

# ESTUDO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS SINTERIZADOS PARA APLICAÇÃO EM SERVOMOTORES

## STUDY OF SINTERIZED SOFT MAGNETIC MATERIALS FOR APPLICATION ON SERVOMOTORS

**Vitor Caetano Almeida Zandoná** [vitorzandona123@gmail.com](mailto:vitorzandona123@gmail.com)

Graduando em Engenharia Eletrônica pela Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil).

**Sergio Deitos Bittencourt** [sergio\\_deitos\\_bittencourt@hotmail.com](mailto:sergio_deitos_bittencourt@hotmail.com)

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil). Professor na Faculdade São Francisco de Assis (Porto Alegre/Brasil).

**Moisés de Mattos Dias** [moisesdias@feevale.br](mailto:moisesdias@feevale.br)

Doutor em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil). Professor na Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil).

**Monir Göethel Borba** [monir.borba@ufrgs.br](mailto:monir.borba@ufrgs.br)

Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).

**Eduardo Luis Schneider** [00096217@ufrgs.br](mailto:00096217@ufrgs.br)

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil). Professor na Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil).

**José Carlos Krause de Verney** [jcverney@ulbra.br](mailto:jcverney@ulbra.br)

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil). Professor na Universidade Luterana do Brasil (Canoas/Brasil).

**José Lesina César** [engmecanica.canoas@ulbra.br](mailto:engmecanica.canoas@ulbra.br)

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil). Professor na Universidade Luterana do Brasil (Canoas/Brasil).

**Luiz Carlos Gertz** [gertzlx@gmail.com](mailto:gertzlx@gmail.com)

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil). Professor na Universidade Luterana do Brasil (Canoas/Brasil).

**Lirio Schaeffe** [schaefer@ufrgs.br](mailto:schaefer@ufrgs.br)

Doutor em Conformação Mecânica pela RWTH Aachen University (Aachen/Alemanha). Professor na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).

RT&T | a. 11 | n. 1 | p. 170-192 | jan./jun. 2020

Recebido em: 24 de agosto de 2019 | Aprovado em: 10 de dezembro de 2019

Sistema de Avaliação: Double Blind Review | DOI: <https://doi.org/10.25112/rtt.v11i1.2297>

## RESUMO

Este trabalho teve por objetivo o estudo de ligas sinterizadas a partir de Fe puro, FeP, FeSi e FeNi obtidas a partir do processo da Metalurgia do Pó e sua aplicação em núcleos de rotor e estator de servomotores, operando com corrente elétrica de armadura de alta frequência, reduzindo assim, nestas frequências, as correntes parasitas, as quais causam perda de potência nestas máquinas. O estudo compreendeu obtenção de curvas de histerese destas diversas ligas, ensaios para avaliação de perdas elétricas e simulação em software de elementos finitos para obtenção de fluxo de entreferro e conjugado eletromagnético (torque). Os estudos teóricos e simulações foram realizados em um servomotor de topologia convencional e os testes foram realizados comparativamente a servomotores com núcleos obtidos a partir de chapas de aço laminadas. Nas simulações realizadas estaticamente, o torque instantâneo e o fluxo magnético no núcleo de Fe1%P resultaram valores próximos em relação às tradicionais chapas de aço laminadas. O núcleo de Fe1%P apresentou torque instantâneo de 1,59 N.m e fluxo magnético de 1,70 T e o núcleo de chapas de aço laminadas, respectivamente, 1,65 N.m e 1,66 T.

**Palavras-chave:** Metalurgia do Pó. Servomotores. Simulação por elementos finitos.

## ABSTRACT

This work aimed to study sintered alloys from pure Fe, FeP, FeSi and FeNi obtained by Powder Metallurgy process, and its application in rotor and stator cores of servomotors, operating with armature electric current in high frequency, thus reducing, in these frequencies, eddy currents, which cause loss of power in these machines. The study comprised obtaining hysteresis curves from these different alloys, tests to evaluate electrical losses and simulation in finite element software to obtain airflow and electromagnetic conjugate (torque). Theoretical studies and simulations were performed on a conventional topology of servomotor, and the tests were carried out comparatively to servomotors with cores obtained from rolled steel sheets. In the simulations performed statically, the instantaneous torque and the magnetic flux in the Fe1%P core resulted close values in relation to the traditional laminated steel sheets. The Fe1%P core had an instantaneous torque of 1.59 N.m and a magnetic flux of 1.70 T and the core of rolled steel sheets, respectively, 1.65 N.m and 1.66 T.

**Keywords:** Powder Metallurgy. Servomotors. 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, 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 melhor desempenho, como os geradores e motores de alto rendimento, são construídas com chapas de aço-silício, com percentual de aproximadamente 3% de silício. O processo para confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, estampagem, tratamento térmico para isolamento elétrica entre as chapas adjacentes, empacotamento e fixação [1, 2].

Os núcleos do rotor e estator são envolvidos por enrolamentos de campo e armadura respectivamente, onde os enrolamentos de campo são alimentados por corrente elétrica contínua e os enrolamentos de armadura são alimentados por corrente elétrica alternada trifásica ou polifásica. Em algumas máquinas os enrolamentos de campo são substituídos por ímãs permanentes, tipicamente o NdFeB. Núcleos magnéticos envolvidos por enrolamentos alimentados por corrente elétrica alternada ficam sujeitos a ação de correntes parasitas, também conhecidas por correntes de Foucault, que são responsáveis por apreciável perda de potência nestes núcleos. A construção destes a partir de chapas de aço isoladas eletricamente reduz parcialmente as correntes parasitas, reduzindo as perdas por correntes de Foucault [1, 2].

Uma alternativa consiste na utilização dos processos da Metalurgia do Pó (M/P). Através deste método é possível construir núcleos em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética e alta resistividade elétrica [3, 4]. Na medida em que for possível construir motores elétricos em blocos únicos e maciços, estarão presentes menos etapas na construção dos mesmos e menos energia será consumida na produção dos motores. Deve ser salientado, todavia, 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 do Pó. Deste modo, a aplicação da M/P em núcleos de máquinas elétricas fica restrita a motores elétricos especiais, onde o rendimento não é o critério mais importante, ou, em alguns servomotores, em que os enrolamentos de armadura são alimentados com corrente elétrica de frequência elevada podendo atingir até 600 Hz. Salienta-se 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 [3, 4].

A aplicação da M/P em máquinas elétricas rotativas estende-se desde o uso de ligas sinterizadas convencionais a partir de ferro e outros elementos de liga como o P, Si e Ni, compósitos como Ferro-

Resina, Microencapsulados e materiais a partir da MPI (Moldagem de Pós por Injeção), entre outros. Com relação a M/P convencional, citam-se máquinas síncronas trifásicas para uso em Geradores Trifásicos e Aerogeradores [5-7], Motor de Indução Trifásico [8], Motor de Corrente Contínua [9, 10], Motor para Aeromodelo [11], Servomotor [12], Motor de Passo [13, 14], Motor de Relutância [15]. Relativo a Materiais Compósitos, cita-se a construção de um servomotor a partir de ferro-resina [16]. Através da MPI, citam-se mini motores injetados para endoscopia [17, 18]. Em relação aos microencapsulados, cita-se um motor de corrente construído a partir da liga comercial Somaloy 700 3P e 700 1P [19].

Nas pesquisas de materiais podem ser citados os trabalhos sobre a influência da Mecano Síntese nas propriedades magnéticas de ligas sinterizadas Fe-Si [20] e sobre a influência do teor de resinas (em compósitos ferro-resina) nas propriedades físicas de materiais para uso em dispositivos eletromagnéticos [21].

## 2 NÚCLEOS DE MOTORES ELÉTRICOS A PARTIR DE PÓS METÁLICOS

### 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 de suas variações.

**Metalurgia do Pó Convencional:** a M/P é um processo da metalurgia de transformação onde as peças são obtidas a partir dos pós constituintes. Os processos básicos são obtenção dos pós, 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 onde adquirem a forma da cavidade da matriz. Após, são colocados em fornos para sinterização onde adquirem consistência e resistência mecânica [22].

**Materiais Microencapsulados:** *Soft Magnetic Composites Materials* ou simplesmente SMCs são basicamente partículas de pó ferromagnético revestidas por filme isolante elétrico como polímeros e óxidos. Componentes SMCs 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 [23].

### 2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DE INTERESSE DE MATERIAIS PARA NÚCLEOS DE MOTORES ELÉTRICOS

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 [1, 2].

- Propriedades Magnéticas (coercitividade, permeabilidade, indução de saturação).

- Resistividade Elétrica.
- Propriedades mecânicas (dureza ou ductilidade).

Com relação às propriedades magnéticas, os materiais a serem utilizados em núcleos de máquinas elétricas devem possuir [1, 2]:

- 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, o que possibilita trabalhar com maior fluxo magnético, resultando em maior torque na ponta de eixo;
- baixa coercitividade, o que reduz as perdas por ciclo de histerese.

A resistividade elétrica deve possuir o maior valor possível para minimizar o efeito das correntes parasitas. Sempre que existe 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 menor a espessura das chapas, menor são as correntes parasitas e menor a perda de potência nestes núcleos. A redução das correntes induzidas também pode ser obtida a partir do aumento da resistência elétrica do corpo, ou a partir do aumento da resistividade elétrica do material, uma vez que resistência ou resistividade e corrente elétrica são grandezas físicas inversamente proporcionais. Por este motivo, motores elétricos de alto rendimento são construídos com chapas de aço silício, que possui resistividade elétrica maior que o aço baixo carbono [1, 2].

Com relação às 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 ou ductilidade, curva de compressão x deformação ou curva de escoamento e avaliação de microestrutura [1, 2].

O material utilizado na construção dos núcleos do estator e do rotor devem apresentar as propriedades resumidas a seguir [1, 2].

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

### 2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE MATERIAIS SINTERIZADOS

As propriedades físicas dos materiais obtidos por M/P convencional ou MPI (ou MIM) como, por exemplo, as magnéticas e elétricas, são influenciadas por vários fatores. Os considerados de maior importância no desenvolvimento deste trabalho estão abordados a seguir.

- A resistividade de um elemento metálico geralmente aumenta quando são adicionadas impurezas, uma vez que estas provocam distorções no reticulado cristalino. Por este motivo, ocorre um aumento da resistividade do ferro sinterizado quando elementos como o Si, P ou Ni são adicionados [24].
- 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 à oxidação superficial das partículas [25]. Com o aumento da porosidade, ocorre a diminuição da permeabilidade magnética, a diminuição da indução de saturação e o aumento da coercitividade [26].
- 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 decréscimo da permeabilidade magnética e aumento da coercitividade [27].
- O aumento da granulometria do pó aumenta a permeabilidade magnética mas aumenta também a coercitividade [28]. Além disto, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização alteram as propriedades físicas [25].
- Impurezas como carbono, nitrogênio e oxigênio 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: Carbono: 0,01% máximo, Oxigênio: 0,02% máximo, Nitrogênio: 0,01% máximo [29].

Os materiais sinterizados mais utilizados são listados a seguir [29-31].

- Ferro Puro.
- Ligas Ferro-Cobalto.
- Ligas Ferro-Fósforo.
- Ligas Ferro-Silício e ligas Ferro-Fósforo-Silício.
- Aços Inoxidáveis Ferríticos.
- Ligas Ferro-Níquel.

## 2.4 SERVOMOTORES

O servomotor é uma máquina elétrica síncrona rotativa que possui algum tipo de controle de velocidade e posição angular, a partir de sensores como o encoder e o resolver. Um tipo comum de servomotor possui enrolamentos no estator alimentados com corrente alternada e ímãs permanentes no rotor, como o Nd-Fe-B. Portanto, um Servo Acionamento é composto de um motor e de um conversor de frequência para controle e acionamento do motor [32, 33].

Estes motores são utilizados em aplicações industriais, onde, elevada dinâmica, controle de torque, precisão de velocidade e posicionamento são fatores decisivos para o aumento da qualidade e produtividade. Possuem todas estas características aliadas a um baixo custo, elevada performance e robustez [32, 33].

## 2.5 SIMULAÇÃO POR SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS

Os resultados das interações 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 objetivo 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 [34].

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 aprimoradas para atingir o ponto ideal de trabalho.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 FORMULAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

O estudo foi realizado a partir de ligas sinterizadas, obtidas a partir de pós de ferro misturado ao fósforo, silício e níquel, adquiridos da Höganäs Brasil Ltda. Conforme certificado do fabricante, o pó de ferro utilizado foi o ASC100.29, com 99,4% da granulometria entre 45 µm e 150 µm. O pó Fe3P (84% de Fe, 16% de P) apresenta 90% de sua dimensão abaixo de 14,58 µm. O pó FeSi 45 (55% de Fe e 45% de Si) tem 87% de seu conteúdo entre 45 µm e 250 µm e o pó de níquel apresenta granulometria mínima de 3 µm e máxima de 7 µm. O pó de ferro foi misturado com fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 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 a base de estearato de zinco.

### 3.2. CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram definidos na forma de anel para análise das propriedades eletromagnéticas, na forma de cilindro para análise das propriedades mecânicas e estruturais e na forma de núcleos de transformadores para avaliação das perdas magnéticas em função da frequência.

A figura 1 apresenta um exemplo de corpo de prova na forma de anel, em que as amostras foram utilizadas para medição das propriedades magnéticas e resistividade elétrica.



(a)

(b)

**Figura 1 – Amostras na forma de anel – (a) Matriz – (b) Corpo de Prova [35]**

A figura 2 mostra um exemplo de corpo de prova na forma de cilindro, em que as amostras foram empregadas para avaliação das propriedades mecânicas e micrografia.

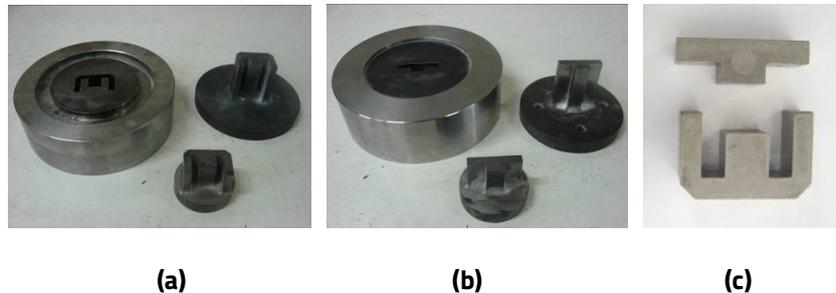


(a)

(b)

**Figura 2 – Amostras na forma de cilindro – (a) Matriz – (b) Corpo de Prova [35]**

Os corpos de prova que formam um Núcleo de Transformador são apresentados na figura 3. As amostras foram utilizadas para medir as perdas magnéticas do núcleo.



**Figura 3 – Amostras na forma de núcleo de transformador – (a) Matriz Núcleo E – (b) Matriz Núcleo T – (c) Corpos de Prova [35]**

O processo de obtenção dos corpos de prova consistiu da mistura dos pós, compactação e sinterização. A compactação foi realizada em uma prensa hidráulica da marca EKA com capacidade de 40 toneladas. Utilizou-se pressão de compactação de 600 MPa. A sinterização 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 15°C por minuto até a temperatura de 500°C, onde as peças permanecem por 30 minutos para retirada do lubrificante sólido (estearato de zinco). A seguir, a temperatura é elevada para 1.120°C onde ocorre a sinterização, permanecendo nesta temperatura por 30 minutos. Após, as peças permanecem 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 e a coercitividade. A partir da curva de magnetização foram obtidas a permeabilidade magnética e a indução de saturação ou indução máxima [36]. A determinação das propriedades magnéticas básicas dos materiais na forma de anel (toróide) segue a norma ASTM A773 [37]. As curvas magnéticas foram obtidas a partir de um dispositivo modelo *TLMP-TCH-14*.

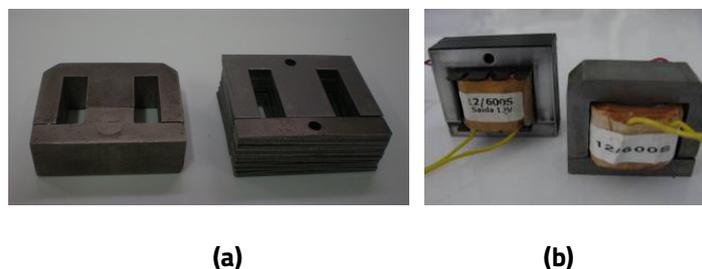
A determinação da resistividade do material foi determinada a partir do cálculo da resistência elétrica. Para medir a resistência elétrica, emprega-se um dispositivo denominado de multímetro, que mede diretamente a resistência elétrica do corpo. Entretanto, para medição de resistência elétrica muito 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.

Para avaliação da resistência à vibração de um material a ser utilizado em uma máquina elétrica rotativa foram realizados ensaios mecânicos nos corpos de prova. Os ensaios de dureza foram realizados em um durômetro segundo a norma ASTM E10 [38]. Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina de ensaios universal Emic DL20000, onde se utilizou velocidades de 2,0 mm/min, segundo a norma ASTM E9 [39].

### 3.3 PERDAS MAGNÉTICAS

As perdas magnéticas foram determinadas a partir de corpos de prova na forma de núcleos E e T idênticos a núcleos de transformadores de tensão elétrica convencionais, com mesmas dimensões e mesmos enrolamentos. Assim, as perdas magnéticas foram obtidas de forma similar às perdas em um transformador convencional com núcleo de chapas laminadas [1, 2].

Os núcleos nas geometrias E e T foram submetidos a processos de retificação de maneira a resultarem nas mesmas dimensões de um núcleo de transformador elétrico convencional (figura 4-a). A seguir, os núcleos foram bobinados na forma típica de transformadores de tensão elétrica, com bobinas do enrolamento primário e secundário. A figura 4-b apresenta os transformadores montados obtidos por M/P e chapas.



**Figura 4 – Transformadores – (a) Núcleos por M/P (esquerda) e de Chapas (direita) - (b) Bobinados e montados por M/P (direita) e de Chapas (esquerda) [35]**

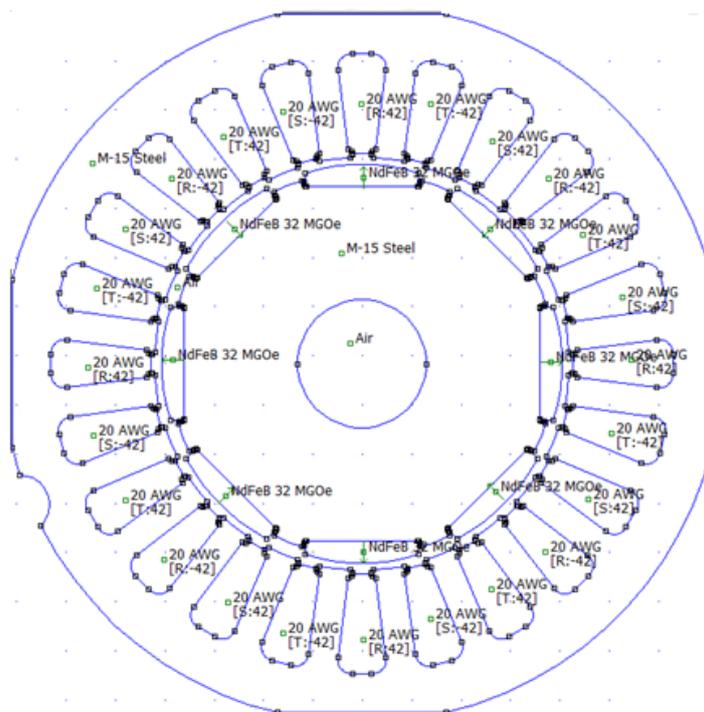
Salienta-se que este trabalho tomou como base um transformador comercial convencional, de baixa tensão e potência. Para o estudo comparativo, optou-se por construir os núcleos dos transformadores com geometria e dimensões próximas às do convencional. Assim, os enrolamentos utilizados nos transformadores desenvolvidos foram os mesmos enrolamentos do transformador convencional, onde este foi desmontado e retirado o carretel onde 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, e o enrolamento de baixa tensão foi dimensionado para operar com tensão de 12 Vrms, considerando

o núcleo de chapas convencionais. Os ensaios foram realizados utilizando-se uma fonte de tensão elétrica alternada com variação de amplitude e frequência. Foi utilizada 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, e variou-se a amplitude do lado de baixa tensão até o lado de alta tensão atingir 75 Vrms. Desta forma, garante-se que a tensão induzida no secundário (lado de alta tensão) permanece constante para os núcleos estudados. Após, mediu-se a potência fornecida pela fonte e descontou-se as perdas no enrolamento. A potência resultante está relacionada diretamente com as perdas nos núcleos por correntes parasitas e ciclo de histerese. Posteriormente, foi colocada uma carga na saída do transformador, e, portanto, nesta configuração para a determinação das perdas magnéticas nos núcleos, deve-se descontar a potência dissipada na carga e a perda nos enrolamentos do secundário. Devido à analogia intrínseca entre o funcionamento de máquinas elétricas rotativas e transformadores, os mesmos ensaios podem ser estendidos a núcleos de motores elétricos.

### 3.4 TOPOLOGIA DO SERVOMOTOR E SIMULAÇÕES

Para a realização das simulações, optou-se pelo servomotor SWA - 40 da WEG Motores. A mesma topologia foi utilizada nas simulações com chapas e com núcleo do estator e rotor a partir de material sinterizado (figura 5). Os materiais obtidos por Metalurgia do Pó tiveram suas propriedades magnéticas inseridas no software de elementos finitos (FEMM 4.2.), desta forma, realizou-se comparação de desempenho com o servomotor original. A tabela 1 mostra as características do servomotor simulado [33].



**Figura 5 – Núcleo introduzido no FEMM 4.2 [35]**

**Tabela 1 – Características do servomotor simulado**

Rotação Nominal	3000	Rpm
Torque	1,6	Nm
Pólos	8	
Potência	400	W
Tensão	230	V

A simulação foi efetuada a partir do projeto dimensional do motor. No estator, foi utilizada a metodologia de bobinagem em série para um motor de oito polos, sendo 42 espiras com fio AWG 20 por ranhura do estator. A corrente nominal utilizada, conforme dados do motor, foi de 2A. No rotor, os ímãs foram dispostos, alternadamente, em relação as suas polaridades. As propriedades das ligas utilizadas nas simulações foram obtidas através das curvas de magnetização dos materiais sinterizados e estes dados foram introduzidos no software FEMM 4.2.

As simulações realizadas mostraram, como exemplo, as linhas de campo expostas na figura 6-a para o núcleo de chapas e figura 6-b para o núcleo de Fe1%P sinterizado. A figura 6-c apresenta a legenda com os respectivos valores dos componentes de densidade de campo B [T].

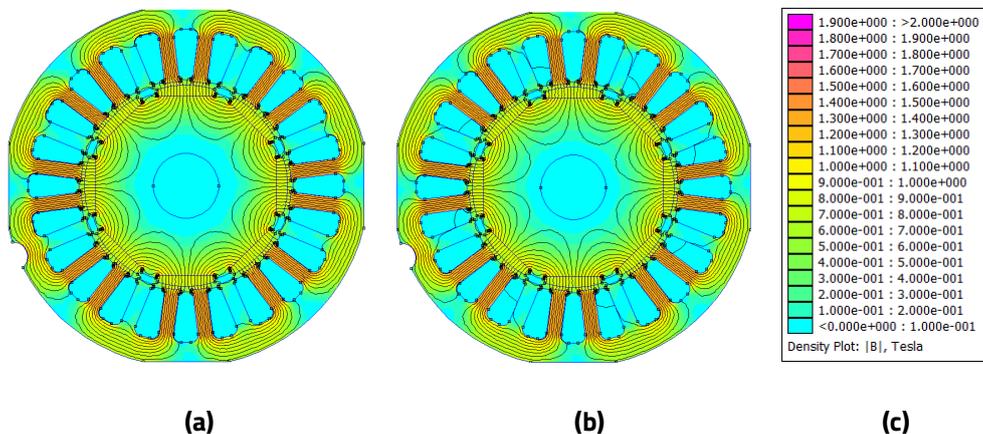


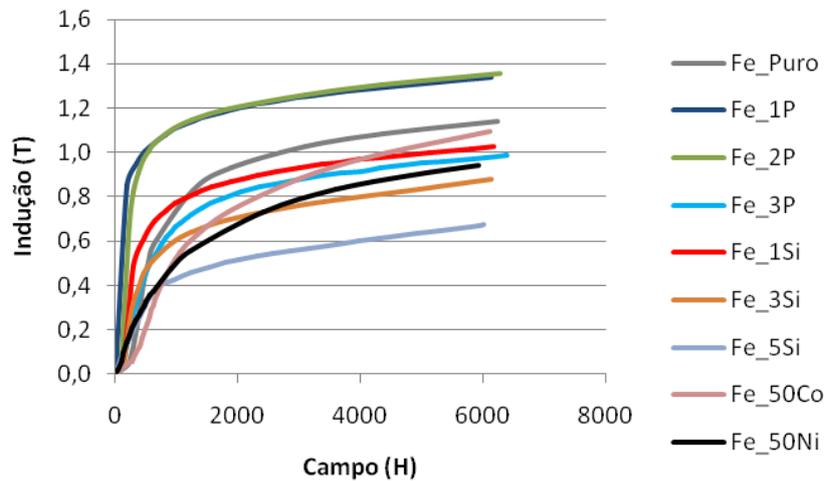
Figura 6 – (a) Fluxo magnético no motor com material laminado; (b) Fluxo magnético no motor com a liga Fe1%P sinterizado; (c) Legenda da intensidade de campo em “a” e “b” [35]

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

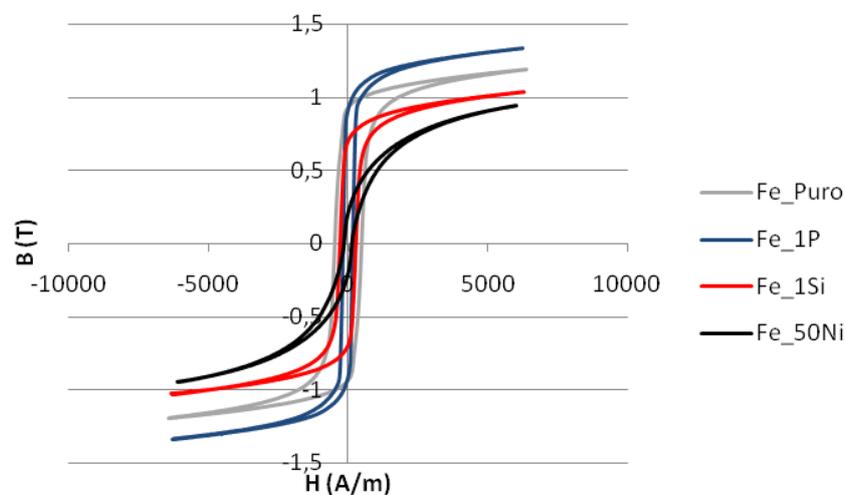
### 4.1 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS E RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS CORPOS DE PROVA

A figura 7 mostra as curvas de magnetização do ferro puro sinterizado e das ligas misturadas com fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 5%) e níquel (50%). A figura 8 apresenta os laços de histerese do ferro puro sinterizado e dos resultados mais significativos em cada liga.

A partir da figura 8 pode-se observar que os laços para a liga Fe50%Ni exibiram menores coercitividade e perdas por histerese (área interna da curva) que os demais materiais sinterizados. Porém, esta liga apresentou 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 possui características semelhantes ao ferro baixo carbono, material típico empregado em pacotes de chapas laminadas, utilizados na construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas convencionais. O Fe1%P apresentou maior indução máxima, menores perdas por histerese e coercitividade em relação ao Fe puro.



**Figura 7 – Curvas de magnetização das ligas sinterizadas [35]**



**Figura 8 – Laço de Histerese com os Materiais Estudados [35]**

A tabela 2 apresenta os resultados da resistividade elétrica e das propriedades magnéticas (corpos de prova na forma de anel) e das propriedades mecânicas (corpos de prova na forma cilíndrica). Os valores indicados são a média de três corpos de prova.

A resistividade aumentou com a adição de P, Si, e Ni no Fe, pois estes acréscimos provocam distorções no reticulado cristalino [40, 41]. O Fe puro apresentou resistividade de  $1,57E-07 \Omega.m$ , contra  $4,82E-07 \Omega.m$  da liga Fe5%Si. A maior resistividade foi obtida na liga Fe5%Si, pois o silício durante o processo de sinterização não se densifica homogeneamente no ferro, quando o percentual é maior do que 3%. A

substituição dos grãos de ferrita pelo Si aumenta a imperfeição na rede cristalina e eleva a resistividade [42-44]. As elevadas resistividades apresentadas no ensaio com os materiais magnéticos macios são fundamentais para o uso em núcleo de máquinas elétricas rotativas, uma vez que, desta maneira, reduz-se as correntes parasitas. Também são fundamentais valores elevados de permeabilidade magnética relativa e indução de saturação, obtidos nos ensaios de histerese [29, 45, 46].

**Tabela 2 – Propriedades elétricas e magnéticas**

Liga	$[\mu\Omega.m]$	$B_r [T]$	$H_c [A/m]$	$\mu_{max}$	$B_{sat} [T]$	Ph [W/kg]	D [HB]	$s_e [kgf/mm^2]$	$\rho_m [g/cm^3]$
Fe Puro	0,157	0,90	448,2	1.852	1,19	0,0160	52,07	13,99	6,632
Fe1%P	0,197	0,96	215,8	2.766	1,25	0,0085	124,5	14,79	6,712
Fe2%P	0,358	1,00	207,9	4.198	1,36	0,0077	202,4	12,64	6,874
Fe3%P	0,421	0,50	210,7	919	0,98	0,0059	242,9	11,99	7,003
Fe1%Si	0,276	0,71	246,3	1.959	1,03	0,0075	64,5	14,93	6,697
Fe3%Si	0,444	0,48	225,4	1.258	0,85	0,0060	73,2	15,99	6,732
Fe5%Si	0,482	0,30	216,3	493	0,67	0,0044	101,9	17,24	6,762
Fe50%Ni	0,371	0,22	112,1	945	0,93	0,0035	101	16,49	7,251

Onde  $\rho$  é a Resistividade Elétrica,  $B_r$  a Retentividade,  $H_c$  a Coercitividade,  $\mu_r$  a Permeabilidade Magnética Relativa,  $B_{sat}$  a Indução de Saturação a 6 KA/m, Ph as perdas por ciclo de histerese, D a dureza,  $s_e$  a tensão de escoamento e  $\rho_m$  a densidade.

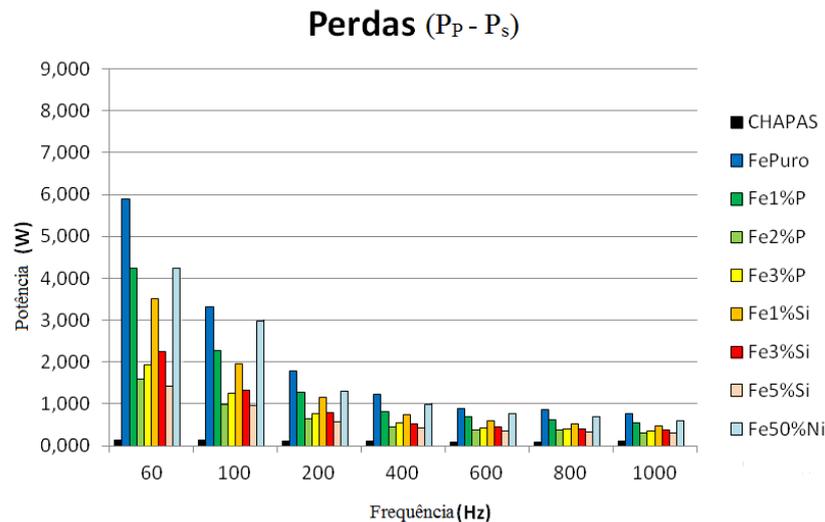
A maior Tensão de Escoamento resultou em 172,4 MPa para a liga Fe-50%Ni, considerando a média obtida de três ensaios em três corpos de prova diferentes. O aço 1008 apresenta tensão de escoamento média de 170 MPa [47].

A menor dureza média obtida foi de 52,07 HR<sub>B</sub> para o ferro puro, considerando a média obtida de três ensaios em três corpos de prova diferentes. Aço AISI 1008 possui dureza de 48 HR<sub>B</sub> [47].

Portanto, com relação às propriedades mecânicas, as ligas estudadas apresentam valores próximos ao aço 1008, utilizado na construção dos núcleos da maioria das máquinas elétricas rotativas, com exceção das ligas Fe-P, as quais aumentam consideravelmente a dura com o acréscimo de ferro [1,2].

#### 4.2 RESULTADOS DAS PERDAS

A figura 9 apresenta as perdas em Watts para frequências de 60 Hz a 1 kHz, relativas aos corpos de prova na forma de transformadores, com núcleos de chapas e núcleos de ferro puro sinterizado e das ligas misturadas com fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 5%) e níquel (50%). Nesta figura pode-se observar que, enquanto as perdas magnéticas nos núcleos de chapas permanecem constantes em função da frequência, as perdas nos núcleos sinterizados diminuem como uma exponencial decrescente tendo a se estabilizar próximo dos 400 Hz.

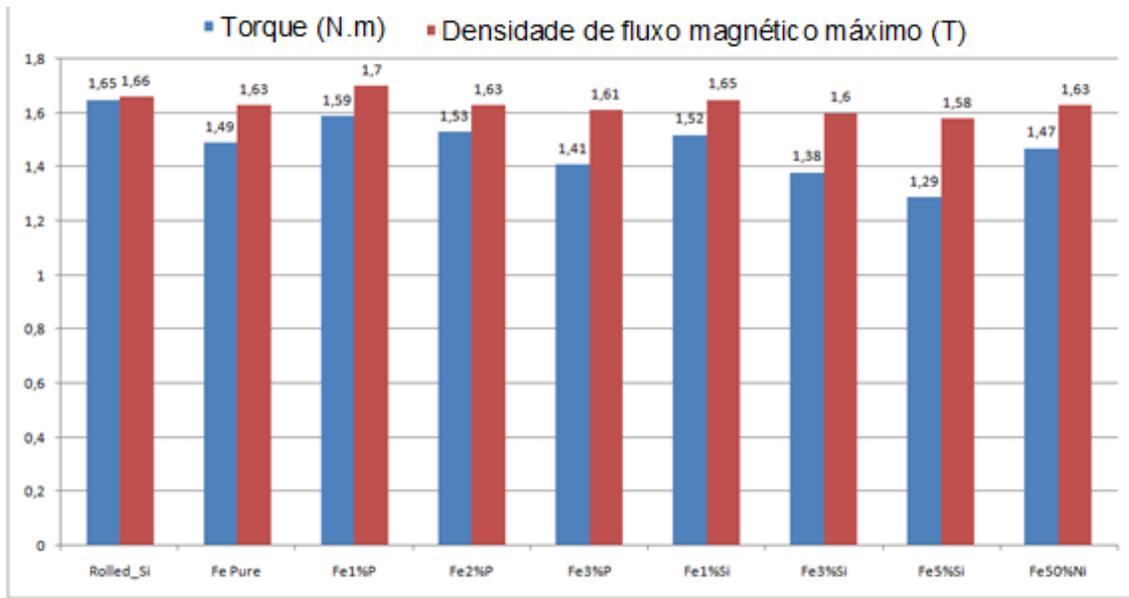


**Figura 9 – Perdas Magnéticas em Corpos de Prova na forma de Transformadores com Núcleo de Chapas e Sinterizados [35]**

Cita-se que um motor para aeromodelismo com estator construído a partir da liga sinterizada Fe1%P para frequências relativamente baixas (1.290 rpm) atingiu um rendimento de 45,7 %, contudo, para frequências maiores (5.720 rpm), alcançou um rendimento de 72,7%, percentuais estes relacionados ao motor original, ou seja, construído a partir de chapas de aço laminadas [24]. Tal fato justifica o uso de materiais a partir dos processos da Metalurgia do Pó e suas variações somente para certas partes das máquinas ou para o uso em altas frequências, como no caso de servomotores.

#### 4.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Foram obtidos os resultados de torque e os picos da densidade de fluxo magnético no interior do motor (figura 10).



**Figura 10 – Comparativo entre Torque (N.m) Densidade de fluxo magnético máximo (T) das ligas estudadas**

Nas simulações realizadas estaticamente, o torque instantâneo e o fluxo magnético no núcleo de Fe1%P resultaram valores próximos em relação às tradicionais chapas de aço laminadas. O núcleo de Fe1%P apresentou torque instantâneo de 1,59 N.m e fluxo magnético de 1,70 T e o núcleo de chapas de aço laminadas, respectivamente, 1,65 N.m e 1,66 T. Isto se deve à baixa coercitividade e aos valores elevados de permeabilidade magnética, indução de saturação e resistividade elétrica encontrados nos ensaios magnéticos e elétricos dos materiais sinterizados [45].

## 5 CONCLUSÕES

A adição de fósforo, silício e níquel no ferro aumentou consideravelmente a resistividade elétrica dos materiais magnéticos macios, sendo um fator preponderante na redução de perdas magnéticas. A redução 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.

Nas simulações realizadas estaticamente, o torque instantâneo e o fluxo magnético no núcleo de Fe1%P resultaram valores próximos em relação aos das tradicionais chapas de aço laminadas. 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.

Os ensaios de perdas magnéticas nos materiais sinterizados apresentaram resultados equivalentes aos das chapas laminadas em frequências elevadas. A liga Fe1%P foi a que apresentou o melhor conjunto de propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas entre as ligas estudadas. Desta forma, pode ser aplicada em casos específicos, como em motores de elevada frequência, minimotores e em servomotores, demonstrando, assim, a capacidade da M/P como alternativa aos processos atuais de fabricação de núcleos magnéticos de motores elétricos, com obtenção de menores custos e redução de etapas de fabricação.

Importante salientar que as curvas de histerese foram traçadas em frequências baixas, ou praticamente nível DC. Salienta-se, também, que a simulação de torque resulta em 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 magnéticos na forma de transformadores, que possuem funcionamento análogo a núcleo de motores elétricos. Pode-se verificar, nestes ensaios, que a partir dos 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. Observa-se 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. Exemplos são alguns servomotores, que são acionados por correntes elétricas de frequências próximas ou superiores aos 400 Hz, e em geradores com elevado número de polos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos financiadores FINEP, FAPERGS, CNPq.

## REFERÊNCIAS

- [1]. NASAR, S. A. **Handbook of Electric Machines**. New York: McGraw-Hill, 1987.
- [2]. FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, Jr. C.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 6. Ed. New York: Bookman, 2008 (reimpressão).

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

[4]. 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.

[5]. CERVA, L. L. **Desenvolvimento de uma Máquina Síncrona com Ímãs Permanentes e Núcleo Sinterizado utilizada em Aerogerador**. Tese de Doutorado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

[6]. JACOBY, G. G. **Desenvolvimento de uma Máquina Elétrica Rotativa Trifásica por Metalurgia do Pó a ser utilizada em Gerador Eólico de 5 KW**. Dissertação de mestrado. Curso de Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2016.

[7]. BORBA, M. G. **Desenvolvimento de uma Máquina Síncrona Trifásica com Núcleo do Rotor produzido a partir da Metalurgia do Pó e Ímãs de Neodímio-Ferro-Boro para Aplicação em Aerogeradores**. Dissertação de mestrado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

[8]. PAULETTI, P. **Construção e Análise do Desempenho de um Motor de Indução Trifásico com Núcleo Produzido via Metalurgia do Pó**. Dissertação de mestrado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

[9]. FERNANDES, F. M. **Desenvolvimento de um Estator por Metalurgia do Pó a ser utilizado em um Motor Universal**. Dissertação de mestrado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

[10]. DA CAS, R. L. R. **Desenvolvimento de um Rotor por Metalurgia do Pó a ser Utilizado em um Motor Universal**. Dissertação de mestrado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de

Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

[11]. NIADA, R. F. **Desenvolvimento de um Mini-Motor com o Estator Produzido por Processo de Metalurgia do Pó.** Tese de Doutorado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

[12]. ROSA, J. L. **Desenvolvimento de uma Máquina Síncrona Trifásica para Servo Motor Com Ímãs De Nd-Fe-B E Núcleos Do Rotor E Estator De Uma Liga Sinterizada.** Dissertação de mestrado. Curso de Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2015.

[13]. MESQUITA, R. F. **Construção de um Mini Motor com Núcleos do Estator e Rotor a partir da Metalurgia do Pó.** Dissertação de mestrado. Curso de Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2013.

[14]. LOPES, A. L. A. **Desenvolvimento de um Motor de Passo com Núcleos do Rotor e Estator obtidos a partir dos Processos da Metalurgia do Pó.** 2016. Dissertação de mestrado. Curso de Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2016.

[15]. DIAS, M. M. **Construção de uma Máquina Síncrona de Relutância Trifásica com Rotor de Material Magnético Macio Sinterizado.** Tese de Doutorado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

[16]. LEWIS Jr., J. A. E. **Servo Motor 400 W com Nucleo do Rotor e Estator Obtido a Partir de Ligas Compósitos de Material Magnético Macio.** Dissertação de mestrado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

[17]. MARTINS, V. **Utilização do Processo de Moldagem por Injeção de Póis Metálicos Nanométricos (MIM) para o desenvolvimento de Rotor e Estator em Servo Motor aplicado à área Médica.** Tese de

Doutorado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

[18]. PFINGSTAG, M. E. **Desenvolvimento de um Mini Motor de Passo a partir da Moldagem por Injeção de Pós Metálicos**. Tese de Doutorado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

[19]. RONCHI, F. P. **Construção e Análise do Desempenho de um Motor de Corrente Contínua utilizando Materiais Magnéticos Macios a partir da Metalurgia do Pó**. Dissertação de mestrado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

[20]. PELEGRINI, L. *et al.* Influence of Milling Time during the Mechanical Alloying Process on the Properties of Fe-3si-0.75p Alloy. **Materials Research**, v. 18 (2015), p.1071-1076.

[21]. DIAS, M. M. *et al.* Influence of Resin Content in Electrical and Magnetical Properties of Soft Magnetic Composites (SMCs). **Powder Technology**, v. 237 (2013), p. 213-220.

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

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

[24]. LUBORSKY, F. E.; LIVINGSTON, J. D.; CHIN, G. Y. **Magnetic Properties of Metals and Alloys**. Physical Metallurgy. Amsterdam: Elsevier Science, 1996. [08]

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

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

[27]. 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.

[28]. MOYER, K. H. **The Effect of Proposity on the Properties of Iron Compacts**. Riverton, N. J. Hoeganes Corporation, 1980.

- [29]. 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.
- [30]. LENEL, F. V. Magnetic Applications. **Metals Handbook**, v. 7, 1984, p. 638-641.
- [31]. 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.
- [32]. GIERAS, J. F. **Advancements in Electric Machines**. Power Systems. 2008, p. 135-156.
- [33]. CATALOG WEG. **Servoconversores SCA06 - Servomotores SWA**. 2012. 16p.
- [34]. MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics**. User's Manual, v. 4.2, 2010.
- [35]. BITTENCOURT, Sérgio Deitos. **Caracterização de ligas magnéticas sinterizadas para aplicação em núcleos de máquinas elétricas rotativas**. 2012. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/60674>>. Acesso em: 26 maio 2015.
- [36]. JILES, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. London: Chapman and Hall, 1991, 440 p.
- [37]. ASTM A773/A773M. **American Standard Test Method for DC Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with DC Electronic Hysteresigraphs**. 01 (2009).
- [38]. ASTM E10 (**Standard Test Methods for Brinell Hardness of Metallic Materials**).
- [39]. ASTM E9 (**Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature**).
- [40]. 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 p.
- [41]. 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. p. 391-398.

- [42]. BUSCHOW, K. H. J. Handbook of Magnetic Materials. **Elsevier Science**, v. 19, 2011. 464p.
- [43]. K. ASAKA; C. ISHIHARA. Technical trends in soft magnetic parts and materials. **Hitachi Powdered Metals Technical Report**, No. 4, 3–9, 2005.
- [44]. 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. p. 113-118.
- [45]. NARASIMHAM, K.; HANEJKO, F.; MARUCCI, L. **Growth Opportunities with Soft Magnetic Materials**. Washington, D.C.: Hoeganaes Corporation, 2008. 9 p.
- [46]. HANEIJO, 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.
- [47]. 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.