

ESTUDO COMPARATIVO DE LIGAS MAGNÉTICAS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

J. A. Lewis Esswein Jr⁽¹⁾; M. de Mattos D.⁽²⁾; L. L. Cerva⁽¹⁾; J. S. Barboza⁽¹⁾; L. Schaeffer⁽¹⁾.

Avenida Bento Gonçalves nr 9500. Centro de Tecnologia sala 112. Agronomia Porto Alegre – RS. Brasil. CEP 91501-970. jorgelewisjunior@gmail.com

(1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Laboratório de Transformação Mecânica - Grupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis

(2) FEVALE - Departamento de Engenharia Elétrica - ICET

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo a aplicação de materiais magnéticos macios compósitos em núcleos magnéticos de rotores e estatores de máquinas elétricas rotativas ou motores elétricos. Tradicionalmente os núcleos de máquinas elétricas são construídos a partir de chapas de aço laminadas. Assim, os núcleos desenvolvidos a partir deste trabalho, são obtidos a partir de um processo alternativo da M/P, onde pós de ligas ferromagnéticas são misturados a resinas termofixas, compactados e curados. Algumas ligas ferromagnéticas de diferentes propriedades magnéticas foram misturadas a diferentes tipos de resinas, após corpos de prova foram obtidos, e suas propriedades físicas de interesse foram analisadas (propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas). A partir de um motor síncrono trifásico de 400 W, fabricado por WEG Motores, foi simulado um motor de mesma topologia com núcleo do estator e rotor a partir do compósito com propriedades físicas mais adequadas, e sua performance foi comparada ao motor da WEG.

Palavras Chave: Materiais magnéticos, simulação por elementos finitos, metalurgia do pó, núcleo de máquinas elétricas.

INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas, na maioria dos casos, podem funcionar como motor ou gerador, possuindo em seu interior, os núcleos do estator e rotor, geralmente, com um conjunto de enrolamentos para cada núcleo. Quando os enrolamentos são alimentados com corrente contínua, estes produzem um campo magnético contínuo e estático e são denominados de enrolamentos de campo. Quando os enrolamentos são alimentados com corrente alternada senoidal, estes produzem um campo magnético também com características ou aproximadamente senoidais e são denominados de enrolamentos de armadura. No caso das máquinas cc, os enrolamentos de campo encontram-se no estator e os enrolamentos de armadura no rotor. Nas máquinas síncronas trifásicas convencionais, os enrolamentos de campo encontram-se no rotor e os enrolamentos de armadura no estator, entretanto, em algumas máquinas síncronas poderá ocorrer o contrário ⁽¹⁻²⁾.

Assim, os enrolamentos de campo podem ser substituídos por ímãs permanentes, como ímãs de Nd-Fe-B no caso das máquinas síncronas, e ímãs de ferrita no caso de pequenos motores cc. Nestes casos, o núcleo onde estão disposto os enrolamentos de campo podem ser construídos de material magnético macio maciço, como o aço, uma vez que, não havendo alternância no campo, não haverá correntes parasitas ⁽¹⁻²⁾.

Para a substituição do núcleo envolvido pelos enrolamentos de armadura, uma vez que existe alternância de campo e em consequência correntes parasitas, estes devem ser construídos de chapas laminadas de aços magnéticos de elevada permeabilidade magnética e isoladas eletricamente uma das outras. Uma outra possibilidade é a construção destes núcleos em blocos maciços de material magnético macio também de elevada permeabilidade magnética, porém de alta resistividade elétrica. Esta seria uma alternativa para redução das correntes parasitas. Uma forma de se aumentar a resistividade elétrica dos materiais, é a partir dos processos da Metalurgia do Pó ⁽³⁻⁴⁾.

PROPRIDADES MAGNÉTICAS

As propriedades magnéticas são obtidas a partir da curva de histerese, que relaciona campo magnético **H** aplicado a um material, com a indução magnética **B**

resultante. Para os materiais magnéticos duros macios, a relação $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$ tem as características mostradas na Fig. 1.

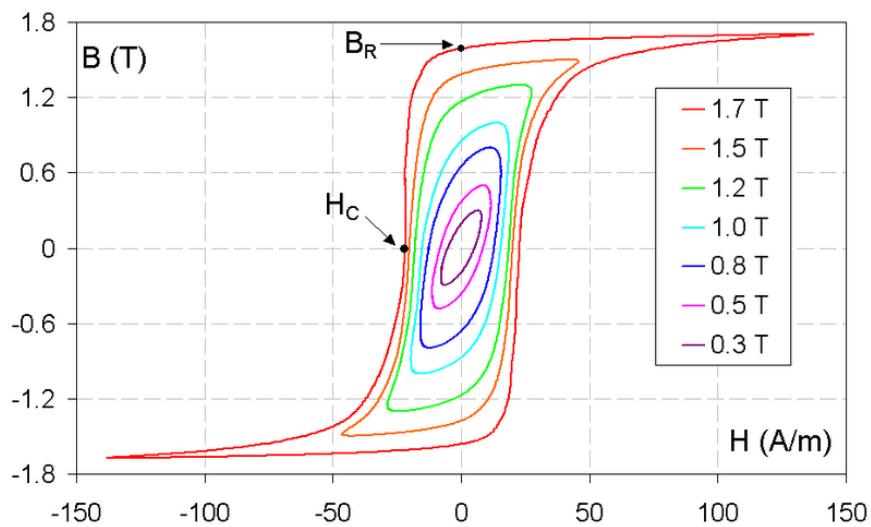


Fig. 1. Ciclo de histerese de um material magnético macio para diferentes valores de indução magnética.

O ponto em que a curva corta o eixo B , no quadrante superior esquerdo, é denominado de *magnetismo remanente* ou *retentividade* B_r e representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado ($H = 0$). O ponto em que a curva corta o eixo de H no mesmo quadrante é denominado de *força coercitiva* ou *coercitividade* H_c e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime ($B = 0$).

A permeabilidade magnética relativa μ_r está relacionada com o ponto de maior declividade da curva de histerese. A indução de saturação B_{max} pode ser visualizada a partir dos valores de campo onde a indução tende a permanecer constante ou com declividade quase nula ⁽⁵⁻⁶⁾.

FATORES QUE AFETAM O DESEMPENHO DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS

Os núcleos magnéticos de motores elétricos (estatores e rotores), com raras exceções, são construídos atualmente, a partir de finas lâminas metálicas (chapas de aço baixo carbono) com espessura menor que 1 mm, agrupadas em pacotes de chapas. Alguns motores de maior rendimento são construídos com chapas de aço-silício, com um percentual de aproximadamente 3% de silício. O processo total para

a confecção destes núcleos, consiste basicamente em laminação, estampagem, um tratamento para isolamento elétrica, empacotamento e fixação. Com relação as chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento consiste num tratamento térmico, onde os pacotes de chapas são colocados em fornos durante um 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 fornecidas pelos fabricantes com uma pintura a base óxido em uma das superfícies. Núcleos magnéticos envolvidos por bobinas (enrolamentos), onde circulam correntes alternadas, geram um fluxo magnético também alternado. Por este motivo, esses núcleos ficam sujeitos a ação de correntes parasitas, também conhecidos 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 (1-2).

Com relação a construção e aos materiais utilizados, os seguintes fatores determinam o desempenho dos motores elétricos:

As chapas são construídas a partir de materiais ferromagnéticos (ferro ou aços magnéticos) pois estes são materiais ferromagnéticos de alta permeabilidade magnética. Nos motores elétricos, quanto maior a permeabilidade magnética dos núcleos, menor será o campo magnético nos núcleos, e maior será a intensidade de campo no entreferro. Observa-se que, o conjugado eletromagnético (torque) desenvolvido nos motores elétricos, é proporcional a densidade de fluxo magnético no entreferro. Portanto, núcleos do estator e do rotor de motores elétricos construídos com materiais de maior permeabilidade magnética, resultam em motores com um melhor desempenho (1-2).

Os materiais magnéticos dos núcleos dos motores devem possuir elevada indução de saturação, possibilitando então que o motor trabalhe num ponto de fluxo magnético elevado, sempre abaixo do ponto de saturação. (1-2).

Utiliza-se aço baixo carbono pois este é um material magnético macio, e apresenta baixa coercitividade. A perda por histerese é proporcional a área do ciclo de histerese, que representa matematicamente uma densidade de energia. Portanto, quanto mais estreito o ciclo de histerese, menor a coercitividade, e menor a perda por ciclo de histerese (1-2). As perdas por histerese P_h [W/kg], está representada

pela equação (A), onde f é a frequência do campo magnético aplicado [Hz], W_{cmp} a densidade de energia armazenada no campo [J/m^3] (área do laço de histerese) e ρ_m a densidade do material dada em [kg/m^3]. ⁽¹⁻²⁾.

$$P_h = \frac{fW_{cmp}}{\rho_m} \quad (A)$$

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, menor são as correntes parasitas e menor a perda de potência nestes núcleos. A redução das correntes induzidas, também podem ser obtidas 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 ⁽¹⁻³⁾. Devido ao efeito Joule, estas correntes parasitas geram perdas por calor P_p [W/kg], e está representada na equação (B), onde k é uma constante de proporcionalidade [adimensional], B a indução magnética [T], x a espessura da peça [m], f a frequência do campo magnético [Hz] e ρ_e a resistividade elétrica [$\Omega.m$] ⁽¹⁻²⁾.

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

Em resumo, o material com o qual os núcleos do estator e do rotor são construídos deve apresentar as seguintes propriedades ⁽⁴⁾:

- Alta permeabilidade magnética relativa;
- Baixa coercitividade magnética;
- Alta resistividade ou resistência elétrica;

- Alta indução de saturação.

METALURGIA DO PÓ

Entre as tecnologias de fabricação mais utilizadas na obtenção de materiais magnéticos através de processos metalúrgicos, cita-se a *fundição* e um ramo mais recente da metalurgia de transformação denominada *Metalurgia do Pó (M/P)* ⁽⁷⁻⁹⁾.

Os quatro processos básicos da M/P são: Obtenção dos pós, mistura, compactação e sinterização ou cura. As 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. Acrescenta-se a isto que pós de diferente natureza química são fáceis de se obter bastando que se misture os pós homogeneamente ⁽⁷⁻⁹⁾.

A Fig. 02 mostra a vista frontal em corte de uma matriz para compactação de duplo efeito, utilizada para compactação de pós de materiais magnéticos:

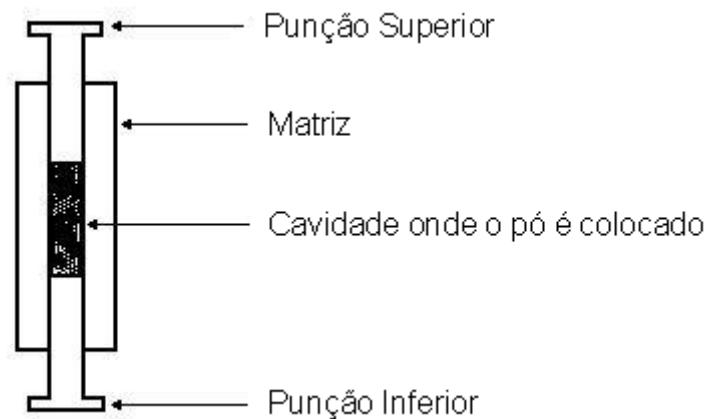


Fig. 2. Matriz de duplo efeito utilizada para compactação de materiais magnéticos.

CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS CURADOS

As propriedades físicas dos materiais obtidos por metalurgia do pó, como por exemplo as magnéticas e elétricas, são influenciadas por vários fatores, sendo que, aqueles considerados de maior importância no desenvolvimento deste trabalho, estão relacionados a seguir:

- Nos materiais obtidos através da metalurgia do pó a adição de resinas tem como finalidade aumentar a resistividade elétrica do material e permitir o agrupamento dos pós metálicos. As resinas devem ser escolhidas por suas propriedades mecânicas e elétricas.
- Na maioria dos casos, a resistividade de um elemento metálico aumenta quando são adicionadas impurezas, uma vez que estas impurezas provocam distorções no reticulado cristalino. Quanto maior as imperfeições da rede cristalina, maior a resistividade. Por esta razão, as maiores resistividades em metais são obtidas em ligas compostas de dois ou mais metais, nas mesmas proporções, ou em proporções próximas. Nestas condições há uma interpenetração das redes cristalina dos materiais presentes na liga ⁽⁷⁾, por este motivo, ocorre um aumento da resistividade do ferro sinterizado, quando outros elementos como o Si, P ou Ni são adicionados ⁽¹⁰⁾.
- A adição de silício ao ferro, além de aumentar a resistividade elétrica, aumenta também a permeabilidade magnética relativa máxima, diminui a coercitividade, contudo, diminui também a indução de saturação ⁽¹¹⁾.
- A maioria dos materiais metálicos ferrosos sinterizados possuem resistividade elétrica maior do que de materiais maciços de mesma composição química, devido principalmente a porosidade e a oxidação superficial das partículas. Portanto, é possível aumentar ainda mais a resistência elétrica total de peças metálicas sinterizadas, compactando com pressão menor, o que aumenta a porosidade do material diminuindo portanto, a densidade. A resistividade das ligas metálicas diminui com o aumento da densidade, independente do tipo de metal ⁽¹²⁾.
- Com o aumento da porosidade, há uma diminuição da permeabilidade magnética, uma diminuição da indução de saturação e um aumento da coercitividade ⁽¹³⁾.
- As impurezas como carbono, nitrogênio e oxigênio também afetam as propriedades magnéticas das ligas de ferro sinterizadas. Quando o objetivo é a obtenção de materiais magnéticos de boas propriedades, é conveniente que os percentuais destas impurezas sejam mantidos nos seguintes níveis ⁽¹¹⁾:
 - carbono: 0,01% máx;
 - oxigênio: 0,02% máx;
 - nitrogênio: 0,01% max.

- Outro fator que também afeta as propriedades magnéticas dos materiais ferrosos sinterizados é o tamanho de partícula de pó ⁽¹⁵⁾. O aumento da granulometria do pó aumenta a permeabilidade magnética mas aumenta também a coercitividade. Além disto, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização também alteram algumas propriedades físicas ⁽¹²⁾.

SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

Os resultados das iterações eletromagnéticas foram 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. A idéia principal é dividir o problema em um grande número de regiões, cada um com uma geometria simples (e.g. triângulo).

A vantagem de dividir a área inicial em pequenos elementos é que a partir de uma área conhecida torna-se o problema mais fácil de resolver. Através do processo de discretização é formado um problema de álgebra linear com milhares de variáveis. O que seria impossível de resolver sem o auxílio de processadores os quais através de algoritmos são capazes de resolver o problema em pouco tempo.

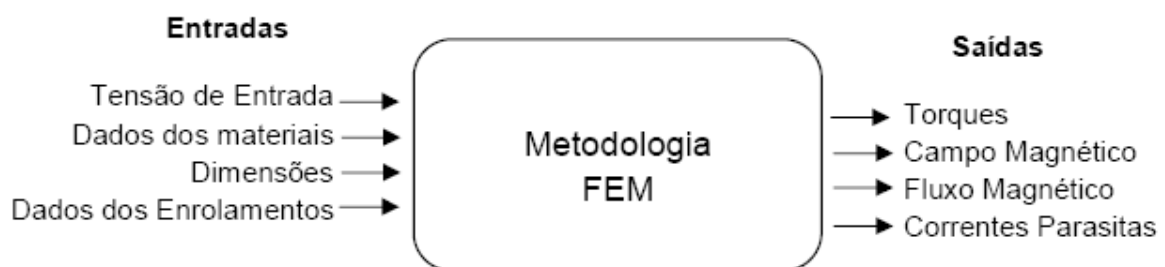


Fig. 3 –Variáveis de entrada e saída de um software de simulação por elementos finitos para materiais magnéticos.

O Software de simulação de materiais magnéticos FEMM 4.2 é uma ferramenta que discretiza o domínio de entrada em pequenos triângulos. Em cada elemento a solução é aproximada através de uma interpolação dos valores de cada vértice do triângulo.

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

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

Trinagle.exe – modifica a região a ser solucionada em um número grande de triângulos, operação fundamental para a aplicação da metodologia de elementos finitos.

Solvers – algoritmo para solução de problemas magnéticos e eletrostáticos. Cada solver utiliza os dados configurados que descrevem o problema para resolver as equações diferenciais de Maxwell obtendo os valores de campo desejado.

Determinar as propriedades magnéticas de um motor sem o auxílio de um softwares de simulação por elementos finitos é difícil e por muitas vezes impreciso.

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

SIMULAÇÃO

Determinar as propriedades magnéticas de um motor sem o auxílio de um softwares de simulação por elementos finitos é difícil e por muitas vezes impreciso.

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

Foi realizada a simulação de um servomotor trifásico com as características apresentadas na tabela 1.

Para possibilitar a obtenção dos resultados esperados é necessário que seja inserido no *preprocessor* o desenho de um corte transversal da máquina elétrica. Este desenho foi realizado no Solid Works e após isto aberto no FEMM 4.2 (Figura 4). Com a geometria definida é possível definir os materiais que compõem cada parte do motor e suas propriedades eletromagnéticas.

Tabela 1.

Características do servomotor simulado.

Rotação Nominal	3000 RPM
Pólos	8
Potência	400 W
Corrente Nominal	2 A
Espiras	42
Comprimento	40 mm
Torque	1.6 Nm

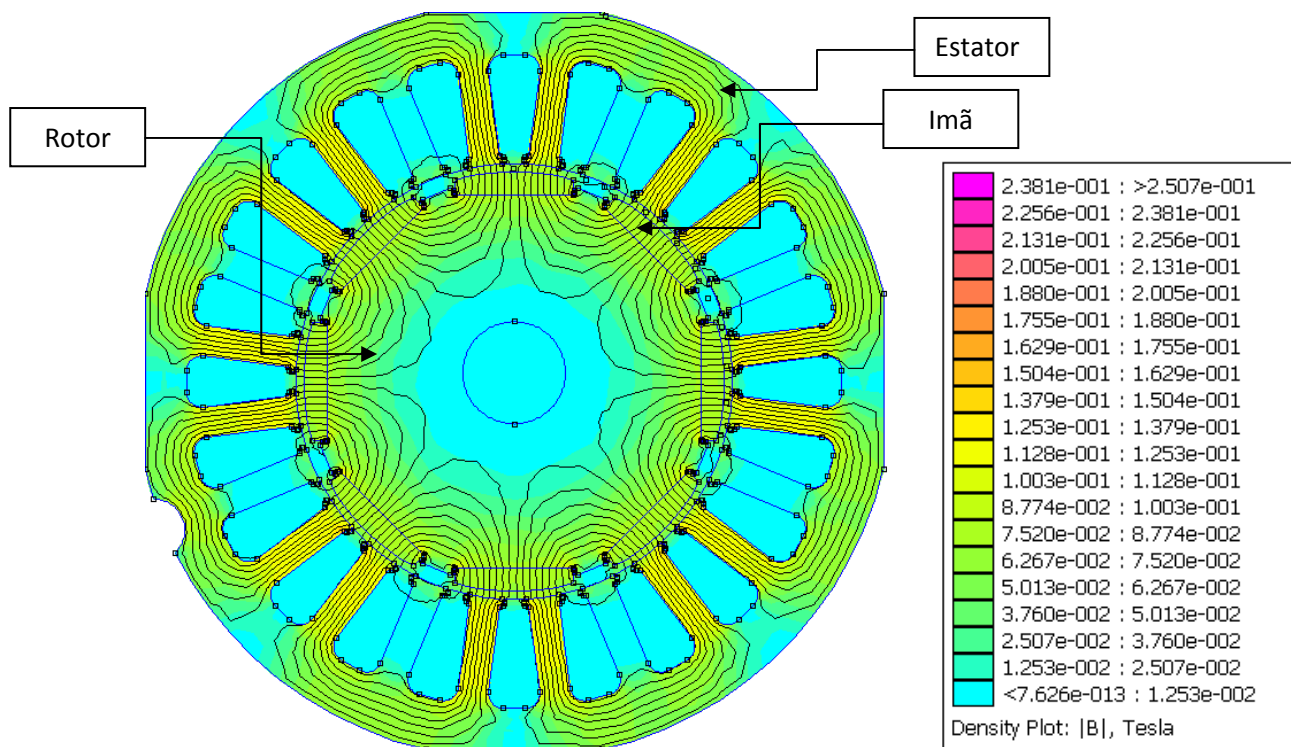


Fig. 4 – Geometria do servomotor e linhas de fluxo magnético.

Com as entradas necessárias definidas é gerada a malha que permitirá a divisão do problema em pequenas áreas de contorno conhecido. O *postprocessor*

então permite ao usuário uma série de respostas ao problema apresentado. Para este estudo, que tem como objetivo verificar o comportamento de um material magnético, as propriedades obtidas foram de corrente de Foucault e fluxo magnético.

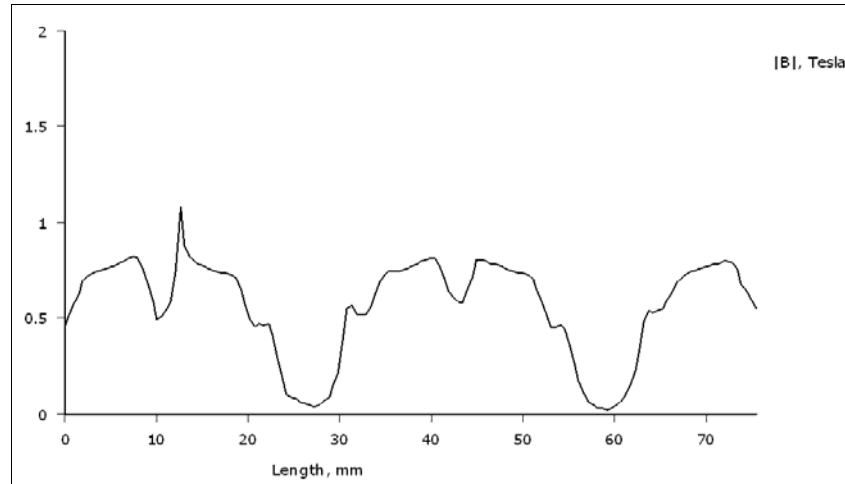


Fig 5 – Fluxo magnético no entreferro do servomotor.

O torque apresentado pelo servomotor de núcleo sinterizado foi aproximadamente o mesmo do apresentado pelo motor original da WEG, no qual foi baseado o estudo, com 2,4 Nm. O valor de perdas por correntes de Foucault foi de 0,2 MA/m².

CONCLUSÕES

O material sinterizado simulado apresentou valores próximos ao apresentado pelo motor com núcleo e estator laminado. Através da simulação foi possível visualizar que o torque e o fluxo magnético concatenado em cada bobina são perfeitamente aplicáveis para construção de um motor com o material simulado.

A corrente de Foucault apresentou valores acima do esperado o que pode determinar a perda de uma quantidade razoável de fluxo eletromagnético e o possível aquecimento da máquina elétrica. Uma possibilidade para solucionar este problema seria acrescentar uma quantidade maior de resina ao material metálico o que aumentaria a resistividade da liga.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ – Conselho Nacional de Apoio a Pesquisa e a FAPERGS – Fundação de Amparo a Pesquisa do Rio Grande do Sul por financiarem este trabalho, a EPI Energia Projetos e Investimentos Ltda pelo suporte técnico ao projeto. A Höganäs do Brasil Ltda. e a Catálise Ltda. pelo fornecimento das matérias primas utilizadas para confecção de amostras.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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**. New York: McGraw-Hill Inc, 1990.
3. JANSSON, P. Soft Magnetic Materials for A.C. Applications. **Powder Metallurgy**, v.35, n.1, p.63-66, 1992.
4. 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**, Indiana, US, v.6, n.6, p.710-712, 1997.
5. JILES, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. Boca Raton:Chapman and Hall, 1998.
6. KRAUS, J.D.; CARVER, K. R. **Electromagnetic**. McGraw-Hill, 1992.
7. CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó**. Brasil: Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda, 1992.
8. BRADBURY, S. **Powder Metallurgy Equipment Manual**. USA: MPIF, 1986.
9. GERMAN, R.M. **Powder Metallurgy Science**. USA: Metal Powder Industries Federation, 1984.
10. LUBORSKY, F.E.; LIVINGSTON, J.D.; CHIN, G.Y. Magnetic Properties of Metals and Alloys. **Physical Metallurgy**, Amsterdam: Elsevier Science, 1996.
11. LALL, C.; BAUM, L.W. High Performance Soft Magnetic Components by Powder Metallurgy and Metal Injection Molding. **Modern Developments in P/M**, v.18, p. 363-389, 1998.
12. LALL, C. **Soft Magnetism, Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding** Princeton, New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 1992.
13. JAMES, B. A.; WILLIAMS, G. Review of the Magnetic Properties of Sintered Iron. **Powder Metallurgy**, v.22, n. 2, p.75-85, 1979.

14. LANDGRAF, F.J.G.; PLAUT, R.L. Efeito do Tamanho de Grão na Permeabilidade Magnética Máxima da Liga Ferro 47,5% Níquel. **Metalurgia – ABM**, Brasil, v.45, n.380, 1989. p.677-681.
15. MOYER, K.H. **The Effect of Proposity on the Properties of Iron Compacts**. Riverton: N.J. Hoeganes Corporation, 1980.
- [16] LALL, C. The Effect Sintering Temperature and Atmosphere on the Soft Magnetic Properties of P/M Materials, *Advances in Powder Metallurgy*, v.3, 1992.
- [17] LENEL, F.V. Magnetic Applications. *Metals Hadbook*, v.7, 1984. p.638-641.
- [18] 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.

COMPARATIVE STUDY OF SOFT MAGNETIC ALLOY BY FINITE ELEMENTS SIMULATION

ABSTRACT

The aim of this paper is apply soft magnetic composite in magnetic cores (rotors and stators) of electrical machines. Traditionally the electrical machines cores are made by laminated steel sheets. Thus, the cores developed in this research are obtained by an alternative process called powder metallurgy, where powder of magnetic alloys are mixed with thermosetting resins, compacted and cured. Some magnetic alloys with different magnetic properties were mixed with different resins. Several samples were made using these mixed powder and their electromagnetic properties were measured. From a three phase motor with ½ cv, made by WEG Motores, it was simulated using the same topology but with different magnetic cores materials and the results were compared.

Keywords: Magnetic materials, finite elements simulation, powder metallurgy, electrical machines' core.