligas ferro-fósforo-silício, aços inoxidáveis ferríticos e ligas ferro-níquel (LALL, BAUM, 1998; LENEL, 1984; BAS et al., 1988).

## 2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DE INTERESSE DE MATERIAIS PARA NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

As propriedades físicas de interesse para uso de um determinado material e processo em núcleos de máquinas elétricas rotativas ou motores elétricos estão relacionadas a seguir.

- Propriedades Magnéticas (coercitividade, permeabilidade e indução de saturação).
- Resistividade Elétrica.
- Propriedades Mecânicas (dureza e curvas de compressão / tensão de escoamento).

Com relação às propriedades magnéticas, os materiais a serem utilizados em núcleos de máquinas elétricas devem possuir: elevada permeabilidade magnética, o que reduz a relutância do circuito magnético dos núcleos de ferro, concentrando todo o campo magnético no entreferro; elevada indução de saturação, possibilitando trabalhar com maior fluxo magnético, resultando maior torque na ponta de eixo; e baixa coercitividade, o que reduz as perdas por ciclo de histerese (FITZGERALD et al., 1990; NASAR, 1987).

No que tange 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 isolação entre chapas restringe as correntes induzidas a uma menor área de circulação. As perdas por correntes parasitas em um núcleo maciço são consideravelmente maiores que as perdas em núcleos obtidos a partir de chapas isoladas eletricamente. Quanto menor a espessura das chapas, menores são as correntes parasitas e menores as perdas de potência nestes núcleos. A redução das correntes induzidas também pode ser obtida, desde um acréscimo da resistência elétrica da peça, 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, máquinas elétricas de alto rendimento são construídas com chapas de aço silício, que possui resistividade elétrica maior que o aço baixo carbono (FITZGERALD et al., 1990; NASAR, 1987).

Com relação às propriedades mecânicas, os 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 ou ductilidade, curva de compressão *versus* deformação ou curva de escoamento e avaliação de microestrutura.

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

- Elevada Permeabilidade Magnética Relativa;
- Baixa Coercitividade Magnética;
- Elevada Resistividade Elétrica;
- Elevada Indução de Saturação;
- Dureza ou Ductilidade compatíveis com as vibrações as quais a máquina é submetida.

## 2.4 MÁQUINAS SÍNCRONAS COM ÍMÃS PERMANENTES

As máquinas elétricas rotativas com alimentação trifásica, geralmente, podem funcionar como *motor* ou *gerador*. Como motores, convertem uma potência elétrica, a partir de uma fonte, em uma potência mecânica que aciona uma carga acoplada na ponta de eixo. Como gerador

ocorre o inverso (FITZGERALD *et al.*, 1990; NASAR, 1987; KOSOW, 1991). Por este motivo, os geradores e motores elétricos podem ser denominados de máquinas elétricas rotativas ou simplesmente de máquinas elétricas.

As máquinas rotativas trifásicas podem ser síncronas e assíncronas. Nos motores síncronos, a velocidade angular do eixo é constante e independe da carga acoplada ao eixo, isto até determinados valores de potência, tendo, como limite de uso, a potência nominal da máquina. Nos motores assíncronos, há uma queda da velocidade angular quando é acoplada carga no eixo (FITZGERALD *et al.*, 1990; NASAR, 1987; KOSOW, 1991).

Com relação ao aspecto construtivo, as máquinas trifásicas são constituídas fundamentalmente de duas partes (FITZGERALD *et al.*, 1990; NASAR, 1987; KOSOW, 1991):

- **Estator:** Parte fixa da máquina construída de chapas de aço laminadas na qual são colocados os *enrolamentos de armadura* com alimentação trifásica, defasadas de 120°. Os enrolamentos são dispostos espacialmente de tal forma que as correntes de todas as fases contribuem positivamente na geração de uma onda de fluxo magnético girante ou campo girante.
- **Rotor:** Parte girante da máquina também construída de chapas de aço laminadas na qual são colocados os *enrolamentos de campo*.

As máquinas síncronas com ímãs permanentes são máquinas rotativas trifásicas nas quais os enrolamentos do rotor, usualmente alimentados com corrente contínua, são substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético como o NdFeB. Em geral, estas máquinas possuem um elevado rendimento (maior que 90%), e, em algumas aplicações, são utilizadas como servomotores, operando a altíssimas velocidades e elevada frequência de correntes de armadura (FITZGERALD *et al.*, 1990; NASAR, 1987).

## 2.5 SIMULAÇÃO POR SOFTWARE DE 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*). A metodologia de elementos finitos tem como princípio a solução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas. O objetivo principal é dividir o problema em um grande número de regiões, cada uma com uma geometria simples (e.g. triângulo). Em cada

elemento, a solução é aproximada através de uma interpolação dos valores de cada vértice do triângulo (MEEKER, 2010).

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 da máquina e as propriedades que devem ser trabalhadas para atingir o ponto ideal de trabalho.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foram obtidos corpos de prova, utilizando-se fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 5%) e níquel (50%), misturados ao ferro puro, compactados e sinterizados. Após, avaliaram-se algumas propriedades físicas, tais como indução de saturação, permeabilidade e coercitividade magnética, resistividade elétrica, perdas magnéticas em função da frequência, dureza e tensão de escoamento. Finalmente, utilizando-se o software de elementos finitos FEMM 4.2, realizou-se a simulação de uma máquina elétrica síncrona com polos salientes e ímãs permanentes (FITZGERALD et al., 1990; NASAR, 1987; KOSOW, 1991; BOLDEA, 1996) com núcleos do rotor e estator a partir de materiais magnéticos macios sinterizados e chapas de aço laminadas, obtendo-se dados comparativos de fluxo magnético de entreferro e torque máximo.

#### 3.1 CORPOS DE PROVA

A definição da liga a ser utilizada nos estudos dos núcleos do rotor e estator da máquina foi realizada a partir do estudo das propriedades físicas de algumas ligas sinterizadas como FeP, FeSi e FeNi, e suas variações. Para análise das propriedades magnéticas e resistividade elétrica, utilizou-se a matriz da Figura 1-a, para a qual foram obtidos corpos de prova na forma de anéis (Figura 1-b).





**Figura 1 – Amostras na forma de anel – (a) Matriz**  
Fonte: do Autor



**Figura 1 – Amostras na forma de anel – (b) Corpo de Prova (medida em cm)**  
Fonte: do Autor

Por sua vez, no intuito de avaliar a dureza e tensão de escoamento das ligas estudadas, utilizou-se a matriz da Figura 2-a, obtendo-se corpos de prova na forma de cilindros (Figura 2-b). Para análise das perdas em frequência, foram utilizadas as matrizes mostradas nas Figuras 3-a e 3-b, tendo sido obtidos corpos de prova na forma de núcleos de transformadores (Figura 3-c).



**Figura 2 – Amostras na forma de cilindro – (a) Matriz**



**Figura 2 – Amostras na forma de cilindro – (b) Corpo de Prova**  
Fonte: do Autor



**Figura 3 – Amostras na forma de núcleo de transformador – (a) Matriz Núcleo E**  
Fonte: do Autor



**Figura 3 – Amostras na forma de núcleo de transformador– (b) Matriz Núcleo**  
Fonte: do Autor



**Figura 3 – Amostras na forma de núcleo de transformador – (c) Corpos de Prova**  
**Fonte: do Autor**

Os pós de ferro misturados a fósforo, silício e níquel foram adquiridos junto a Höganäs Brasil Ltda. Conforme certificado do fabricante, o pó de ferro utilizado foi o ASC100.29, com 99,4% da granulometria entre 45  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ . O pó Fe3P (84% de Fe, 16% de P) apresentou 90% de sua dimensão abaixo de 14,58  $\mu\text{m}$ . Por sua vez, a análise granulométrica do pó FeSi 45 (55% de Fe e 45% de Si) indicou 87% de seu conteúdo entre 45  $\mu\text{m}$  e 250  $\mu\text{m}$  e o pó de níquel apresentou granulometria mínima de 3  $\mu\text{m}$  e máxima de 7  $\mu\text{m}$ . O pó de ferro foi misturado com fósforo (1, 2, 3%), silício (1, 3, 5%) e níquel (50%) em um misturador duplo cone, com rotação de 60 rpm durante 20 minutos, para dispersão dos constituintes. Também foi adicionado às misturas 1% de lubrificante sólido à base de estearato de zinco.

No que tange à pressão de compactação, os corpos de prova foram submetidos a uma pressão média de 600 MPa, seguindo-se orientação de dados da literatura [BRADBURY, 1986; GERMAN, 1984].

A sinterização dos corpos de prova foi realizada em forno tubular tipo mufla, com atmosfera controlada (pressão atmosférica) e gás verde (5% de hidrogênio e o restante de nitrogênio). Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto, até a temperatura de 500°C, permanecendo as peças nesta temperatura durante 30 minutos para retirada do lubrificante sólido (estearato de zinco). A seguir, a temperatura foi elevada para 1.150 °C, ocorrendo a sinterização, com um novo patamar isotérmico nesta temperatura por 60 minutos (patamares segundo dados bibliográficos (BRADBURY, 1986; GERMAN, 1984). Após, as peças permaneceram no forno para resfriamento lento até a temperatura ambiente.

### 3.2 OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades magnéticas foram obtidas a partir das curvas magnéticas (laço de histerese e curva de magnetização) que relacionam campo magnético  $H$  aplicado a um material com a indução magnética  $B$  resultante. A partir do laço de histerese, foram obtidas a retentividade (magnetismo remanente) e a coercitividade (campo desmagnetizante). Através da análise da curva de magnetização, obtiveram-se a permeabilidade magnética e a indução de saturação ou indução máxima (que também pode ser visualizada a partir do laço de histerese) (JILES, 1998). A determinação das propriedades magnéticas básicas dos materiais na forma de anel (toróide) segue a norma ASTM A773/A773M (2009). As curvas magnéticas foram obtidas a partir de um dispositivo modelo *TLMP-TCH-14*.

Para aplicação deste método de análise, é necessária a preparação de amostras, que consiste na bobinagem (enrolamento de fios de cobre) de espiras primárias e secundárias no anel, conhecidas como Anel de Rowland (Figura 4). O procedimento consiste em isolar o anel com filme plástico para evitar descascamento do fio esmaltado (Figura 4-a), enrolamento de espiras secundárias (Figura 4-b) e novo isolamento (Figura 4-c) seguido do enrolamento das espiras primárias (Figura 4-d).



Figura 4 – Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento  
Fonte: do Autor



**Figura 4 – Etapas de preparação das amostras: (b) enrolamento secundário**  
Fonte: do Autor



**Figura 4 – Etapas de preparação das amostras: (c) isolamento e (d) enrolamento do primário**  
Fonte: do Autor



**Figura 4 – Etapas de preparação das amostras: (d) enrolamento do primário**  
Fonte: do Autor

A resistividade do material (corpos de prova) das ligas foi determinada a partir do cálculo da resistência elétrica. Para medição desta, utiliza-se um dispositivo denominado de multímetro ou multíteste, que mede diretamente a resistência elétrica do corpo. Entretanto, para medição de resistência elétrica muito baixa, aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. Portanto, o corpo de prova para determinação da resistividade deve ter a forma de uma barra fina e comprida. Um artifício é a utilização de um anel, 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. De acordo com a equação [1], a Lei de Ohm estabelece que (BOYLESTAD, NASHELSKY, 2009):

$$R = \frac{V}{I} \Rightarrow \rho = R \frac{A}{l} = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{l} \quad [1]$$

para a qual  $\rho$  é a resistividade elétrica [ $\mu\Omega \cdot m$ ];  $R$ , a resistência elétrica [ $\Omega$ ];  $V$ , a tensão elétrica aplicada [V];  $I$ , a corrente elétrica aplicada [A];  $A$ , a área da seção transversal da barra [ $m^2$ ] e  $l$  representa o comprimento da barra (ou segmento de um anel) [m].

A Figura 5 mostra um segmento de um anel com fios de cobre ou terminais soldados para medida da resistividade elétrica.



Figura 5 – Anel segmentado com terminais para medida da resistividade elétrica  
Fonte: do Autor

Para avaliação da resistência à vibração de um material a ser utilizado em uma máquina elétrica rotativa, também foram realizados ensaios mecânicos nos corpos de prova. Os ensaios de dureza (Brinell – HB) foram realizados em um durômetro *Precision-England* com indentador de esferas de 2,5 mm e carga de 187,5 kgf, segundo a norma ASTM E10 [2012]. Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina de ensaios universal Emic DL20000, utilizando-se velocidades de 2,0 mm/min, de acordo com a norma ASTM E9 [2000].

### 3.3 PERDAS MAGNÉTICAS

As perdas magnéticas nos materiais estudados foram determinadas a partir de corpos de prova na forma de núcleos E e T idênticos a núcleos de transformadores de tensão elétrica convencionais de mesmas dimensões e mesmos enrolamentos. Assim, as perdas magnéticas foram determinadas de forma similar a perdas em um transformador convencional com núcleo de chapas laminadas (FITZGERALD et al., 1990; NASAR, 1987).

Os núcleos nas geometrias E e T foram submetidos a processos de retificação (Figura 6-a à esquerda), permanecendo com as mesmas dimensões de um núcleo de um transformador elétrico convencional (Figura 6-a à direita). A seguir, os núcleos foram bobinados na forma típica de transformadores de tensão elétrica, com bobinas do enrolamento primário e secundário. A Figura 6-b mostra os transformadores montados, obtido a partir da M/P (direita) e a partir de chapas (esquerda).

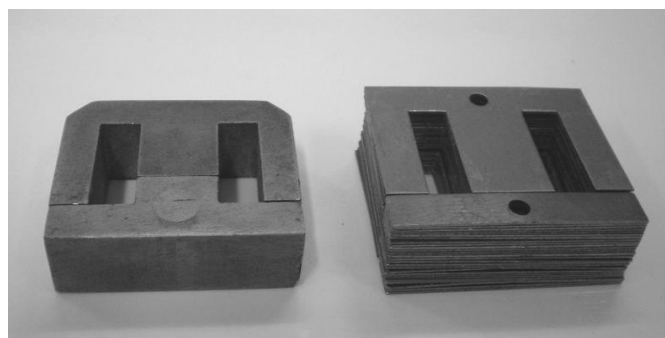


Figura 6 – Transformadores – (a) Núcleos por M/P (esquerda) de Chapas (direita)  
Fonte: do Autor

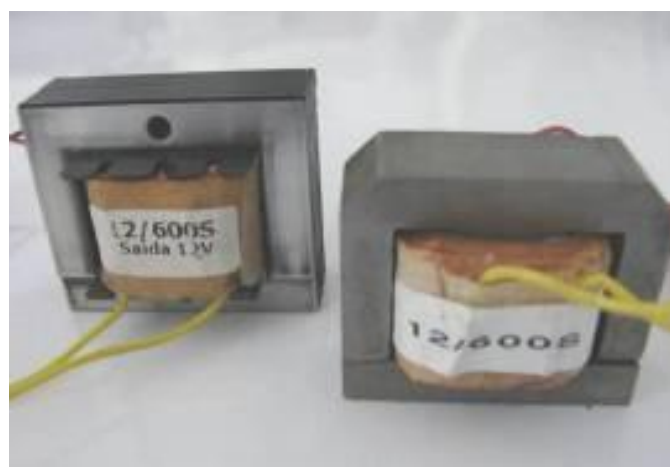


Figura 6 – Transformadores – (b) Bobinados e montados por M/P (direita) de Chapas (esquerda)  
Fonte: do Autor

Salienta-se que este estudo baseou-se em um transformador comercial convencional, de baixa tensão e potência. Para o estudo comparativo, optou-se por construir os núcleos dos transformadores com geometria e dimensões as mais próximas possíveis do convencional. Assim, os enrolamentos utilizados nos transformadores desenvolvidos foram os mesmos enrolamentos do transformador convencional, tendo sido este desmontado e retirado o carretel no qual se

encontravam as bobinas. Este procedimento foi utilizado para que fosse possível uma análise comparativa do transformador convencional e os desenvolvidos.

O enrolamento no lado de alta tensão foi dimensionado para operar com tensão de 127 VRMS, enquanto que o de baixa tensão, apenas 12 VRMS de tensão, considerando-se o núcleo de chapas convencionais. Os ensaios foram realizados, utilizando-se uma fonte de tensão elétrica alternada com variação de amplitude e frequência. Foi empregada uma faixa de frequência de 50 Hz a 1 kHz. Os enrolamentos do lado de baixa tensão foram alimentados com uma tensão próxima dos 6 VRMS (metade da tensão nominal do enrolamento), mantendo-se o enrolamento do lado de alta tensão em aberto, mas variando-se a amplitude do lado de baixa tensão até o lado de alta tensão atingir 75 VRMS. Desta forma, garantiu-se que a tensão induzida no secundário (lado de alta tensão) permaneceu constante para os núcleos estudados. Após, mediu-se a potência fornecida pela fonte e descontaram-se as perdas no enrolamento. A potência resultante está relacionada diretamente com as perdas nos núcleos por correntes parasitas e ciclo de histerese. Devido à analogia intrínseca entre o funcionamento de máquinas elétricas rotativas e transformadores, os mesmos ensaios podem ser estendidos a núcleos de motores elétricos (FITZGERALD et al., 1990; NASAR, 1987).

### 3.4 PROCEDIMENTOS PARA SIMULAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA COM IMÃS PERMANENTES

Para a simulação da máquina, adicionaram-se ao *software* FEMM 4.2 as curvas de magnetização obtidas, com o objetivo de inserir no programa as propriedades magnéticas dos materiais com diferentes percentuais de fósforo, silício e níquel misturados ao ferro.

Neste trabalho, foi simulada uma máquina síncrona trifásica com imãs de NeFeB, de 4 polos e 10 CV. A topologia e as dimensões do núcleo do rotor foram fundamentadas no projeto clássico de máquinas de relutâncias convencionais e máquinas síncronas de polos salientes (FITZGERALD et al., 1990; NASAR, 1987; KOSOW, 1991; BOLDEA, 1996).

A Figura 7-(a) mostra, a partir de um corte transversal, o projeto dimensional da máquina elétrica. O projeto do rotor foi realizado, levando-se em consideração as características do processamento de materiais por metalurgia do pó, cujo formato adequado deve ser o menos complexo possível, possibilitando, assim, sua construção, bem como evitar falhas e trincas nas peças construídas.



Utilizou-se a metodologia de bobinamento em série para uma máquina de 4 polos, sendo 12 espiras com fio 12AWG por ranhura do estator. A corrente nominal utilizada foi de 14,2 A, para uma tensão de 380 V para uma ligação Y. Em resumo, os dados para simulação estão relacionados a seguir:

- Corrente: 14,2 A
- Número de espiras por ranhura: 12
- Fio: 12AWG
- Número de Condutores em Série por Fase: 192
- Tamanho do Pacote (profundidade do estator): 150 mm
- Número de ranhuras: 48

As saliências e imãs no rotor originam quatro polos com polaridades invertidas na sequência angular, e a mesma característica deve ocorrer com o campo magnético gerado pelos enrolamentos de armadura, ou seja, originar uma sequência invertida de quatro polos no perímetro de 360° do estator. Esta característica de acoplamento de campo magnético resulta uma máquina elétrica síncrona em que rotor e campo magnético girante (originado a partir dos enrolamentos de armadura) giram na mesma velocidade com uma defasagem angular em função da carga da máquina (FITZGERALD *et al.*, 1990; NASAR, 1987). A Figura 7-(b) ilustra a estrutura da máquina para a simulação no *software* de elementos finitos – FEMM 4.2.

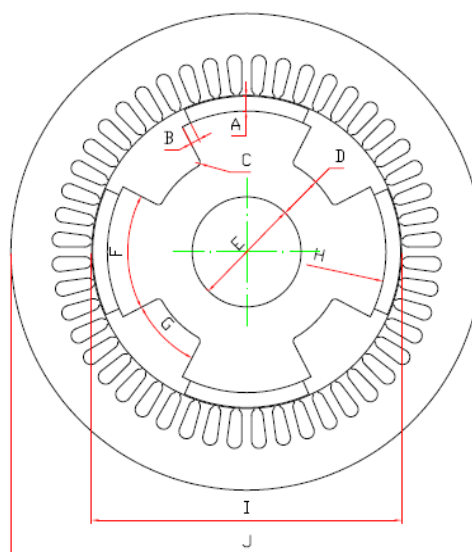


Figura 7 – (a) Cotas do rotor em corte  
Fonte: do Autor

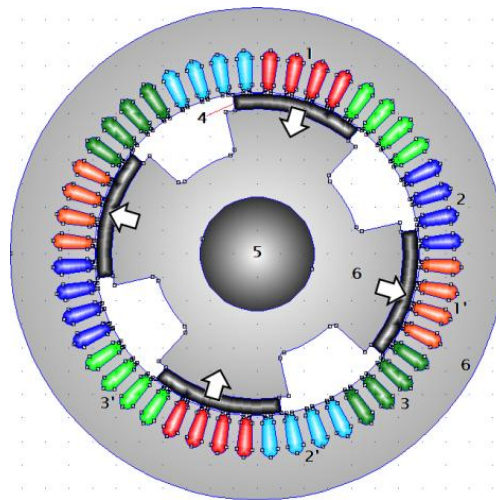


Figura 7 – (b) Corte transversal da máquina analisado no software de simulação  
Fonte: do Autor

Na Figura 7-a, as cotas são: A = 6,55; B = 4; C = 2; D = 18,575; E = 49,8; F = 55°; G = 35°; H = 62,05; I = 138; J = 210. A Figura 7-b mostra o corte transversal da máquina analisado no *software* de simulação no qual 1, 2 e 3 – polos para correntes “U”, “V” e “W”, respectivamente; 1’, 2’ e 3’ – polos para correntes “-U”, “-V” e “-W”, respectivamente; 4 – Ímãs de NdFeB com suas respectivas orientações; 5 – Eixo da máquina; 6 – Núcleo do rotor e do estator. Cita-se que as letras U, V e W representam as fases de uma alimentação trifásica dos enrolamentos de armadura, conforme simulado no FEMM 4.2.

Foram realizadas simulações para núcleos do estator e rotor de aço baixo carbono laminado, núcleos de ferro puro sinterizado e núcleos de ferro misturado com fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 5%) e níquel (50%).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS OBTIDAS DAS LIGAS SINTERIZADAS

Foram obtidas propriedades magnéticas (a partir das curvas BxH), resistividade elétrica (a partir da equação 1) e propriedades mecânicas para os corpos de prova estudados. A Figura 8 mostra as curvas de magnetização do ferro puro sinterizado e das ligas associadas a fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 5%) e níquel (50%), e a Figura 9 mostra algumas curvas de histerese das ligas

estudadas. Haja vista que cada curva da Figura 9 é composta, na verdade, de dois ramos (ida e volta), para que não houvesse problemas de visualização, caso fossem apresentadas as curvas de todas as amostras, resolveu-se dispor uma curva de cada conjunto de amostras. Assim sendo, são mostradas as curvas referentes ao ferro puro (Fe-Puro), Fe-1%P, Fe-1%Si e Fe-50%Ni. Todavia, os dados coletados de todas as amostras estão exibidos na Tabela 1.

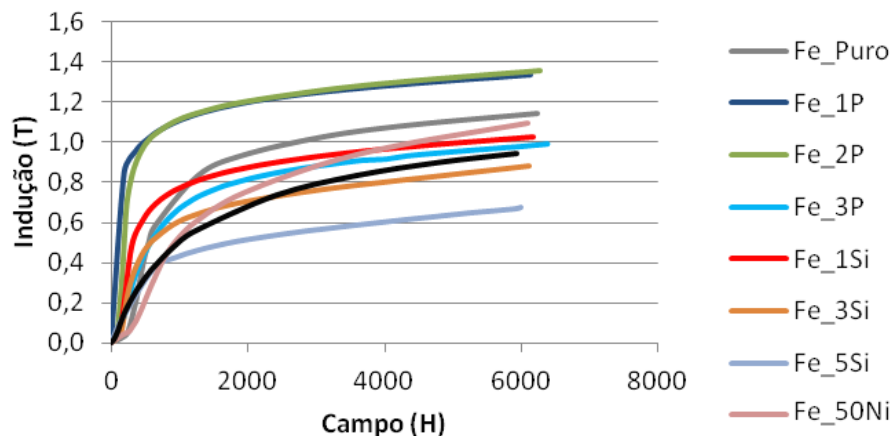


Figura 8 – Curvas de magnetização das ligas sinterizadas  
Fonte: do Autor

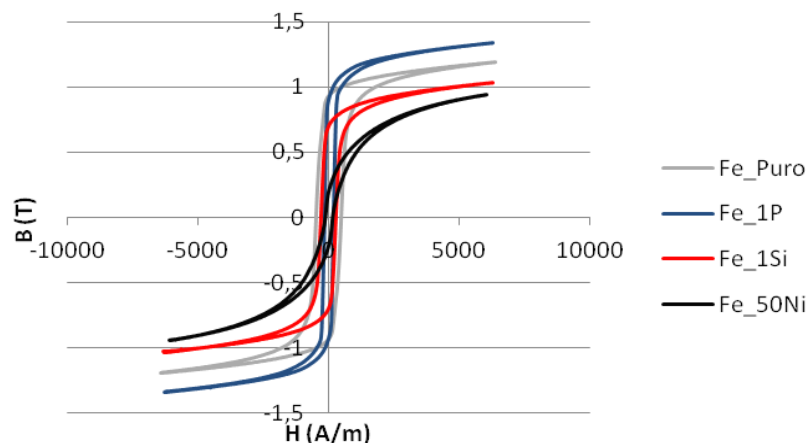


Figura 9 – Laço de Histerese de algumas ligas sinterizadas  
Fonte: do Autor

A partir das Figuras 8 e 9, pode-se observar que o Fe-50%Ni apresentou menores coercitividade e perdas por histerese (área interna da curva) que os demais materiais sinterizados. Porém, esta mesma liga apresentou, também, menor indução de saturação, propriedade de grande importância para aplicação destes materiais em núcleos de máquinas elétricas. Salienta-se que a curva de histerese do Fe puro tem características semelhantes ao ferro baixo carbono,

material típico utilizado em pacotes de chapas laminadas utilizados na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas convencionais (FITZGERALD et al., 1990; NASAR, 1987; KOSOW, 1991). O Fe-1%P apresentou maior indução máxima, menores perdas por histerese e coercitividade em relação ao ferro puro.

A Tabela 1 mostra os resultados da densidade, resistividade elétrica, das propriedades magnéticas e mecânicas observadas na forma de anel e cilindro, a partir dos valores médios de três corpos de prova para cada material estudado.

Tabela 1 – Propriedades físicas das ligas sinterizadas estudadas

Material	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_e$ [ $\mu\Omega.m$ ]	$B_r$ [T]	$H_c$ [A/m]	$B_{max}$ [T]	$\mu_r$	HB	$\sigma_e$ [kgf/mm <sup>2</sup> ]
Fe Puro	6,632	0,157	0,90	448,2	1,19	1.852,6	52,1	13,99
Fe-1%P	6,712	0,197	0,96	215,8	1,25	2.766,1	124,5	14,79
Fe-2%P	6,874	0,358	1,00	207,9	1,36	4.198,7	202,4	12,64
Fe-3%P	7,003	0,421	0,50	210,7	0,98	919,4	242,9	11,99
Fe-1%Si	6,697	0,276	0,71	246,3	1,03	1.959,8	64,5	14,93
Fe-3%Si	6,732	0,444	0,48	225,4	0,85	1.258,7	73,2	15,99
Fe-5%Si	6,762	0,482	0,30	216,3	0,67	493,8	101,9	17,24
Fe-50%Ni	7,251	0,371	0,22	112,1	0,93	945,6	101,1	16,49

$\rho_m$  é a densidade,  $\rho_e$  a resistividade elétrica,  $B_r$  a retentividade,  $H_c$  a coercitividade,  $B_{max}$  a indução de saturação (observada para campo de 6 kA/m),  $\mu_r$  a permeabilidade magnética relativa, HB a dureza na escala Brinell,  $\sigma_e$  a tensão de escoamento.

Fonte: do Autor

O Ferro puro sinterizado apresenta uma densidade entre 6,8 a 7,4 g/cm<sup>3</sup>, enquanto a liga Fe-1%P fornece valores de densidade entre 7,0 a 7,4 g/cm<sup>3</sup>; por sua vez, a mistura Fe-3%Si denota uma densidade entre 6,8 a 7,2 g/cm<sup>3</sup>, e a liga Fe-50%Ni apresenta uma densidade entre 6,8 a 7,5 g/cm<sup>3</sup>. Entretanto, somente esta última liga resultou uma densidade de acordo com a referência (7,25 g/cm<sup>3</sup>) (JANSSON, 1992). As densidades das outras ligas apresentaram valores no limite inferior das faixas citadas ou abaixo destas. Tal fato pode ser atribuído às muitas variantes nos processos da M/P, na qual fatores como tamanho e forma de partícula, pressão de compactação, patamares de sinterização e atmosfera influenciam na densidade desejada (BRADBURY, 1986; GERMAN, 1997).

Ademais, algumas referências não indicam as pressões de compactação utilizadas para materiais magnéticos macios por M/P, sendo que em alguns estudos utilizam-se pressões de até

800 MPa para materiais compósitos por M/P (SIMCHI, NOJOO MI, 2013), e tal pressão tende a aumentar a densidade.

No que concerne à resistividade, esta aumentou com a adição de P, Si, e Ni no Fe, pois estes acréscimos provocam distorções no reticulado cristalino (BAS, 2003; VERMA, UPADHYAYA, 2007). O Fe puro apresentou resistividade de  $0,157 \mu\Omega.m$ , contra  $0,482 \mu\Omega.m$  da liga Fe5%Si. A maior resistividade foi obtida na liga Fe-5%Si, pois o silício, durante o processo de sinterização, não se densifica homoganeamente no ferro e a substituição dos grãos de ferrita pelo silício aumenta a imperfeição na rede cristalina e eleva a resistividade (BUSCHOW, 2011; ASAKA, ISHIHARA, 2005; SILVA, 2003). As elevadas resistividades apresentadas no ensaio com material magnético macio são fundamentais para o uso em núcleo de máquinas elétricas rotativas, uma vez que, desta maneira, reduzem-se as correntes parasitas. A diminuição das correntes induzidas pode ser interpretada como um aumento da resistência elétrica do corpo, uma vez que são grandezas físicas inversamente proporcionais. Este efeito de redução das correntes induzidas também pode ser obtido com o aumento da resistividade elétrica do material. Portanto, quanto maior a resistividade do material, menores serão as correntes induzidas e as perdas por correntes parasitas. Também são fundamentais valores elevados de permeabilidade magnética relativa e indução de saturação, possibilitando assim que a máquina apresente uma elevada relação torque / volume (FITZGERALD *et al.*, 1990; NASAR, 1987; LALL, BAUM, 1998; NARASIMHAM *et al.*, 2008; HANEJKO, PHAN, 1996).

O acréscimo de fósforo permite obter as propriedades mecânicas desejadas, utilizando-se temperaturas de sinterização menores, devido à formação de fase líquida transiente. O fósforo, em percentuais inferiores a 1%, não confere ao ferro sinterizado diminuição do limite de escoamento. Por outro lado, sua presença promove o aumento da dureza (VERMA, UPADHYAYA, 2007; HANEJKO, PHAN, 1996). De fato, qualquer acréscimo do teor de um elemento de liga em um metal, como o ferro, aumenta a dureza da liga devido às distorções no reticulado cristalino (KHRAISAT, NYBORG, 2003).

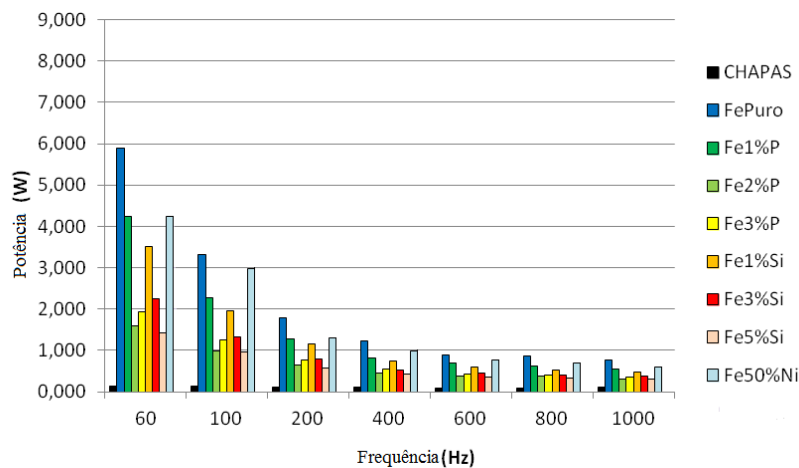
Em relação às ligas estudadas, a liga Fe-3%P apresentou tensão de escoamento de 120,0 MPa ( $11,99 \text{ kgf/mm}^2$ ), enquanto a Fe-5%Si, 172,4 MPa. O aço 1008 utilizado na maioria de núcleos de máquinas elétricas rotativas (FITZGERALD *et al.*, 1990; NASAR, 1987) possui tensão de **escoamento** média de 170 MPa, valor próximo das ligas estudadas. O Aço AISI 1008 possui dureza de 86 HB (FLETCHER, 1995). A dureza do Ferro puro sinterizado foi de 52,5 HB, e o Fe-3%P apresentou dureza

de 242,9 HB. Assim, com relação às propriedades mecânicas, os materiais sinterizados estudados estão dentro de parâmetros aceitáveis para sua utilização na construção de núcleos da maioria das máquinas elétricas rotativas (FITZGERALD *et al.*, 1990; NASAR, 1987).

#### 4.2 PERDAS EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA

A Figura 10 mostra o gráfico das perdas magnéticas em Watt para frequências de 60 Hz a 1 kHz para o transformador com núcleo de chapas e para os núcleos dos materiais sinterizados. Nesta figura, pode-se observar que, enquanto as perdas magnéticas no núcleo de chapas permanecem praticamente constantes, as perdas nos núcleos sinterizados decaem exponencialmente até 400 Hz, tornando-se inalteradas a partir desta frequência. Tal característica permite a utilização destes materiais sinterizados em máquinas com corrente elétrica de elevada frequência, indo ao encontro de dados da literatura (BAS *et al.*, 1998). Como exemplo, cita-se que para um motor girar a 15.000 RPM, a frequência das correntes de armadura deve ser de 500 Hz (FITZGERALD, *et al.*, 1990; NASAR, 1987). Tal frequência estaria na faixa em que núcleos de motores com materiais sinterizados possuem perdas próximas aos motores com núcleos de chapas.

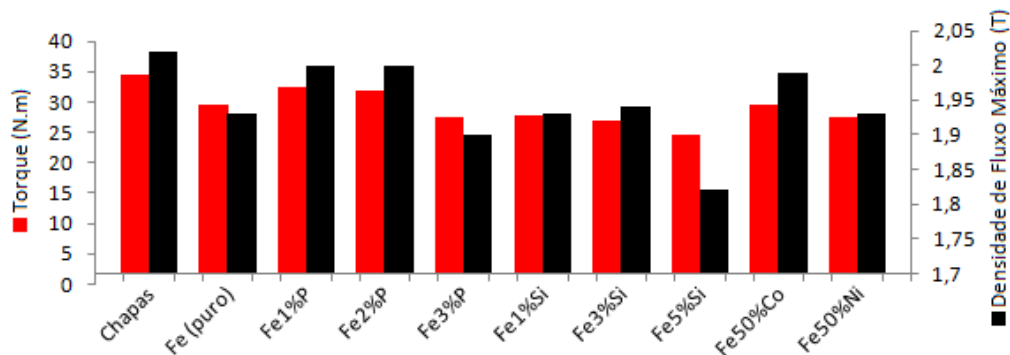
Na avaliação das perdas observadas, com o acréscimo da frequência, a tensão induzida aumenta, a corrente de magnetização diminui e, desta maneira, as perdas seriam menores para os núcleos construídos com chapas laminadas. No entanto, para frequências acima de 400 Hz, o efeito da construção do núcleo de chapas laminadas não reduz as correntes parasitas, comparativamente ao núcleo maciço, ou seja, a tensão induzida aumenta e a corrente de magnetização diminui, mas as correntes parasitas aumentam. Nos núcleos sinterizados, somente a tensão induzida aumenta, a corrente de magnetização diminui e as correntes parasitas não sofrem acréscimo em seu valor (FITZGERALD *et al.*, 1990; NASAR, 1987; KRAUSE *et al.*, 1997; HANEJKO *et al.*, 1998).



**Figura 10 – Perdas Magnéticas em Transformadores com Núcleo de Chapas e Fe com fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 5%) e níquel (50%)**  
 Fonte: do Autor

#### 4.3 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

A Figura 11 mostra o torque e a densidade de fluxo máxima (fluxo magnético de entreferro) nas simulações realizadas com as chapas de aço laminadas e com os materiais obtidos pelos processos da metalurgia do pó.



**Figura 11 – Resultados de Torque e Densidade de Fluxo Máximo**  
 Fonte: do Autor

Nas simulações realizadas estaticamente, o torque instantâneo e o fluxo magnético no núcleo de Fe-1%P resultaram valores próximos em relação aos das tradicionais chapas de aço laminadas. O núcleo de Fe-1%P apresentou torque instantâneo de 32,46 N.m e fluxo magnético de 2,00 T e o núcleo de chapas de aço laminadas, respectivamente, 34,49 N.m e 2,02 T. A equivalência entre os resultados obtidos ocorre em razão dos valores elevados de permeabilidade

magnética, indução de saturação e resistividade elétrica, assim como a baixa coercitividade apresentada nos ensaios magnéticos e elétricos.

Em uma máquina elétrica rotativa, seja funcionando como motor ou gerador, o torque na ponta de eixo é função do fluxo magnético de entreferro (indução máxima) e da inclinação das linhas de fluxo magnético no entreferro, também conhecido como ângulo de carga para o caso das máquinas elétricas síncronas rotativas. Uma máquina elétrica rotativa é, portanto, um transdutor dinâmico de energia, ou seja, como motor, transforma energia elétrica dos enrolamentos de armadura em energia mecânica entregue a uma carga na ponta de eixo. Em um gerador, processa-se o contrário, isto é, há transformação da energia mecânica na ponta de eixo, a partir de uma turbina, por exemplo, em energia elétrica. Em ambos os casos, a conversão de energia elétrica para mecânica e vice-versa ocorre a partir do campo magnético, e o fluxo magnético de entreferro é o fator determinante. Em razão disso, através da simulação, consideram-se como melhores resultados as máquinas que operam com maior fluxo magnético de entreferro e os maiores torques finais (FITZGERALD *et al.*, 1990; NASAR, 1987; KOSOW, 1991).

A Figura 12-(a) mostra as linhas de fluxo magnético para a máquina com chapas laminadas obtidas a partir do *software* FEMM 4.2. A Figura 12-(b) mostra as linhas de fluxo magnético para a máquina com núcleos construídos a partir dos processos da Metalurgia do Pó. As regiões mais escuras na referida figura demonstram os maiores fluxos magnéticos, fato este atribuído aos ímãs estarem exatamente no centro dos polos da máquina elétrica.

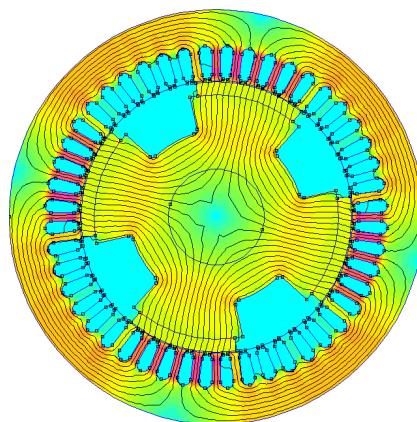


Figura 12 – (a) Fluxo magnético na máquina com chapa de aço laminado  
Fonte: do Autor



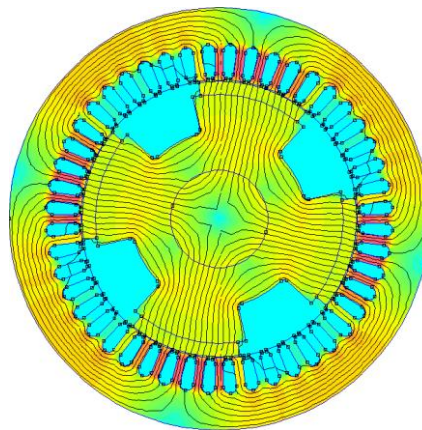


Figura 12 – (b) Fluxo magnético na máquina com a liga Fe1%P sinterizado  
 Fonte: do Autor

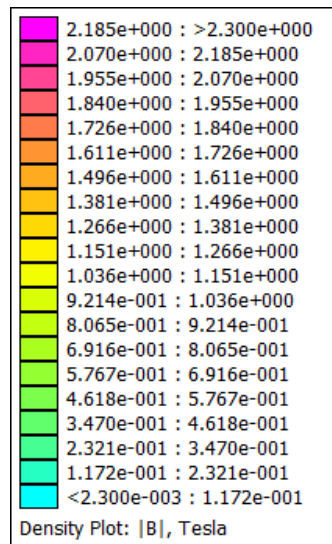


Figura 12 (c) Legenda da intensidade de campo em “a” e “b”  
 Fonte: do Autor

A partir dos resultados de fluxo magnético na máquina, foi possível a obtenção dos picos deste fenômeno, no interior da máquina, conforme mostra a Figura 13.

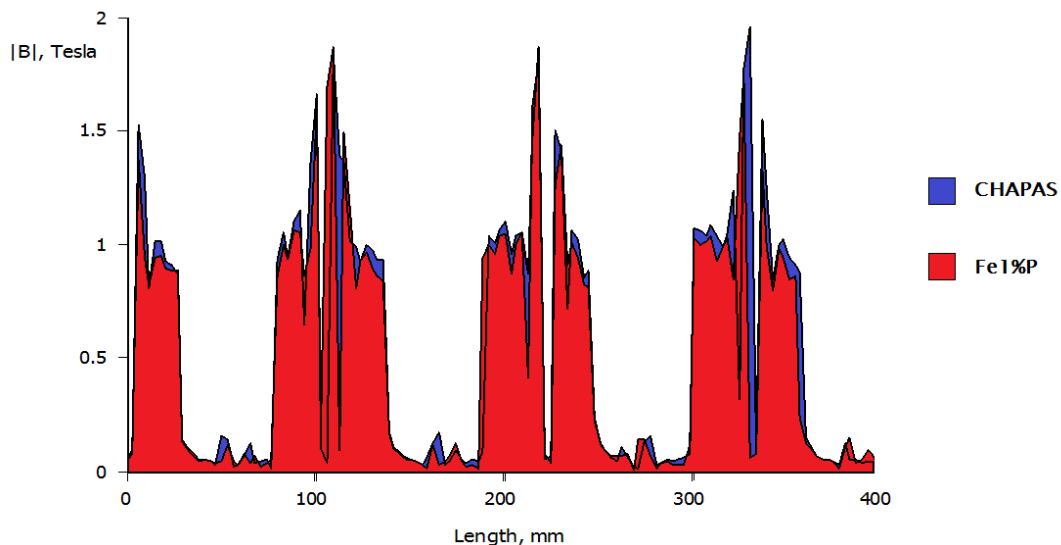


Figura 13 – Picos de intensidade de fluxo magnético no rotor e estator (chapas e Fe1%P)  
Fonte: do Autor

Os testes e simulações realizados com material magnético macio apresentaram resultados promissores na comparação com motores construídos a partir do método convencional de chapas laminadas. O fluxo magnético no núcleo de Fe-1%P apresentou resultados equivalentes com relação às tradicionais chapas de aço laminadas, porém ocorreu uma redução no torque final da máquina elétrica, considerando uma mesma potência de excitação. Esse problema pode ser contornado principalmente em aplicações que tenham potência de entrada com possibilidade de variação da tensão aplicada, o que pode aumentar o fluxo magnético e manter o torque em níveis semelhantes aos modelos de máquinas tradicionais com chapas laminadas (FITZGERALD *et al.*, 1990; NASAR, 1987).

## 5 CONCLUSÃO

Com relação à densidade, propriedades mecânicas, resistividade elétrica e propriedades magnéticas, as ligas estudadas apresentaram características em conformidade com aquelas citadas na literatura, portanto sua obtenção preenche os requisitos mínimos para serem aplicados em determinadas partes de máquinas elétricas rotativas.

É importante salientar que as curvas de histerese foram traçadas em frequências baixas, ou praticamente nível DC. Deve-se mencionar também que a simulação de torque resulta valores instantâneos para uma determinada posição relativa entre o alinhamento dos núcleos de rotor e estator, sem considerar a frequência de giro do rotor ou a frequência da corrente elétrica que

alimenta os enrolamentos de armadura. Por este motivo, foram muito importantes para este estudo os ensaios de perdas em núcleos de magnéticos na forma de transformadores, que possuem funcionamento análogo a núcleo de motores elétricos. Podem-se observar destes ensaios que, a partir de 500 Hz de frequência para a corrente elétrica, mantendo-se constante a tensão induzida, as perdas nos núcleos dos materiais sinterizados estudados aproximam-se das perdas em núcleos de chapas laminadas. Verifica-se, também, que, enquanto as perdas em núcleos de chapas permanecem constantes com o aumento da frequência, as perdas nos núcleos de materiais magnéticos macios decaem exponencialmente até os 400 Hz. Esta característica, importante de núcleos sinterizados, permite sua aplicação em determinados tipos de máquinas elétricas rotativas como motores de alta rotação, servomotores que são acionados por correntes elétricas de frequências próximas ou superiores aos 400 Hz, e geradores com elevado número de polos.

Assim, a máquina proposta neste estudo com núcleos do rotor e estator de materiais sinterizados, se alimentada com correntes de 60 Hz, teria um rendimento baixíssimo. Contudo, o rendimento aumentaria exponencialmente para frequências maiores. Uma alternativa para esta máquina em baixas frequências seria a construção do rotor com material sinterizado e o estator com núcleo de chapas. Tal combinação seria muito interessante, pois a variação de fluxo significativa ocorre no estator, enquanto no rotor se mantém praticamente estático.

## 6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, CNPq, Fapergs e FINEP pelas bolsas e financiamento do projeto.

## REFERÊNCIAS

ASAKA, K.; ISHIHARA, C. **Technical trends in soft magnetic parts and materials**, Hitachi Powdered Metals Technical Report, n. 4, 3–9, 2005.

ASTM A773/A773M. **American Standard Test Method for DC Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with DC Electronic Hysteresigraphs**, 2009.

ASTM E10. **Standard Test Methods for Brinell Hardness of Metallic Materials**, 2012.

ASTM E9. **Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature**, 2000.

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.

BAS, J.A.; CALERO, J.A.; DOUGAN, M.J. Sintered soft magnetic materials: properties and applications. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 254–255, 2003. pp. 391-398.

BOLDEA, I. **Reluctance Synchronous Machines and Drives**. New York., Oxford University Press Inc., 1996. 230 pp.

BOYLESTAD, R. L.; NASHESKY, L. **Electronic Devices and Circuit Theory**. New Jersey: Prentice Hall, 2009. 894 pp.

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

BUSCHOW, K.H.J. **Handbook of Magnetic Materials**. Elsevier Science v. 19, 2011. 464 pp.

FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, Jr.C.; UMANS, S.D. **Electric Machinery**. New York, McGraw-Hill Inc, 1990. 599 pp.

FLETCHER F.B. Carbon and Low-Alloy Steel Plate *in*: ASM Handbook, v.1, **Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**, Materials Park, OH, 1995.

GERMANN, R.M.; BOSE, A. **Powder Injection Molding**; Ed. MPIF; p.520, USA, 1990.

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

HANEJKO, F.G.; ELLIS, G.W.; HALE, T.J. **Application of high performance material processing: electromagnetic products**. Las Vegas: Hoeganaes Corporation, Presented at PM2TEC, 1998. p.16.

HANEJKO, F.G.; PHAN, H.G. **Powder metallurgy materials for AC magnetic applications**. Washington, D.C.: Presented at PM TEC, 96 World Congress, June 16-21, 1996.

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

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

JILES. D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. USA: Boca Raton, Chapman and Hall, 568 pp. 1998.

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

- KOSOW, I.L. **Electric Machinery and Transformers**. Prentice Hall, 1991, 626p.
- 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.6,1997, pp. 710-712.
- LALL, C. The Effect of Sintering Temperature and Atmosphere on the Soft Magnetic Properties of P/M Materials. **Advances in Powder Metallurgy**, v.3, 1992, pp.129-156.
- 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. pp. 363-389.
- LENEL, F.V. **Magnetic Applications**. Metals Handbook, v. 7, 1984. pp. 638-641.
- LUBORSKY, F. E., LIVINGSTON, J. D., CHIN, G. Y. **Magnetic Properties of Metals and Alloys**. Physical Metallurgy. Amsterdam: Elsevier Science, 1996.
- MEEKER, D., **Finite Element Method Magnetics**. User's Manual, v. 4.2, 2010.
- MOYER, K.H., MCDERMOTT, M.J., TOPOLSKI, M.J., KEARNEY, D.F. Magnetic Properties of Iron Alloys. **Powder Metallurgy**, v.30, n.1, 1981, pp.51-71.
- NASAR, S.A. **Handbook of Electric Machines**. New York: McGraw-Hill, 1987.
- NARASIMHAM, K.; HANEJKO, F.; MARUCCI, L. **Growth Opportunities with Soft Magnetic Materials**. Washington, D.C.: Hoeganaes Corporation, 2008. 9 p.
- PERSSON, M., **SMC Update**, v.1, n.1, April. 1997.
- SILVA, M.C.A.; BOLFARINI, C.; KIMINAMI, C.S.; GUSSON, P.P. Magnetic Properties of Spray Formed Fe-3%wtSi, Fe-5%wtSi and Fe-6%wtSi Alloys. **Materials Science Forum**, v. 416, n.4, 2003. pp. 113-118.
- SIMCHI, A., NOJOOMI, A.A., **Warm Compaction of Metallic Powders**, p. 86-108 in *Powder Metallurgy: properties, processing and application*, Isaac Chang and Yuyuan Zhao Editors, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2013.
- VERMA, N.; UPADHYAYA, A. **Effect of Phosphorus addition as sintering activator in Sinter-Hardened alloy steels**. Department of Materials and Metallurgical Engg, Indian Institute of Technology, 2007. 26 pp.