

## Caracterização magnética da liga Fe-2%Si obtida por metalurgia do pó aplicada em núcleo de rotores e estatores

L. Pelegrini<sup>1</sup>, M. M. Dias<sup>3</sup>, P. Pauletti<sup>1</sup>, W. H. Luna<sup>2</sup>, L. Schaeffer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis – GDER, Centro de Tecnologia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

<sup>2</sup>Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM, Centro de Tecnologia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Av. Bento Gonçalves, 9500, CP 15021, 91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil

<sup>3</sup>Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas - ICET - Departamento de Engenharia Elétrica

FEEVALE – Novo Hamburgo/RS – Brasil

(Recebido em 17/03/2011; revisado em 28/07/2011; aceito em 29/08/2011)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

### Resumo:

Fabricantes de máquinas elétricas estão constantemente buscando melhorias de desempenho através da redução das perdas e com isso, redução do consumo destes equipamentos. A metalurgia do pó surge como uma técnica promissora para a produção de núcleos rotores e estatores, sobretudo para aplicação em altas frequências, devido a vantagens que estes materiais oferecem como: economia de material e tempo entre processos além de propriedades superiores se comparadas às chapas laminadas. Vendo isso, este trabalho apresentará o processo de obtenção da liga Fe-2%Si (w.t) através desta técnica, para a aplicação mencionada. O processamento englobou a formulação do pó metálico, moagem a úmido, compactação a frio a 700 MPa e por fim, a sinterização dos corpos de prova anelares a 1250 °C com 1h em patamar. As propriedades analisadas mostraram uma curva de histerese típica destes materiais magnéticos macios, uma densificação na ordem de 90% e baixas perdas por histerese 10<sup>-3</sup> W/kg, indução de saturação de 1,1T, resistividade de 0,5 μΩm e uma permeabilidade relativa máxima de 3515 foram verificadas.

**Palavras-chave:** Metalurgia do pó; materiais magnéticos macios; núcleo de máquinas elétricas.

### Abstract:

Electrical machine manufacturers are constantly seeking improvements in performance by reducing losses and, thus, reducing the consumption of these equipments. Powder metallurgy emerged as a promising technique for the rotor and stator cores production, mainly for high frequency application, because these materials offer advantages such as saving material and time between processes as well as superior properties compared with rolled sheet. This way, this paper presents the process of obtaining alloy Fe-2%Si (w.t) using this technique for the application mentioned. The process included the formulation of metal powder, wet milling, cold compaction at 700 MPa and finally the sintering of specimens at 1250 °C with 1h in steep. These properties showed a hysteresis curve typical of soft magnetic materials, a densification about 90% and low hysteresis losses 10<sup>-3</sup> W/kg, saturation induction of 1.1T, resistivity of 0,5 μΩm and a maximum relative permeability of 3515 were checked.

**Keywords:** Powder metallurgy; soft magnetic materials, electrical machines core.

### 1. Introdução

Na construção de núcleos (rotores e estatores) são normalmente utilizadas chapas de aço isoladas eletricamente. Uma alternativa às chapas são os núcleos produzidos por metalurgia do pó [1]. A Figura 1 apresenta o estator convencional com chapas laminadas e o protótipo do estator

(sinterizado) produzido por metalurgia do pó desenvolvido no LdTM/UFRGS.

O estator produzido por metalurgia do pó apresenta menos estágios no processo de fabricação do núcleo, ou seja, menor consumo de energia e menor tempo de fabricação. Além disso, esta técnica promove motores mais leves com excelente acabamento superficial, eliminando etapas

\*Email: [leandro.pelegrini@ufrgs.br](mailto:leandro.pelegrini@ufrgs.br) (L. Pelegrini)

posteriores e, por conseguinte um menor desperdício de matéria prima.



(a)



(b)

Figura 1 – (a) estator com chapas laminadas e (b) protótipo do estator de Fe sinterizado.

As características importantes de materiais magnéticos macios são sua alta permeabilidade, alta indução de saturação, baixa coercitividade, baixa perda energética por histerese [2]. Os núcleos obtidos por metalurgia do pó apresentam perdas magnéticas comparáveis aos materiais estampados, a partir de 400 Hz. O material compactado tem as mais baixas perdas a frequências superiores a 400 Hz. A menor perda total do núcleo para o material compactado é devido a menores perdas por Foucault [3].

Durante as últimas décadas os aspectos diferentes do processamento (tempo de moagem, o efeito do tamanho de partícula, temperatura e tempo de sinterização), propriedades, efeito dos aditivos e elementos de liga para esses materiais foram discutidos por vários pesquisadores.

Existem diferentes métodos para a produção de ligas magnéticas ferrosas, um dos métodos mais importantes é a *mechanical alloying* (mecano-síntese). A síntese mecânica de

ligas magnéticas a base de Fe leva à formação de solução sólida supersaturada, multifásica ou possivelmente estrutura amorfa. A vantagem desta tecnologia é que o pó pode ser produzido em grandes quantidades e os parâmetros de processamento podem ser facilmente controlados, assim é um método adequado para aplicações comerciais [4].

Materiais magnéticos macios podem ser magnetizados por campos de relativamente baixa tensão magnética, e quando a aplicação do campo é removida, eles retornam ao estado de relativamente baixo magnetismo residual. Este comportamento é importante em algumas aplicações que envolvem uma mudança na indução magnética. A faixa de propriedades magnéticas destes materiais está sendo continuamente expandida [2].

Assim sendo, o objetivo deste trabalho é o estudo e desenvolvimento desta tecnologia, através da caracterização da liga magnética macia (Fe-Si) para a aplicação em núcleos de máquinas elétricas.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Processamento

Para a obtenção da liga ferrosa com 2%*w.t* de Silício procedeu-se a formulação dos pós metálicos *Hoganas*® que consistiram em Fe puro (200 MESH) de alta pureza (>99.9%) e Si correspondendo a uma composição de 75%*w.t* em Fe. Em seguida, efetuou-se a moagem a uma velocidade de 800 RPM durante 6 horas em um moinho atritor que possui uma camisa com água circulante para resfriamento.

O processo foi conduzido sob atmosfera oxidante (ar ambiente), já que a moagem é realizada a úmido com álcool, evitando o aquecimento e ignição do pó além da oxidação. O lubrificante utilizado, álcool etílico foi adicionado em 4%*w.t* em relação ao peso total (esferas e pó). Adicionou-se 5 kg de esferas de aço inoxidável ( $\varnothing = 6$  mm) que corresponde a 30% da capacidade do moinho e 1kg de pó (1:5 - pó/esferas). A seguir (Figura 2), tem-se um resumo das principais etapas do processamento.

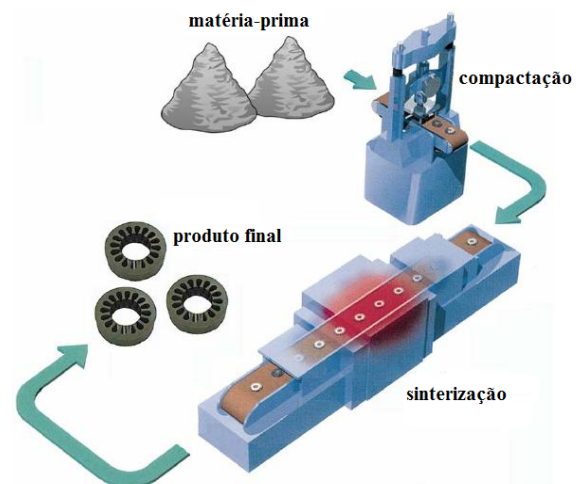


Figura 2. Principais etapas do processamento destas peças pela metalurgia do pó

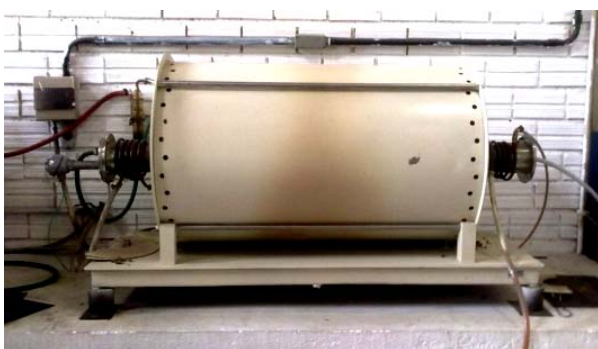
Viana [5] demonstrou através de seu trabalho que a velocidade e o tempo de moagem são as principais variáveis a serem controladas para se obter a formação da liga Fe-Si e com isso propriedades magnéticas desejadas. Para a liga de Fe-Si foi utilizado um teor de Si < 4,5%. Isso porque, embora o ferro ligado com Si tenha propriedades magnéticas atrativas acima de 6,5% de Si, a fragilidade transmitida pelo Si limita o uso a composições na faixa de 4,5% [6,7]

A compactação do pó (Figura 3a) foi realizada a frio em uma prensa hidráulica manual sob pressão de 700 MPa ou 39 kgf/cm<sup>2</sup> para a produção de corpos de prova anelares (anel de Rolland) utilizando matriz flutuante (dupla-ação) que visa a uniformidade de densidade do corpo. Adicionou-se estearato de zinco (1%w.t) como lubrificante para auxiliar no processo de compactação através da redução do atrito e aumento, com isso, da compressibilidade do pó.

A seguir, sinterizaram-se as peças em forno tubular (Figura 3b) sob atmosfera inerte de Argônio para limitar a formação de óxidos superficiais nas peças. Seguiu-se o ciclo térmico de sinterização com temperatura de patamar de 1250 °C durante 1 hora e taxa de 10 °C/min durante o processo, com resfriamento da peça no próprio forno.



(a)



(b)

Figura 3. (a) Compactação a frio em prensa hidráulica manual; (b) forno tubular para sinterização, respectivamente

## 2.2. Caracterização das propriedades físicas, magnéticas, elétricas

Após a sinterização dos corpos de prova (Figura 4) efetuaram-se os ensaios de densidade, resistividade, metalografia e histerese. O ensaio de densidade pelo Princípio de Arquimedes se aplica a objetos com formas geométricas irregulares e permite obter a densidade através do empuxo: peso do volume de fluido deslocado (água).



Figura 4. Corpos de prova sinterizados: cilíndricos e anelares

Para a execução do ensaio de histerese baseou-se na norma ASTM A773/ A773M – 01 (2009) [8]. Procedeu-se no isolamento do contato peça/bobina com polipropileno assim como o contato bobina secundária/primária. O anel de *Roland* possui aproximadamente 50 mm de diâmetro e utilizou-se o Traçador de Curva de Histerese (*TLMP-TCH*).

A resistividade elétrica foi determinada a partir da resistência elétrica de um anel, onde uma parte do perímetro foi seccionada. Este artifício permite obter um corpo de prova de comprimento muito maior que a seção transversal. Assim, para medição da resistência de um corpo, aplica-se uma corrente elétrica a partir de uma fonte de tensão contínua, e mede-se a tensão elétrica a partir de um mili-voltímetro.

A permeabilidade está relacionada com o campo ( $B(T)$ ) e a indução magnética ( $H(A/m)$ ) pela equação:  $B = \mu H$ . Já a permeabilidade relativa máxima é definida a partir de dados experimentais já que não é uma constante e sim uma curva típica para cada material. Assim, pode-se resumir a partir da equação:  $\mu_m = \mu/\mu_0$ , onde  $\mu_0$ , que é a permeabilidade no vácuo, é igual a  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m). Para materiais ferromagnéticos, usados em máquinas elétricas, geralmente os valores de  $\mu_m$  estão na faixa de 2000 a 6000 [9,10].

A análise metalográfica das amostras sinterizadas por Microscopia Óptica foi realizada com seções transversais e longitudinais dos corpos de prova. O ataque para revelação dos contornos de grão foi realizada com Nital 2% e posteriormente mediu-se através do software *Analysis* a porcentagem de poros contida no material.

## 3. Resultados e Discussão

Realizou-se o ensaio granulométrico com o pó de Fe-Si (2%w.t.), moído durante 6 horas com os parâmetros anteriormente citados, através do Granulômetro a Laser (*CILAS*). Os resultados da análise (Figura 5) revelaram um tamanho médio de partícula na faixa de 73 micrometros, já o D50 e o D90 ficaram na faixa de 63 e 144 micrometros, respectivamente.



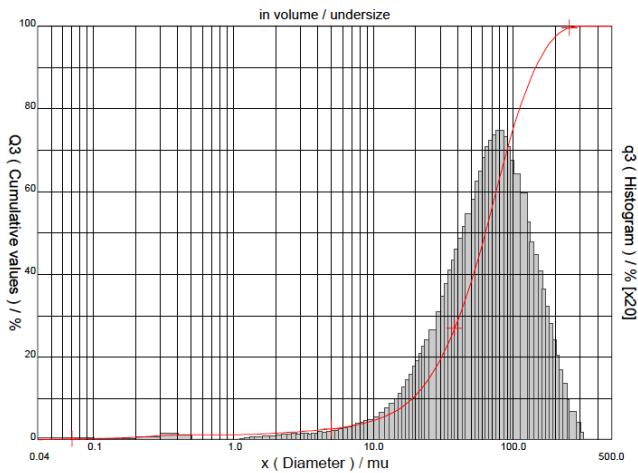


Figura 5. Distribuição do tamanho de partícula do pó moído

A mistura de pós, correspondentes a frações de tamanho distintas, é interessante para otimizar a densidade final dos materiais sinterizados [11]. Além disso, sabe-se que o processo de mecano-síntese transforma as partículas do pó em formato achatado ou irregular, o que aumenta sua área superficial se comparado ao pó esférico, aumentando a densidade do material compactado posteriormente.

Na sequência apresenta-se o ensaio de histerese magnética e permeabilidade AC, realizadas em 0,05Hz e 0,1Hz, respectivamente, e com uma corrente de 1A (Figuras 6a e 6b). O ensaio de histerese revelou uma curva característica de materiais magnéticos macios devido a uma faixa estreita do ciclo de histerese (fácil magnetização) com uma baixa coercitividade magnética ( $H_c = 225$  A/m) e elevada indução de saturação ( $B_s = 1,1$ T) e retentividade ( $B_r$ ) de 0,87T. Já o ensaio de resistividade apresentou um resultado próximo a  $0,5\mu\Omega\text{m}$ .

Observou-se que as perdas por histerese no ensaio de histerese foram de  $7,1 \times 10^{-3}$  W/kg a 0,1Hz e de 0,7 W/kg a 60 Hz (para chapas de aço as perdas ficam em torno de 10 W/kg [12]). O ensaio de magnetização mostrou uma permeabilidade máxima de 1490 e a relativa máxima foi de 3515, estando de acordo se comparado aos dados da literatura [13,14]. A seguir tem-se uma tabela comparativa que mostra às propriedades da liga Fe-Si (1, 2, 3% w.t) relacionada à pressão de compactação imposta [14].

Nota-se uma leve redução da Força coerciva ( $H_c$ ) com o aumento da quantidade de Si na liga. Com o aumento da pressão de compactação há uma melhoria nas propriedades magnéticas em geral.

Através da análise de imagens obtidas por Microscopia Óptica (Figura 7a e 7b) verificou-se uma densificação da ordem de 90%. Já através do método geométrico, uma densidade de  $6,89$  g/cm<sup>3</sup>, ou seja, porosidade na faixa de 11,20% (sabendo que a  $\rho_{\text{teórica}}$  do Fe-Si (2% w.t) =  $7,76$  g/cm<sup>3</sup>).

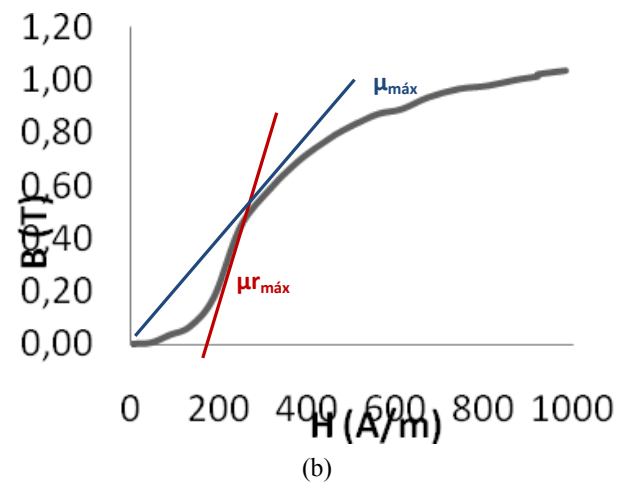
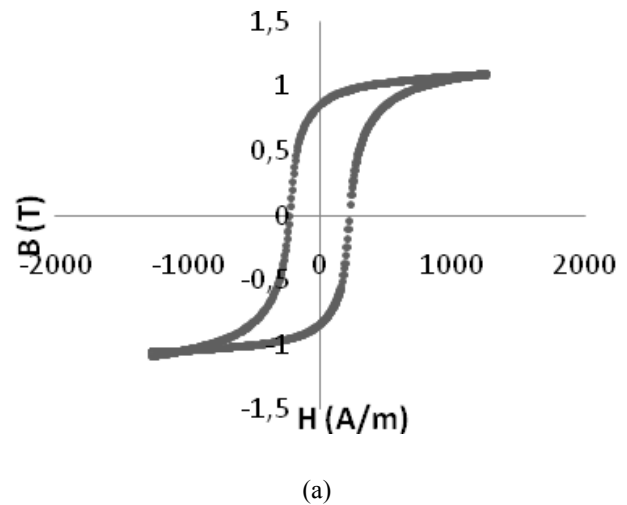


Figura 6. (a) Curva de Histerese magnética e (b) Permeabilidade AC

Tabela 1. Propriedades magnéticas da liga Fe-Si sinterizada (1260 °C) [14]

Composição	P <sub>comp.</sub> (Mpa)	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Perm. máx	H <sub>c</sub> (A/m)	B <sub>máx</sub> (T)
Fe-Si	480	7,03	2900	132,89	1,28
1% w.t	685	7,23	3100	131,30	1,37
Fe-Si	480	7,13	4150	101,06	1,33
2% w.t	685	7,34	5000	93,10	1,43
Fe-Si	480	7,17	4900	87,52	1,36
3% w.t	685	7,32	5600	99,42	1,43

A Figura 8 mostra a micrografia da parte transversal e longitudinal retiradas do anel, na qual a fase escura são poros e a clara é ferrita (Fe- $\alpha$ ). A porosidade observada pela micrografia impacta de maneira significativa nas propriedades magnéticas do material, sobretudo na permeabilidade.

A seguir, apresenta-se um gráfico (Figura 8) que, apenas para efeitos de comparação, mostra a densidade e porosidade para os ensaios com as amostras de Fe com 1, 2 e 4% (w.t) de

Si realizados em laboratório. Menciona-se que a porosidade é prejudicial tanto às propriedades mecânicas do material como as propriedades magnéticas. Assim sendo, busca-se peças com alta densificação e por sua vez, baixa porosidade.

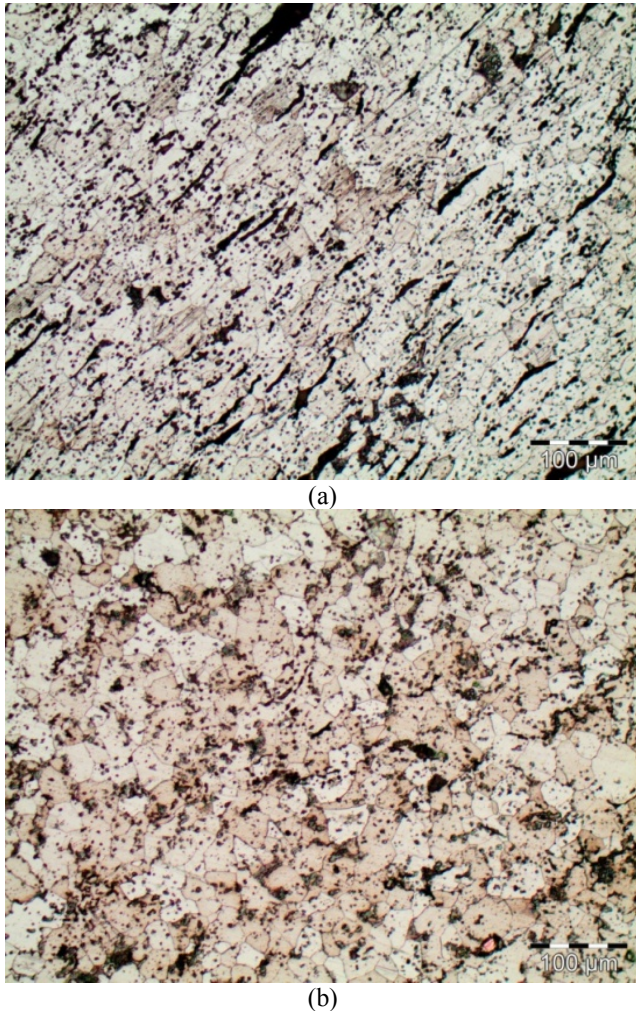


Figura 7. Micrografias: Fe-2%Si - Aumento 20x – (a) transversal e (b) longitudinal

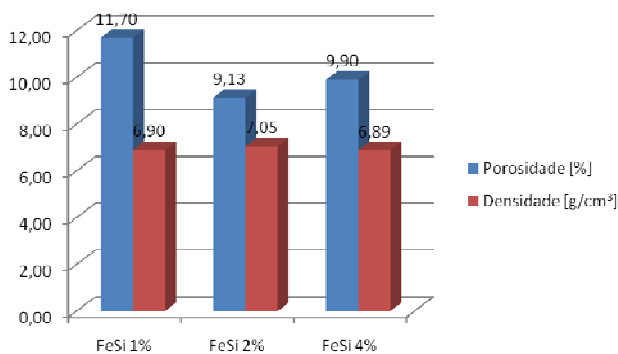


Figura 8. Densidade (Arquimedes) e porosidade das amostras de Fe-Si

Comparando-se com o processo atual de produção de núcleos de rotor por chapas com o processo por metalurgia do pó, este primeiro tem a vantagem da obtenção de peças densas. Assim, necessita-se aperfeiçoar o processo por metalurgia do pó para alcançar altas densidades. Para isso, novos lubrificantes estão sendo desenvolvidos além de processos secundários como é o caso da dupla-compactação, re-compressão, entre outros, cujo objetivo também é atingir melhores propriedades mecânicas, físicas e magnéticas nestas peças.

A produção destas peças pela NDT (*Normal Density Technology*) utiliza a compactação convencional e processos de sinterização, ou seja, pressões de compactação em torno de 600-800 MPa e temperaturas de sinterização entre 1120 °C e 1250 °C, que produz densidades de cerca de 92-94% em relação a um material forjado (denso). A indução de saturação de um material magnético macio é uma função linear da densidade. Além disso, a porosidade pode aumentar as perdas por histerese restringindo a circulação de domínios magnéticos. Isto significa que, a fim de melhorar as propriedades magnéticas é necessário aumentar a densidade material [15]. Já com o aumento da porosidade (diminuição da densidade), há uma diminuição da permeabilidade magnética, uma diminuição da indução de saturação e um aumento da coercitividade [16].

O controle das dimensões do produto final pode requerer uma segunda operação de prensagem (dupla-compactação). Ainda, a re-compressão permite alcançar uma densificação adicional, e a melhor definição dos detalhes superficiais das peças sinterizadas [11]. Uma compactação a morno ou ainda, o aquecimento do pó moído a 170°C - antes da compactação - para eliminar a deformação proveniente da moagem podem ser excelentes saídas [17,18]. Por fim, o uso de altas temperaturas de sinterização resulta em maiores tamanhos de grão e morfologia de poros refinada e, com isso, um grande aprimoramento da performance magnética [19].

#### 4. Conclusões

Através deste trabalho, mostrou-se que o processo de obtenção da liga Fe-Si (2% w.t) por metalurgia do pó tem potencial para a substituição da tecnologia atual na aplicação em núcleos de máquinas elétricas devido a sua baixa perda por histerese (0,7 W/kg) se comparado aos núcleos de chapa (10W/kg). Ainda, apesar da permeabilidade relativa máxima de 3515, a indução de saturação de 1,1T, além de uma resistividade próxima de 0,5 µΩm terem sido um pouco menores se comparado aos núcleos de chapas, a melhoria do processamento destes materiais com técnicas diversas de aumento da densificação do material, trarão uma melhora nas propriedades magnéticas.

Outro resultado relevante foi o das perdas por histerese a 60 Hz: de 0,7 W/kg para o material sinterizado contra 10 W/kg para chapas. As perdas são uma das características mais importantes na questão de projetos de máquinas elétricas. O aumento do rendimento energético de seus motores será

possível com a diminuição das perdas magnéticas e aumento da permeabilidade.

### Agradecimentos

Os autores reconhecem a CAPES e a FAPERGS/CNPq, pela bolsa e financiamento ao projeto, respectivamente. Ao LAPROM pelas análises de granulometria a laser. Também, a Hoganas® do Brasil pelo apoio, oferecendo pós metálicos para a realização deste trabalho.

### Referências

- [1] RODRIGUES, D. *Materiais Magnéticos Produzidos por Metalurgia do Pó*. São Paulo - Divisão de Metalurgia - IPT, 2008.
- [2] JILES, D.C. *Recent advances and future directions in magnetic*. Acta Materialia, Ames, n. 51, p.5907-5939, 31 ago. 2003.
- [3] R.F. Krause, H. B. (1997). A New Soft Magnetic Material for ac and dc motor applications. JMEPEG , 6, pp. pg. 710-712.
- [4] SHOKROLLAHI, H.. *The magnetic and structural properties of the most important alloys of iron*. Materials And Design, Shiraz, p. 3374-3387. 05 abr. 2009.
- [5] VIANA, SILVANA GARCIA et al. *obtenção da liga fesi através do processo de mechanical alloying*. João Pessoa: Ii Connepi, p 6, 2007
- [6] HEN, CHIH-WEN. *Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials*: Dover Books on Physics: Courier Dover Publications, 1986. 571 p. Disponível em: <[http://books.google.com/books?id=ufGdyu24X2EC&dq=treatment+soft+magnetic+material&lr=&hl=pt-BR&source=gbs\\_navlinks\\_s](http://books.google.com/books?id=ufGdyu24X2EC&dq=treatment+soft+magnetic+material&lr=&hl=pt-BR&source=gbs_navlinks_s)>. Acesso em: 19 jul. 2010.
- [7] Q. SHEN et al. *Powder reaction mechanism in fabrication of high silicon iron alloy*. Powder Metallurgy, Wuhan, p. 336-340. dez. 2007.
- [8] ASTM A773/ A773M – 01 (2009). *Standard Test Method for dc Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with dc Electronic Hysteresisgraphs*. Disponível em: <http://www.astm.org/Standards/A773.htm>
- [9] NASAR, S.A. *Outline of Theory and Properties of Electric Machines and Electromechanics*, 1ª ed., São Paulo (Brasil) McGraw Hill do Brasil, 217p, 1984
- [10] HÖGANÄS. *Soft Magnetic Material Handbook*. Suécia, 7 volumes, (Fundamentos Magnéticos e SMC) p 94, 2007
- [11] PAGNOLA, Marcelo Rubén. *Desarrollo de Composites Ferromagneticos*. 2009. 157 f. Tesis de Doctorado En Ingeniería (Doctorado) - Curso de Facultad de Ingeniería, Departamento de Física, Universidad de Buenos Aires, 2009. Disponível em: <<http://www.calameo.com/books/000087843f8d210fc5164>>. Acesso em: 26 ago. 2010.
- [12] LANDGRAF, F. J. G. *Lâminas de aço para motores elétricos* Revista: Metalurgia e Materiais ABM, v.55, n. 483, p. 626-627, 1999.
- [13] NARASIMHAM, K., N HANEJKO, Francis; MARUCCI, Michael L.. *Growth Opportunities with Soft Magnetic Materials*. Washington D.c: Hoeganaes Corporation, Growth Opportunities with Soft Magnetic Materials, p 9, 2008.
- [14] HANEJKO, Francis G.; ELLIS, George W.; HALE, Timothy J.. *Application of high performance material processing: electromagnetic products*. Las Vegas: Hoeganaes Corporation, Presented at PM2TEC, 16 p, 1998.
- [15] J.A. Bas, J.A. Calero, M.J. Dougan.. *Sintered soft magnetic materials. Properties and applications*. Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, Barcelona, p. 391-398. jan. 2003.
- [16] ESSWEIN, J.A. L. JR., SCHAEFFER, L., DIAS, M.M., CERVA, L.L., BARBOZA, J.S.; *Estudo comparativo de ligas magnéticas através de simulação por elementos finitos - 18º CBECiMat (Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - 24 a 28 de Novembro de Porto de Galinhas/PE, 2008*
- [17] VLASOVA, O. V.; PANASYUK, O. A.; MASLYUK, V. A.. *Preparation and properties of magnetically soft powder metallurgy alloy 79NM*. Powder Metallurgy And Metal Ceramics, Kiev, p. 497-500. 25 jul. 2000.
- [18] LI YUAN-YUAN, et al. *Study on mechanical properties of warm compacted iron-base materials*. J. Cent. South Univ. Technol. p. 154-158. China. Set. 2002
- [19] HANEJKO, F. G., RUTZ, H. G., OLIVER C. G. *Effects of processing and materials on soft magnetic performance of powder metallurgy parts*. Hoeganaes Corporation. Riverton, pg. 1-26, jun. 1992.