

ESTUDO DA VARIAÇÃO DO SILÍCIO EM LIGAS SINTERIZADAS PARA APLICAÇÃO EM NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

M. M. Dias(1), S. D. Bittencourt(2), M. G. Borba(2), L. Schaeffer(2), C. L. P. Carone(1), A. B. D. Moura(1), C. T. Oliveira(1), H. J. Mozetic(3), R. M. Callegaro(4), C. O. Klassmann(1) e A. S. Santos(1)

Universidade Feevale(1), Universidade Federal do Rio Grande do Sul(2), Universidade UniRitter(3) e Instituto Federal Sul-rio-grandense Câmpus Sapucaia do Sul(4).

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
E-mail: monir.borba@ufrgs.br

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o estudo da variação do silício nas ligas FeSi sinterizadas, quanto as propriedades físicas de interesse deste material para construção de núcleos de máquinas elétricas rotativas. Foram elaborados corpos de prova a partir de ferro puro com variação do silício nos percentuais de 1, 3 e 5% e realizados ensaios para obtenção das propriedades magnéticas, elétrica e mecânica. Verificou-se que o silício aumenta a resistividade elétrica em 2% (Fe5%Si), eleva a permeabilidade magnética relativa de 1.852,6 (ferro puro) para 1.959,8 (Fe1%Si). A coercitividade diminui de 448,2 A/m (ferro puro) para 216,3 A/m (Fe5%Si) e a indução de saturação diminui de 1,19 T (ferro puro) para 0,67 T (Fe5%Si).

Palavras Chaves: metalurgia do pó, materiais magnéticos, ligas FeSi, máquinas elétricas.

INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas são equipamentos eletromecânicos indispensáveis atualmente. A sua utilização pode ser encontrada em diversas aplicações, desde pequenos acionamentos mecânicos até a geração de energia elétrica. Em razão desta vasta gama de aplicações, as máquinas elétricas rotativas se popularizaram e vem evoluindo cada vez mais. Muitas pesquisas são realizadas tendo como norte a busca por equipamentos que apresentem um melhor rendimento elétrico.

As partes que compõem as máquinas elétricas são o estator e o rotor, onde cada uma delas possui um núcleo. Estes núcleos, com raras exceções, são construídos a partir de finas lâminas metálicas com espessura menor que 1 mm, agrupadas em pacotes de chapas. Algumas máquinas de melhor desempenho possuem seus núcleos construídos com chapas de aço-silício, com percentual de aproximadamente 3% de silício. [1,2,3].

Os núcleos do estator e do rotor, dependendo da configuração da máquina, são envoltos por bobinas que estão ligadas entre si seguindo uma determinada ordem, formando assim os enrolamentos onde a corrente alternada vai circular. A passagem da corrente pelas bobinas induz um fluxo magnético alternado no núcleo que, por sua vez, produz correntes induzidas chama de correntes de Foucault ou parasita. Estas correntes são responsáveis por consideráveis perdas de potência nos núcleos, como a dissipação por efeito Joule. A construção destes núcleos magnéticos a partir de chapas de aço isoladas eletricamente reduz parcialmente as correntes de Foucault, diminuindo as perdas ocasionadas por estas correntes. [1, 2, 3].

O processo total para confecção destes núcleos consiste em laminação, estampagem, uma etapa de isolamento elétrica entre as chapas adjacentes, empacotamento e fixação. Todas estas etapas geram custos elevados, além de uma quantidade excessiva de sobras, em torno de 40%, no momento em que as chapas são puncionadas. Com o intuito de melhorar o aproveitamento de matéria prima, tornando o processo de produção mais sustentável e aumentar a eficiência das máquinas elétricas, a metalurgia do pó surge como alternativa ao processo tradicional

de obtenção dos núcleos. A partir da tecnologia do pó é possível construir os núcleos em blocos maciços únicos, com elevada permeabilidade magnética e alta resistividade elétrica. Na medida em que for possível construir motores elétricos em blocos únicos e maciços, menos etapas estarão presentes na construção dos mesmos e menos energia será consumida na produção destes. Através da formulação de diversas ligas, novos produtos são desenvolvidos para aplicação em máquinas elétricas, visando melhorar fatores que dependem tanto da composição química do material quanto da microestrutura. [3, 4, 5].

MATERIAIS E MÉTODOS

A metalurgia do pó é um processo relativamente recente da metalurgia de transformação, onde as peças são obtidas a partir dos pós metálicos. Suas principais etapas são a mistura, compactação e sinterização. A partir da obtenção de corpos de prova em diferentes formatos é possível realizar a caracterização da liga desejada quanto as suas principais propriedades físicas de interesse. Para o uso de um determinado material na confecção do núcleo de máquinas elétricas é desejado que a liga possua elevadas permeabilidade magnética relativa, resistividade elétrica e indução de saturação, baixa coercitividade magnética e dureza compatível com as vibrações as quais a máquina será submetida.

Matéria-prima

As matérias-primas utilizadas nesta pesquisa foram o pó de ferro puro e o pó de ferro-silício. Todos estes pós foram adquiridos da empresa Höganäs Brasil Ltda. Conforme certificados do fabricante, o pó de ferro utilizado foi do tipo ASC100.29, com 99,4% da granulometria entre 45 μm e 150 μm . O pó FeSi 45 é composto por 55% de Fe e 45% de Si e possui 87% de seu conteúdo entre 45 μm e 250 μm . O pó de ferro foi utilizado como pó base, sendo misturado com o FeSi para formar a liga nas proporções de 1, 3 e 5% de silício.

Corpos de prova

A análise das propriedades físicas das ligas foi realizada a partir da confecção de corpos de prova específicos para cada ensaio. Para avaliação das propriedades mecânicas os corpos de prova possuíam uma geometria cilíndrica e para os ensaios das propriedades eletromagnéticas os corpos de prova possuíam o formato de um toróide.

A mistura dos pós foi realizada em um misturador duplo cone, com rotação de 60 rpm durante 20 minutos, buscando a homogeneização dos componentes. Também foi adicionado as misturas 1% em peso de lubrificante sólido a base de estearato de zinco para ajudar na etapa seguinte. A compactação dos corpos de prova foi realizada em uma prensa hidráulica de marca EKA com capacidade de 40 toneladas onde foi utilizada uma pressão de compactação de 600 MPa. A sinterização foi realizada em forno tubular tipo mufla, com atmosfera de gás verde (95% nitrogênio e 5% hidrogênio). A taxa de aquecimento do forno foi de 15 °C/min até a temperatura de 500°C. Ao atingir esta temperatura, as peças permanecem por 30 minutos para que ocorresse a extração térmica do lubrificante. Terminado este tempo, a temperatura foi elevada para 1.150 °C por 60 minutos. Concluído este patamar, as peças permanecem no forno para resfriamento lento até a temperatura ambiente.

Obtenção das propriedades físicas

O comportamento das propriedades físicas do material é parte fundamental no desenvolvimento de uma máquina elétrica. Neste estudo foram avaliadas as propriedades magnéticas (indução de saturação, permeabilidade magnética e coercitividade), elétrica (resistividade) e mecânicas (dureza, tensão de escoamento e metalografia) das ligas FeSi a partir de ensaios baseados em normas internacionais.

As propriedades magnéticas foram avaliadas a partir das curvas de magnetização e de histerese. Estas curvas relacionam o campo magnético aplicado ao material com a indução magnética resultante. Das curvas de magnetização foram obtidas a indução de saturação e a permeabilidade magnética e das curvas de histerese foi obtida a coercitividade do material. Os ensaios foram realizados utilizando o dispositivo traçador de curvas de histerese modelo TLMP-TCH-14, fabricado pela empresa Globalmag e seguiu a norma ASTM A773/A 773M-01. Durante o ensaio foi utilizada uma corrente de 5 A e frequência de 0,05 Hz. [6]

A resistividade de um material pode ser determinada partir do cálculo da resistência elétrica medida diretamente nos corpos de prova. Utilizando um multímetro Minipa modelo ET 2930 a resistência elétrica foi medida e apresentou valores muito baixos para a escala do equipamento. Uma maneira alternativa para a aquisição do valor da resistência consiste na aplicação de uma corrente elétrica de valor conhecida e medição da tensão nos terminais do corpo de prova com o multímetro. Para tanto, os corpos de prova devem possuir a área da seção transversal bem menor que seu comprimento, sendo semelhante a forma de uma barra fina e comprida. O mesmo resultado pode ser obtido considerando-se um anel, no qual é realizado um corte na seção do perímetro, retirado um pequeno segmento. Sendo assim, é possível utilizar os mesmos corpos de prova usados para as propriedades magnéticas. A corrente elétrica foi aplicada a partir de uma fonte Vcc Jomed modelo OS-2403D. A partir destes valores foi utilizada a equação que relaciona a resistividade elétrica de um material com a tensão, corrente aplicada, área da seção transversal e o comprimento do corpo de prova.

Por fim, foram analisadas as propriedades mecânicas das ligas FeSi. O material a ser utilizado em uma máquina elétrica rotativa precisa ter uma boa resistência a vibração. Os ensaios de dureza (Brinell) 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. Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina de ensaios universal Emic DL20000 onde utilizou-se velocidades de 2,0 mm/min, segundo a norma ASTM E9. As análises metalográficas foram realizadas a partir de um segmento do anel sinterizado que foi retirado para realização do ensaio de resistividade. As amostras foram embutidas, lixadas e polidas com pasta de alumina de 1 μ m. O ataque químico usou Nital 2%v por aproximadamente 15 segundos. Após isto, as peças foram levadas para análise em um microscópio metalúrgico invertido modelo GX-51 fabricado pela Olympus e as imagens foram adquiridas através do programa analySIS. [7, 8].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados obtidos a partir dos ensaios para determinação das propriedades físicas de interesse permitiram realizar a caracterização do comportamento da liga FeSi em relação a variação do percentual de silício. Todos os ensaios foram

realizados em três corpos de prova distintos para que um valor médio fosse encontrado.

A indução de saturação pode ser visualizada a partir dos valores de campo onde a indução tende a permanecer constante ou com declividade quase nula. A Figura 1 mostra a curva obtida para a liga Fe3%Si. Os resultados das demais curvas foram plotados no gráfico mostrado pela Figura 2, onde é possível observar que a indução de saturação diminuiu conforme o percentual de silício aumentava. Os valores médios encontrados foram de 1,19 T para o Fe puro, 1,03 T para Fe1%Si, 0,85 T para Fe3%Si e 0,67 T para a liga Fe5%Si.

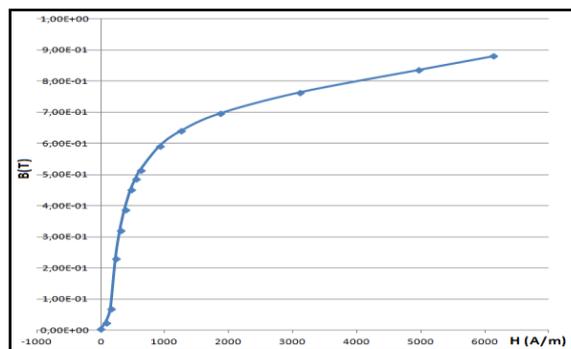


Figura 1 - Curva de indução de saturação Fe3%Si

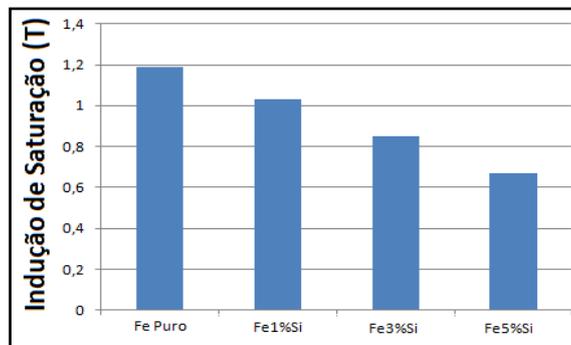


Figura 2 - Indução de saturação do Fe puro e ligas FeSi

A permeabilidade magnética foi obtida através da razão entre a indução magnética e o campo magnético aplicado. A Figura 3 apresenta os resultados encontrados, onde é possível observar que ocorre um aumento do valor médio de 1.852,6 (ferro puro) para 1.959,8 (Fe1%Si) e em seguida um decréscimo para 1258,7 (Fe3%Si) e 493,8 (liga Fe5%Si).

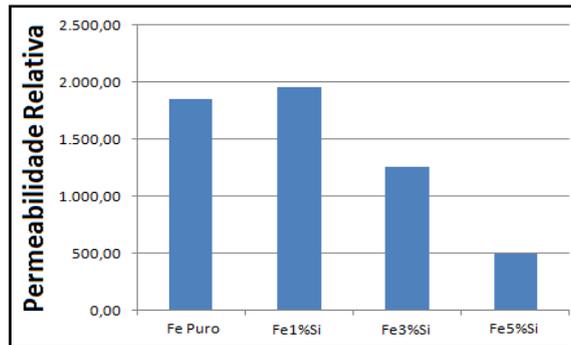


Figura 3 – Permeabilidade magnética relativa do Fe puro e ligas FeSi

As curvas de histerese forneceram informações a respeito da coercitividade das ligas analisadas. A variação no percentual de silício nas ligas de ferro resultou em curvas de histerese com características as curvas de materiais magnéticos macios. A Figura 4 mostra a curva obtida para a liga Fe3%Si. Os valores encontrados para a força coercitiva estão descritos na Figura 5. Há uma diminuição dos valores médios de 448,2 A/m (ferro puro) para 246,3 A/m (Fe1%Si), 225,4 A/m (Fe3%Si) e 216,3 A/m (liga Fe5%Si). A baixa coercitividade de um material utilizado para núcleo de máquinas elétricas é um fator desejado pois materiais com baixa força coercitiva estão relacionados a menores perdas por histerese. [9]

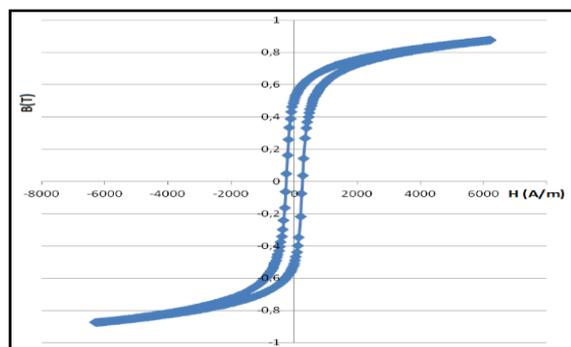


Figura 4 - Curva de histerese Fe3%Si

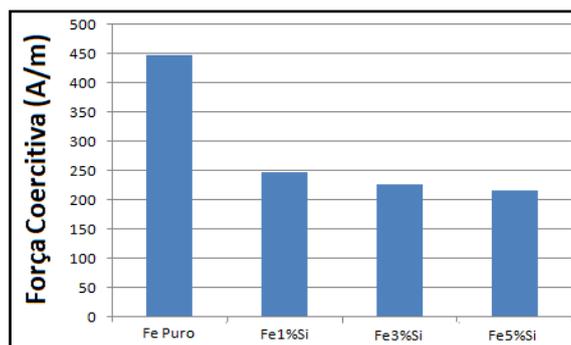


Figura 5 - Coercitividade ou força coercitiva do Fe puro e ligas FeSi

O ensaio para determinação da resistividade elétrica das ligas foi realizado utilizando os mesmos corpos de prova usados nos ensaios magnéticos. Um pequeno segmento do toróide foi retirado e então soldados fios para a aplicação da corrente elétrica e medição da tensão resultante. A Figura 6 traz o gráfico dos valores médios encontrados. A resistividade elétrica do ferro puro de 0,16 $\mu\Omega.m$ aumentou para 0,48 $\mu\Omega.m$ para a liga Fe5%Si, devido ao fato de que o silício age como uma impureza para o ferro e, via de regra, as impurezas em ligas metálicas aumentam a resistividade elétrica pois causam distorções no reticulado cristalino. Além disto, uma maior resistividade elétrica é desejada para uso em núcleo de motores elétricos pois reduz as correntes parasitas [10].

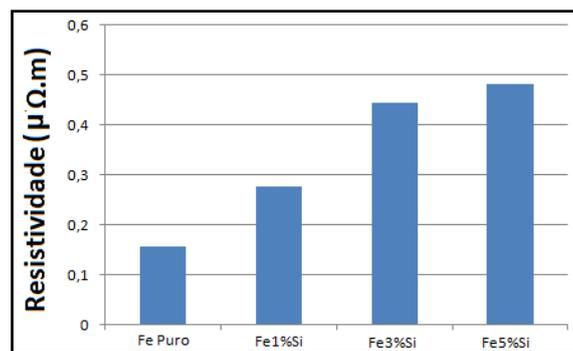


Figura 6 - Resistividade do Fe puro e ligas FeSi

A avaliação das propriedades mecânicas das ligas FeSi mostrou que a dureza dos corpos de prova aumentava conforme a adição de silício no ferro puro, passando de 52,1 HB (ferro puro) para 101,9 HB (Fe5%Si). A Figura 7 mostra os valores médios obtidos no ensaio de dureza Brinell.

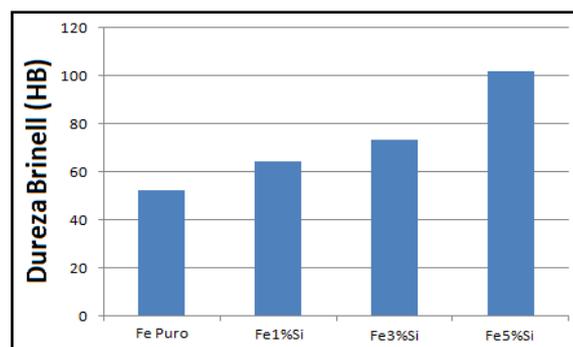


Figura 7 - Comparação de dureza das ligas sinterizadas

A tensão de escoamento também apresentou um pequeno aumento conforme é mostrado na Figura 8. Comparando o ferro puro e a liga Fe5%Si, a tensão de escoamento passou de 13,99 kgf/mm² para 17,24 kgf/mm².

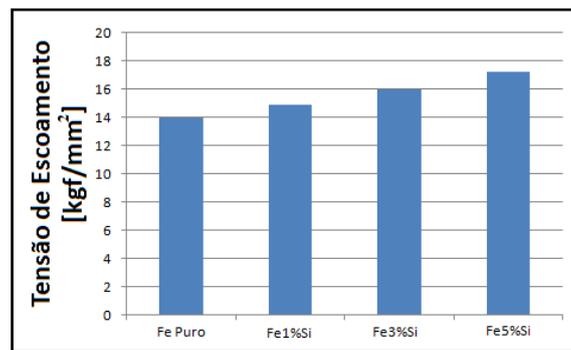


Figura 8 - Tensão de escoamento Fe puro e FeSi

As análises metalográficas foram obtidas a partir do segmento retirado dos anéis, resultando nas imagens mostradas na Figura 9, onde podem ser observadas as incrustações do silício no material. O silício não se dissolveu homogeneamente no ferro e as ligas FeSi apresentaram muitas partículas oxidadas.

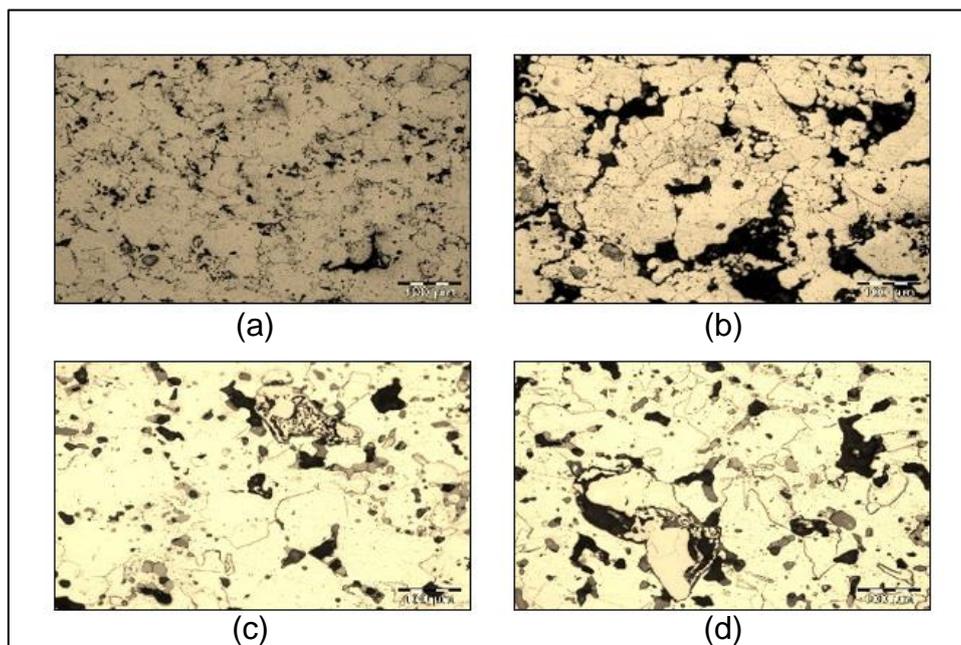


Figura 9 - Metalografias (a) Fe puro, (b)Fe1%Si, (c)Fe3%Si e (d) Fe5%Si

CONCLUSÃO

A caracterização das ligas de Fe1%Si, Fe3%Si e Fe5%Si perante as suas propriedades magnéticas, elétrica e mecânicas foi realizada. O estudo teve como objetivos compreender os diferentes aspectos relacionados à composição e estrutura destes materiais além de avaliar a aplicabilidade da liga FeSi na fabricação do núcleo de máquinas elétricas por metalurgia do pó.

O acréscimo do silício ao ferro melhora muitos aspectos das propriedades físicas, ocasionando o aumento da resistividade elétrica e permeabilidade magnética. A maior resistividade foi obtida na liga Fe5%Si, pois o silício durante o processo de sinterização, não se densifica homogeneamente no ferro e a substituição dos grãos de ferrita pelo Si aumenta a imperfeição na rede cristalina e eleva a resistividade. Por outro lado, o acréscimo de silício causou também a diminuição da indução de saturação e da coercitividade, o que não é benéfico pois os núcleos irão trabalhar com menor fluxo magnético e, sendo assim, menor torque na ponta de entreferro para o mesmo volume. Este inconveniente poderia ser contornado a partir de um projeto de máquina adequada a esta condição.

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. A adição de silício ao ferro promoveu o aumento da dureza em todas as amostras. Entre os corpos de prova com silício, houve pouco aumento na dureza devido à presença de partículas oxidadas. O material mais utilizado na fabricação de núcleos é o aço AISI 1008, que possui dureza de 86 HB e tensão de escoamento média de 17,0 kgf/mm². Estes valores são muito próximos aos que foram encontrados para a liga Fe5%Si.

Atualmente, núcleos de máquinas elétricas de alto rendimento são construídas a partir de finas chapas de aço-silício com percentual de aproximadamente 3% de silício. Os resultados encontrados neste estudo indicam a possibilidade de aplicação da liga de FeSi na produção de núcleos de máquinas elétricas por metalurgia do pó.

AGRADECIMENTOS (se aplicável)

Os autores agradecem ao CNPq, FINEP, CAPES, FAPERGS e SDECT / RS pelo auxílio financeiro na pesquisas e concessão de bolsas de estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Jr. C.; UMANS, S. D. Electric Machinery. New York: McGraw-Hill Inc, 1990.
- [2] NASAR, S. A. Handbook of Electric Machines. New York: McGraw-Hill, 1987.
- [3] Características e Especificações de Gerador – Apostila WEG Motores - <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf> - Acessado em: 23 de julho de 2016.
- [4] JANSSON, P. Soft Magnetic Materials for AC Applications. Hoeganes A.B., Hoeganes Sweden, Powder Metallurgy, v.35, n.1, 1992.
- [5] KRAUSE, R. F.; BULARZIK, J. H.; KOKAL, H. R. New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 6, n. 6, p. 710-71, 1997.
- [6] ASTM A773 / A773M – 01. Standard test method for DC magnetic properties of materials using ring and permeameter procedures with dc electronic hysteresigraphs, American Society for Testing and Materials, 2009.
- [7] ASTM E10-17. Standard test method for Brinell hardness of metallic materials. West Conshohocken, American Society for Testing and Materials, 2017.
- [8] ASTM E9. Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. West Conshohocken, American Society for Testing and Materials, 2018.
- [9] BITTENCOURT, S. D. Caracterização de ligas magnéticas sinterizadas para aplicação em núcleos de máquinas elétricas rotativas. 2012, 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

[10] VAN VLACK, L. H. Princípio de Ciência dos Materiais. São Paulo: Edgard Blucher, 2000.

TITLE

**STUDY OF SILICON VARIATION IN SINTERED ALLOYS FOR ELETRICAL
MACHINES CORE APPLICATION**

ABSTRACT

The objective of this paper is to study the variation of silicon in sintered FeSi alloys, as well as the physical properties of this material for the construction of rotating electric machine cores. Test specimens were prepared from pure iron with silicon variation in the percentages of 1, 3 and 5% and tests were performed to obtain the magnetic, electrical and mechanical properties. It was verified that silicon increases electrical resistivity by 2% (Fe5%Si), raising the relative magnetic permeability from 1,852.6 (pure iron) to 1,959.8 (Fe1%Si). Coercivity decreases from 448.2 A/m (pure iron) to 216.3 A/m (Fe5%Si) and the saturation induction decreases from 1.19 T (pure iron) to 0.67 T (Fe5%Si).

Keywords: Powder metallurgy; Magnets materials; Fe-Si alloys; Electrical Machines.