

Estudo de alto-falantes a partir de materiais magnéticos macios sinterizados

Loudspeaker study from the soft magnetic materials sintered

Alex Rodrigues Soares¹, Eduardo Costa Braga¹
Universidade Feevale
alex.r.soares@bol.com.br, ecb@feevale.br

Sérgio Deitos Bittencourt², Lírio Schaeffer²
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
sergio.deitos.bitten@terra.com.br, schaefer@ufrgs.br

Ricardo Martins de Martins¹, Patrice Monteiro de Aquim¹
Universidade Feevale
ricardomartins@feevale.br, patrice@feevale.br

José Lesina César³
Universidade Luterana do Brasil
engmecanica.canoas@ulbra.br

Moisés de Mattos Dias¹
Universidade Feevale
moisesdias@feevale.br

Resumo. Este trabalho tem por objetivo o estudo de alto-falantes nos quais os núcleos, usualmente construídos a partir de ferro fundido ou aço laminado, são substituídos por peças de ligas obtidas a partir dos processos da Metalurgia do Pó. O estudo compreende a obtenção de curvas de histerese de Fe puro e de diversas ligas sinterizadas, tais como, FeP, FeSi e FeNi e posterior simulação através de elementos finitos, considerando uma topologia convencional de um alto-falante comercial. As simulações compreendem a avaliação de fluxo no entreferro e um estudo teórico sobre as potências desenvolvidas comparativamente a alto-falantes com núcleos convencionais.

Palavras-chave: metalurgia do pó, simulação por elementos finitos, alto-falantes.

Abstract. This work has the purpose of studying loudspeakers in which the cores usually constructed from cast iron or rolled metal are replaced with parts of alloy obtained from the Powder Metallurgy process. The study comprises the obtaining of hysteresis curves of pure iron and some sintered alloys such as FeP, FeNi and FeSi and simulation by the finite element considering a conventional topology of a commercial loudspeaker. The simulations include the evaluation of flow in the air gap and a theoretical study of the powers developed compared to loudspeakers with conventional cores.

Keywords: powder metallurgy, simulation by the finite element, loudspeakers.

¹ Universidade Feevale. Campus II. ERS 239, 2755, 93525-075, Novo Hamburgo, RS, Brasil.

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Universidade Luterana do Brasil. Rua Farroupilha, 8001, 92420-280, Canoas, RS, Brasil.

Introdução

A história dos alto-falantes empregados atualmente teve seu início no ano de 1874, quando Ernest W. Siemens (fundador da Siemens & Halske) desenvolveu um dispositivo similar ao alto-falante eletrodinâmico com bobina móvel. Porém, seu dispositivo, que utilizava uma bobina circular posicionada em um campo magnético, era utilizado inicialmente como atuador mecânico (relé telegráfico). Em 1877, o mesmo Siemens desenvolveu, da mesma forma que o radiador sonoro de um transdutor de bobina móvel, um diafragma não magnético, que tinha sua forma parecida com o de uma trombeta, devido às extremidades exponencialmente alargadas. Dessa forma, surgiu o alto-falante corneta, que fora utilizado na maioria dos fonógrafos mecânicos, inventados nesse mesmo ano por Thomas Edison (Dickason, 1997).

Para os fonógrafos mecânicos, cujo funcionamento se dava por dispositivos a corda, que tinham na base um cone acústico e um diafragma que vibra quando a agulha passa pelos sulcos dos discos, sua amplificação era mecânica, e não possuíam potência sonora suficiente para serem ouvidos em grandes ambientes (Dickason, 1997).

Nos anos de 1920, com a chegada das válvulas termoiônicas, que produziam sinais elétricos, surgiu a necessidade de um dispositivo capaz de transformar esses sinais em sinais sonoros, o qual foi denominado alto-falante ou alto-falante, que foram inicialmente utilizados para os fonógrafos elétricos e, após, nos rádios receptores. As válvulas de potência entregavam o sinal elétrico muitas vezes amplificado a um transformador de potência, que induzia a tensão elétrica na bobina central do alto-falante, presa a um cone de papel. A bobina estava inserida em um ímã potente e dentro de seu campo magnético; quando a tensão gerava uma corrente elétrica, a bobina vibrava na mesma frequência da agulha fonocaptora, porém, com maior intensidade, transferindo essa vibração para o cone de papel, fazendo o ar vibrar e, conseqüentemente, gerando o som audível à plena potência (Dickason, 1997).

Surgiu, assim, o alto-falante de bobina móvel, desenvolvido pelos norte-americanos Chester Rice e Edward Kellogg, no ano de 1924. A simplicidade de sua construção mecânica e a boa qualidade da reprodução sonora possibilitada pelo novo dispositivo fizeram

com que ele permanecesse praticamente inalterado até os dias de hoje (Dickason, 1997).

Da mesma maneira que as máquinas elétricas rotativas ou os motores elétricos, conforme Fitzgerald *et al.* (1990), o conjunto magnético de um alto-falante funciona como um dispositivo eletromagnético, ou, mais precisamente, eletro-magneto-mecânico, uma vez que possui uma bobina e ímãs permanentes, que causam movimento mecânico no cone, similar a movimentos em motores e geradores elétricos. Um típico alto-falante possui três partes principais, que são: o entreferro, as arruelas de ferro superior e inferior (núcleos) e os ímãs de ferrita de bário (Dickason, 1997). Alguns podem ser construídos com ímãs ferrita de bário ou estrôncio, e aqueles de alto rendimento, com ímãs de Nd-Fe-B. Os núcleos e arruelas, com raras exceções, são construídos a partir de discos e chapas metálicas (chapas de aço baixo carbono) com espessura entre 4,5 mm e 12 mm.

Assim, este trabalho tem por objetivo o estudo de alto-falantes nos quais os núcleos usualmente construídos a partir de ferro fundido são substituídos por peças de ligas obtidas a partir dos processos da Metalurgia do Pó (M/P) (Narasimhan *et al.*, 1997). O estudo compreende a obtenção de curvas de histerese de Fe puro e de diversas ligas sinterizadas, tais como FeP, FeSi e FeNi e posterior simulação através de elementos finitos, considerando uma topologia convencional de um alto-falante comercial. As simulações compreendem a avaliação de fluxo de entreferro e, conseqüentemente, uma extrapolação sobre as potências desenvolvidas, comparativamente a alto-falantes com núcleos convencionais. Salienta-se que em dispositivos eletro-magneto-mecânicos, as potências mecânicas desenvolvidas estão relacionadas ao fluxo magnético nos núcleos e entreferros (Fitzgerald *et al.*, 1990).

Materiais e métodos

Metalurgia do pó

A M/P é um processo da metalurgia de transformação, no qual 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. Os pós, depois de serem misturados, são compactados em matrizes, onde adquirem a forma da cavidade da matriz. Na seqüência, são coloca-

dos em fornos para sinterização, levando-os a apresentar consistência e resistência mecânica (Grupo Setorial da Metalurgia do Pó, 2009). A Figura 1 apresenta as diversas etapas da M/P.

Os materiais sinterizados mais comumente utilizados para dispositivos eletromagnéticos, como certos tipos de motores elétricos ou outros dispositivos constituídos por núcleos envolvidos por bobinas, estão relacionados a seguir, assim como suas propriedades físicas de interesse (Bas *et al.*, 1988; Lall e Baum, 1988).

Ferro puro: Os materiais sinterizados de ferro puro são caracterizados por altas perdas e propriedades magnéticas médias. Seu uso é aconselhável principalmente para corrente contínua ou circuitos de excitação magnética permanente, com fluxos magnéticos de médio a alto, devido à sua baixa resistividade elétrica. O ferro puro sinterizado de alta densidade possui elevadas saturação magnética e permeabilidade, e baixa coercitividade, propriedades essenciais para aplicações de corrente contínua (Bas *et al.*, 1988).

Ligas ferro-cobalto: Estas ligas têm como principal característica a sua alta indução máxima. Esta propriedade é interessante quando o volume e o peso dos componentes devem ser minimizados (Bas *et al.*, 1988).

Liga ferro-fósforo: Os materiais sinterizados de ferro-fósforo (com teores de fósforo na faixa de 0,45 a 0,80%) mantêm as vantagens econômicas do ferro puro, adicionando, ainda, características magnéticas superiores. Basicamente, a força coercitiva é reduzida, enquanto se mantém uma alta indução máxima (Bas *et al.*,

1988). Essas ligas são utilizadas principalmente quando se deseja uma boa resposta magnética, aliada a boas propriedades mecânicas.

Ligas ferro-silício: Estas ligas têm força coercitiva similar às ligas ferro fósforo, com uma indução máxima ligeiramente maior. Porém, sua resistividade elétrica é bastante superior, diminuindo, assim, as perdas por correntes parasitas. Essas ligas são aplicadas em circuitos que operam em frequências médias de até 1.200 Hz. Induções máximas elevadas podem ser obtidas em peças de alta densidade, porém, o custo de produção aumenta, devido à alta abrasividade e à relativamente baixa compressibilidade do material (Lall, 1992).

Aços inoxidáveis ferríticos: Os aços inoxidáveis ferríticos tornaram-se populares em meados da década de 1980, quando começaram a ser utilizados em anéis sensores de sistema de freios antiblocantes (ABS), devido à sua resposta magnética e moderada resistência à corrosão (Lall, 1992). Além disso, quando sinterizados em vácuo, esses materiais podem exibir certo grau de ductilidade, essencial na montagem desses componentes.

Ligas ferro-níquel: A principal característica que distingue as ligas ferro níquel das demais é a sua alta permeabilidade, que é a maior de todas as citadas anteriormente. Ademais, a indução máxima é baixa, e a resistividade elétrica tem um valor relativamente alto (Narasimhan *et al.*, 1997). Essas propriedades tornam essas ligas atraentes em aplicações mais sofisticadas, que operam em altas frequências e com baixa excitação. O efeito mais significativo do aumento do teor de níquel é uma queda na retentividade e um aumento na coercitividade. Apesar de a liga Fe-50%Ni apresentar valores de coercitividade, indução residual e induções máximas menores se comparada à liga Fe-3%Si, ela é mais indicada para aplicações em corrente alternada de alto desempenho, especialmente se for considerado que a permeabilidade máxima desse material é aproximadamente quatro vezes à da liga Fe-3%Si e quase seis vezes à do ferro puro (Lall, 1992).

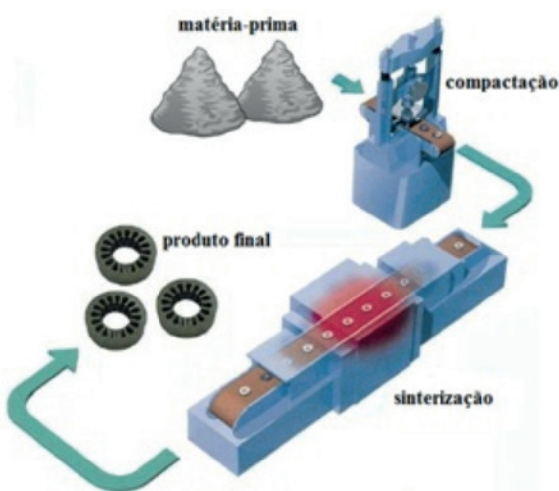


Figura 1. Representação esquemática das etapas do processo de M/P.

Figure 1. Schematic representation of the steps in the powder metallurgy process.

Corpos de prova

A definição da liga a ser utilizada nos estudos dos núcleos do alto-falante foi realizada a partir do estudo das propriedades físicas de algumas ligas sinterizadas, como FeP, FeSi e FeNi e suas variações. Para análise das propriedades magnéticas e resistividade elétrica

ca, utilizou-se uma matriz para obtenção de corpos de prova na forma de anéis, conforme apresenta a Figura 2.

Para análise da dureza e tensão de escoamento das ligas estudadas, utilizou-se uma matriz, onde foram obtidos corpos de prova na forma de cilindros, conforme apresenta a Figura 3.

Na análise das perdas em frequência, foram utilizadas as matrizes para obtenção de corpos de prova na forma de núcleos de transformadores, apresentados na Figura 4.

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, 3%), silício (1, 3, 5%) e níquel (50%) em um misturador duplo cone, com rotação de 60 rpm durante 20 minutos, para dispersão dos constituintes. Também foi adicionado às misturas 1% de lubrificante sólido à base de estearato de zinco.

Considerando dados bibliográficos (Bradbury, 1986; German, 1984), as ligas a partir do ferro têm pressão de compactação média de 600 MPa. Assim, os corpos de prova foram compactados com essa pressão.

A sinterização dos corpos de prova foi realizada em forno tubular, com atmosfera controlada (pressão atmosférica) e gás verde (5% de Hidrogênio e o restante de Nitrogênio).

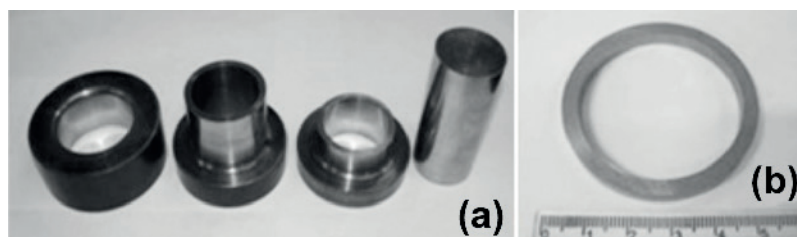


Figura 2. Amostras na forma de anel – (a) Matriz; (b) Corpo de Prova.
Figure 2. Samples in ring shape – (a) Matrix; (b) Proof Body.



Figura 3. Amostras na forma de cilindro – (a) Matriz; (b) Corpo de Prova.
Figure 3. Samples in cylinder shape – (a) Matrix; (b) Proof Body.

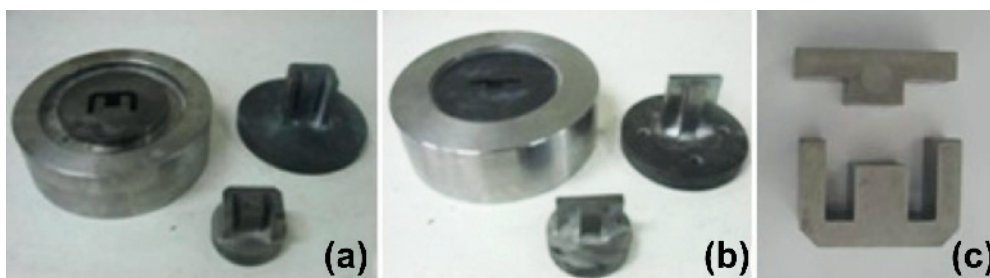


Figura 4. Amostras na forma de núcleo de transformador – (a) Matriz Núcleo E; (b) Matriz Núcleo T; (c) Corpos de Prova.
Figure 4. Samples in transformer core shape – (a) Matrix Core E; (b) Matrix Core T; (c) Proof Bodies.

Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto, até a temperatura de 500°C, sendo que as peças permaneceram no forno por 30 minutos, para a retirada do lubrificante sólido (estearato de zinco). A seguir, a temperatura foi elevada para 1.150°C, quando ocorre a sinterização, mantendo-se nessa temperatura por 60 minutos, patamares segundo dados bibliográficos (Bradbury, 1986; German, 1984). Após, as peças permaneceram no forno tubular para resfriamento lento até a temperatura ambiente.

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 \mathbf{H} aplicado a um material, com a indução magnética \mathbf{B} resultante. A partir do laço de histerese, foram obtidas a retentividade (magnetismo remanente) e a coercitividade (campo desmagnetizante). Com base na curva de magnetização, foram obtidas a permeabilidade magnética e a indução de saturação, ou indução máxima (que também pode ser visualizada a partir do laço de histerese) (Jiles, 1998). A determinação das propriedades magnéticas básicas dos materiais na forma de anel (toroide) segue a norma ASTM A773 (ASTM A773/A773M-14, 2014). As curvas magnéticas foram obtidas a partir de um dispositivo modelo *TLMP-TCH-14*.

Para a aplicação desse método de análise, é necessária a preparação de amostras, que consiste na bobinagem (enrolamento de fios de cobre) de espiras primárias e secundárias no anel, conhecidas como Anel de Rowland. O procedimento consiste em isolar o anel com filme plástico, para evitar descascamento do fio esmaltado, enrolamento de espiras secundárias e novo isolamento, seguido do enrolamento das espiras primárias – essas etapas são apresentadas na Figura 5.

A resistividade do material (corpos de prova) das ligas foi determinada a partir do cál-

culo da resistência elétrica. Para medição de resistência elétrica, utiliza-se um dispositivo denominado de multímetro ou multiteste, dispositivo esse 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 esse tenha a forma de uma barra curvada, ou seja, de grande comprimento e pequena área de seção transversal, conforme a lei de Ohm expressa na Equação (1) (Boylestad e Nashelsky, 2009).

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

Para a qual ρ é a resistividade elétrica [$\mu\Omega \cdot m$]; R , a resistência elétrica [Ω]; V , a tensão elétrica aplicada [V]; I , a corrente elétrica aplicada [A]; A , a área da seção transversal da barra [m^2] e l refere-se ao comprimento da barra (ou segmento de um anel) [m].

A Figura 6 apresenta um segmento de um anel com fios de cobre ou terminais soldados para medida da resistividade elétrica.

Para avaliação da resistência à vibração de um material a ser utilizado em um alto-falante, também foram efetuados ensaios mecânicos nos corpos de prova. Os ensaios de dureza (Brinell – HB) foram realizados em um durômetro *Precision-England* com indentador de esferas de 2,5 mm e carga de 187,5 kgf, segundo a norma ASTM E10 (ASTM E10-15, 2015). Os ensaios de compressão foram executados em uma máquina de ensaios universal Emic DL20000, utilizando-se velocidades de 2,0 mm/min, de acordo com a norma ASTM E9 (ASTM E9-09, 2009).

Perdas magnéticas

As perdas magnéticas nos materiais estudados foram determinadas a partir de corpos

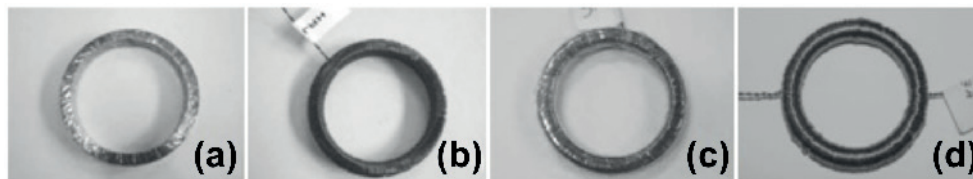


Figura 5. Etapas de preparação das amostras: (a) Isolamento; (b) Enrolamento secundário; (c) Isolamento; (d) Enrolamento do primário.

Figure 5. Steps concerning the preparation of the samples: (a) Insulation; (b) The secondary winding; (c) Insulation; (d) The primary winding.

de prova na forma de núcleos E e T idênticos a núcleos de transformadores de tensão elétrica convencionais de mesmas dimensões e mesmos enrolamentos. Assim, as perdas magnéticas foram determinadas de forma similar a perdas em um transformador convencional com núcleo de chapas laminadas (Nasar, 1987).

Os núcleos nas geometrias E e T foram submetidos a processos de retificação, de tal maneira a ficarem com as mesmas dimensões de um núcleo de um transformador elétrico convencional. A seguir, os núcleos foram bobinados na forma típica de transformadores de tensão elétrica, com bobinas do enrolamento primário e secundário. A Figura 7 apresenta os núcleos dos transformadores e os mesmos respectivamente montados, obtido a partir da M/P e a partir de chapas de aço laminadas.

Salienta-se que este estudo 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 os mais próximos possíveis do convencional. Assim, os enrolamentos utilizados nos transformadores desenvolvidos foram os mesmos enrolamentos do transformador convencional, tendo este sido desmontado e retirado o carretel onde se encontravam as bobinas. Esse procedimento foi utilizado para que fosse possível uma análise comparativa do transformador convencional e dos 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 frequên-



Figura 6. Anel segmentado com terminais para medida da resistividade elétrica.

Figure 6. Ring segmented with terminal for measuring the electrical resistivity.

cia. 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 de 6 Vrms (metade da tensão nominal do enrolamento), mantendo-se o enrolamento do lado de alta tensão em aberto, tendo sido variada a amplitude do lado de baixa tensão até o lado de alta tensão atingir 75 Vrms.

Dessa forma, garante-se que a tensão induzida no secundário (lado de alta tensão) permaneça constante para os núcleos estudados. Após, mediu-se a potência fornecida pela fonte e descontaram-se as perdas no enrolamento. A potência resultante está relacionada diretamente com as perdas nos núcleos por correntes parasitas e pelo ciclo de histerese. Posteriormente, foi colocada uma carga na saída do transformador; portanto, nessa configuração, para a determinação das perdas magnéticas nos núcleos, deve-se descontar a potência dissipada na carga e a perda nos enrolamentos do primário e secundário. Por rendimento, entende-se a relação entre a Potência de Saída pela Potência de Entrada, descontando-se as perdas nos enrolamentos. Devido à analogia intrínseca entre o funcionamento de motores elétricos e transformadores com alto-falantes, os mesmos ensaios podem ser estendidos a núcleos de alto-falantes (Nasar, 1987).

Estrutura dos alto-falantes

Os alto-falantes são transdutores eletrodinâmicos de graves, médios e agudos, e se baseiam todos em um mesmo conceito: um diafragma em movimento, devido a um campo magnético modulado em amplitude, atuando em conjunto a um ímã permanente. Esse mecanismo é análogo ao de um motor elétrico, sendo, no caso do alto-falante, o rotor substituído pela bobina móvel (Dickason, 1997).

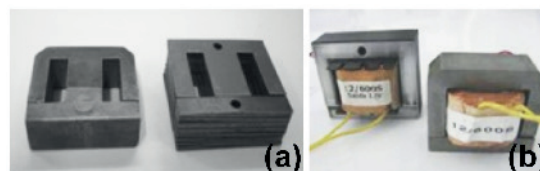


Figura 7. Transformadores – (a) Núcleos por M/P à esquerda e de chapas à direita; (b) Bobinados e montados por M/P à direita e de chapas à esquerda.

Figure 7. Transformers – (a) Cores by powder metallurgy on the left and laminated on the right; (b) Coils and assembled by powder metallurgy on the right, and laminated on the left.

Quando se aplica corrente à bobina móvel, um campo eletromagnético é produzido perpendicularmente ao fluxo da corrente e ao campo do ímã permanente. A força mecânica resultante obriga o diafragma (ou cone) a deslocar-se em um movimento perpendicular ao campo magnético no entreferro, movimentando o ar em ambos os lados do cone, conforme ilustrado na Figura 8 (Eargle, 1997).

Três sistemas distintos, que são o sistema motor, o diafragma e a suspensão, estão interligados entre si e operam em uníssono em um transdutor eletrodinâmico:

Sistema motor: É composto basicamente por cinco partes: placa frontal e peça polar, que, em conjunto, formam o entreferro, ímã permanente, bobina móvel e placa traseira. As placas traseira e frontal, assim como a peça polar, são construídas a partir de um material de alta permeabilidade magnética, como o ferro, e proporcionam um caminho de baixa relutância para o fluxo magnético do ímã. O ímã é usualmente feito de ferrita de bário, um material cerâmico sinterizado em forma de anel. O circuito magnético fecha-se no entreferro, produzindo um campo magnético intenso entre a peça polar e a placa frontal, conforme Figura 9 (Eargle, 1997).

Salienta-se que, caso uma corrente alternada senoidal seja aplicada à bobina móvel, tem-se um fluxo de corrente em um determinado sentido durante o semiciclo positivo, o que deslocará o cone em uma dada direção. Quando o fluxo de corrente inverter-se durante o semiciclo negativo, a polaridade do campo magnético também se inverte, obrigando o deslocamento do cone a tomar o sentido oposto, consequência das sucessivas atrações e repulsões dos dois campos (Eargle, 1997).

Sistema diafragma: O som produzido por um alto-falante nada mais é do que uma turbulência ritmada no ar, causada pelo movimento do diafragma, resultado da interação do campo magnético da bobina com o campo do ímã permanente. Composto pelo cone e por um domo protetor, o diafragma pode interferir na qualidade e nas características de resposta de um alto-falante. Existem duas formas básicas de cone, utilizadas em projetos de diafragmas: a cônica e a convexa. Os cones de forma cônica tendem a apresentar um elevado pico no extremo superior da faixa de resposta, sendo sua localização determinada, em parte, pelo ângulo de inclinação do cone. Comparando com a forma convexa, a banda passante é um pouco mais larga (Eargle, 1997).

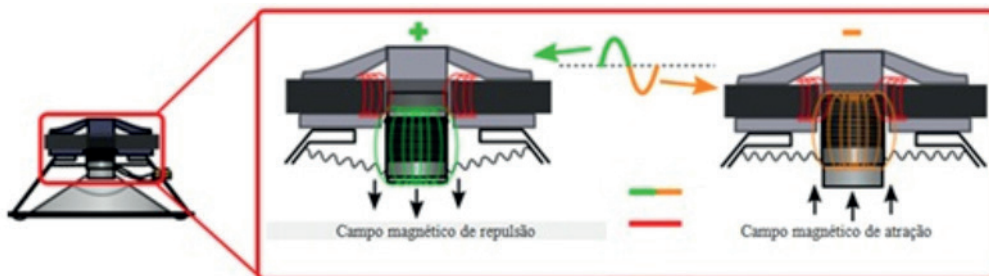


Figura 8. Representação do campo magnético gerado em um alto-falante.
Figure 8. Representation of the magnetic field generated in a loudspeaker.

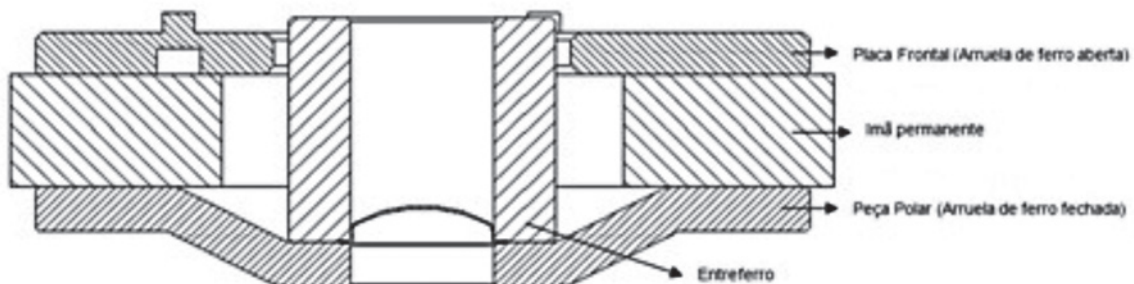


Figura 9. Seção do conjunto magnético tradicional de um alto-falante.
Figure 9. Section of the traditional magnetic assembly of a loudspeaker.

Os domos (calotas) são responsáveis por proteger a região formada entre a bobina e a peça polar, exposta a partículas estranhas. Porém, os domos também podem alterar a resposta de alta frequência do alto-falante. Como existe tendência natural do cone irradiar apenas pela área do centro as frequências mais elevadas, o domo pode desempenhar papel crítico nessa faixa, conforme o material de sua construção e forma geométrica. Domos sólidos tendem a produzir maiores alterações na resposta de frequência que os porosos. Ocasionalmente, encontram-se domos sólidos com um orifício de ventilação telado, o que lhes dá os benefícios ou inconvenientes de ambos os métodos. A Figura 10 apresenta o modelo de conjunto suspensão cônica e domo (Eargle, 1997).

Sistema suspensão: A suspensão de um alto-falante é composta por dois elementos: o anel de suspensão e a aranha. Ambos são responsáveis por um parâmetro fundamental do alto-falante, a *compliance*, que é análogo ao inverso da rigidez, e também fornecem a energia necessária para que o cone e a bobina móvel voltem aos respectivos estados de repouso. A aranha contribui com 80% da *compliance* do alto-falante, enquanto o anel contribui com os 20% restantes (Eargle, 1997).

O anel de suspensão é geralmente feito de um material elastomérico ou compósito (resina fenólica + fibra de algodão) e possui duas funções importantes. A primeira função é ajudar a manter centrada a bobina móvel do alto-falante, e a segunda, de importância fundamental, é amortecer os modos de vibração na borda externa do cone. A escolha da espessura do tipo de material usado nesse anel pode alterar drasticamente as características do alto-falante. A habilidade do anel de suspensão para amortecer vibrações, impedindo que sejam refletidas de volta ao cone, modifica tanto a amplitude como a fase nos modos de ressonância, fazendo dele um elemento importante do projeto do alto-falante e uma ferramenta eficaz para a configuração da resposta. A Figura 11 apresenta o anel de suspensão (Eargle, 1997).

A aranha, normalmente feita de linho corugado, desempenha várias funções. Sua fun-

ção secundária é manter centrada a bobina móvel no *GAP* (entreferro) e impedir a entrada de partículas estranhas no entreferro. Contudo, sua principal finalidade é proporcionar a maior parte da força restauradora (*compliance*) do alto-falante. É a rigidez da aranha uma das variáveis determinantes no cálculo da frequência de ressonância do alto-falante. A Figura 12 ilustra uma aranha (Eargle, 1997).

Topologia do conjunto magnético do alto-falante e simulações

Os resultados das interações eletromagnéticas de um conjunto magnético 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 um com uma geometria simples, ou triângulos. Em cada elemento, a solução é aproximada através de uma interpolação dos valores de cada vértice do triângulo (Meeker, 2010).

Por intermédio do *software* FEMM 4.2, é possível verificar dados importantes, como o fluxo magnético de entreferro, condição essencial para análise de desempenho de dispositivos eletromagnéticos como os alto-falantes.

Assim, as simulações foram efetuadas a partir do projeto dimensional do conjunto



Figura 10. Conjunto suspensão cônica e domo.
Figure 10. Set suspension and conical dome.



Figura 11. Anel de suspensão.
Figure 11. Suspension ring.



Figura 12. Aranha.
Figure 12. Spider.

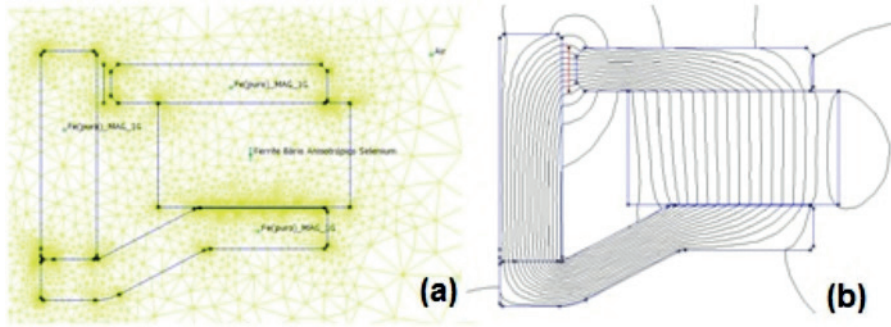


Figura 13. Simulação do conjunto de um alto falante – (a) Malha gerada para determinação da indução magnética; (b) Fluxo magnético no entreferro.

Figure 13. Set a loudspeaker simulation – (a) Mesh generated in order to determine the magnetic induction; (b) Magnetic flux in the air gap.

magnético, considerando as ligas sinterizadas estudadas e um dos materiais convencionais, ou seja, o aço 1008. Os materiais simulados foram alterados na arruela superior e arruela inferior e no núcleo do entreferro. A ferrita (ímã) permaneceu constante em todas as simulações. A Figura 13a ilustra a malha gerada para cálculo da densidade de fluxo (pequenos triângulos) para o ferro puro sinterizado, e a Figura 13b apresenta as linhas de fluxo magnético no entreferro, onde ocorre o movimento da bobina em um alto-falante. Nesse entreferro, quanto maior a densidade de fluxo (ou indução), maior são as forças que atuam no cone, resultando, com isso, maior potência.

Resultados e discussões

Propriedades físicas obtidas das ligas sinterizadas

Foram obtidas propriedades magnéticas, a partir das curvas $B \times H$, resistividade elétrica, a partir da Equação 1, e propriedades mecânicas para os corpos de prova estudados. A Figura 14 apresenta 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%), e a Figura 15 apresenta algumas das curvas de histerese.

A partir das Figuras 14 e 15, pode-se observar que o Fe-50%Ni apresentou menores coercitividade e perdas por histerese (área interna da curva) que os demais materiais sinterizados. Porém, exibiu, também, menor indução de saturação, propriedade de grande importância para a aplicação desses materiais

em núcleos de dispositivos eletromagnéticos. Salienta-se que a curva de histerese do ferro puro tem características semelhantes ao ferro baixo carbono, material típico utilizado nos núcleos de alto-falantes convencionais. O Fe-1%P apresentou maior indução máxima e menores perdas por histerese e coercitividade em relação ao ferro puro.

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

O ferro puro sinterizado apresenta uma densidade entre 6,8 a 7,4 g/cm³, o Fe-1%P exibe uma densidade entre 7,0 a 7,4 g/cm³, o Fe-3%Si apresenta uma densidade entre 6,8 a 7,2 g/cm³, e o Fe-50%Ni evidencia uma densidade entre 6,8 a 7,5 g/cm³ (Narasimhan *et al.*, 1997). Entretanto, somente a liga Fe-50%Ni resultou em densidade de acordo com as referências (7,25 g/cm³). As densidades das outras ligas resultaram no limite inferior das faixas citadas ou abaixo deste. Tal fato ocorreu devido às muitas variantes nos processos da M/P, nos quais fatores como tamanho e forma de partícula, pressão de compactação, patamares de sinterização e atmosfera influenciam na densidade desejada (German, 1984).

Além disso, algumas referências não indicam as pressões de compactação utilizadas para materiais magnéticos macios por M/P, e, em alguns estudos, utilizam-se pressões até 800 MPa para materiais compostos por M/P, e tal pressão tende a incrementar o valor da densidade (Enescu *et al.*, 1998).

A resistividade aumentou com a adição de P, Si, e Ni no Fe, pois esses acréscimos provo-

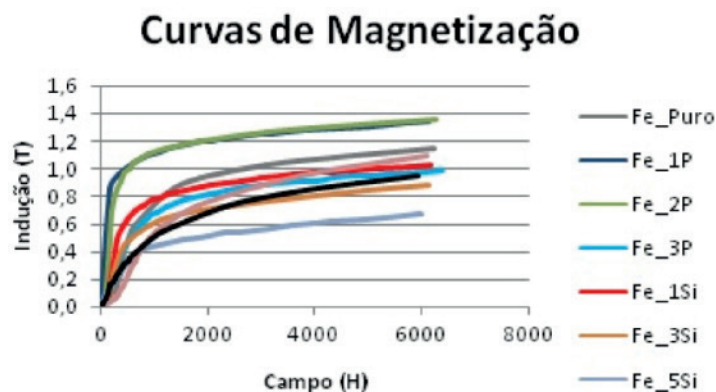


Figura 14. Curvas de magnetiza o das ligas sinterizadas.
Figure 14. Magnetization curves of the sintered alloys.

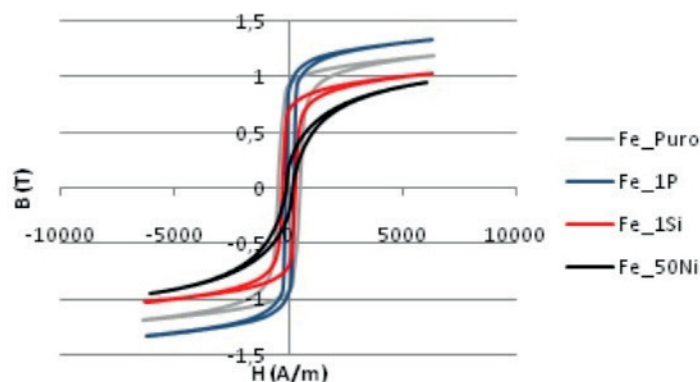


Figura 15. Laço de Histerese de algumas ligas sinterizadas.
Figure 15. Hysteresis loop of some sintered alloy.

Tabela 1. Propriedades físicas das ligas sinterizadas estudadas.
Table 1. Physical properties of the sintered alloys studied.

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

Onde: ρ_m   a densidade, ρ_e a resistividade elétrica, B_r a retentividade, H_c a coercitividade, B_{max} a indu o de satura o, μ_r a permeabilidade magnética relativa, **HB** a dureza na escala Brinell, σ_e a tensão de escoamento.

cam distorções no reticulado cristalino (Verma e Upadhyaya, 2007; Bas *et al.*, 2003). O Fe puro apresentou resistividade de $0,157 \mu\Omega\cdot\text{m}$, contra $0,482 \mu\Omega\cdot\text{m}$ da liga Fe5%Si. A maior resistividade foi obtida na liga Fe-5%Si, pois o silício, durante o processo de sinterização, não se densifica homogeneamente no ferro, e a substituição dos grãos de ferrita pelo Si aumenta a imperfeição na rede cristalina e eleva a resistividade (Buschow, 2011; Asaka e Ishihara, 2005; Silva *et al.*, 2003). As elevadas resistividades apresentadas no ensaio com material magnético macio são fundamentais para o uso em núcleo de dispositivos eletromagnéticos, uma vez que, dessa maneira, se reduzem as correntes parasitas. Também são fundamentais valores elevados de permeabilidade magnética relativa e indução de saturação, obtidos a partir das curvas magnéticas $B \times H$ (Narasimham *et al.*, 2008; Haneijo e Phan, 1996).

O acréscimo de fósforo permite obter as propriedades mecânicas desejadas utilizando temperaturas de sinterização menores, devido à formação de fase líquida transiente. O fósforo, em percentuais inferiores a 1%, não confere ao ferro sinterizado diminuição do limite de escoamento. Por outro lado, sua presença promove o aumento da dureza (Verma e Upadhyaya, 2007; Khraisat e Nyborg, 2003). Qualquer acréscimo do teor de um elemento de liga em um metal como o ferro aumenta a dureza da liga, devido às distorções no reticulado cristalino (Van Vlack, 1970).

Das ligas estudadas, o Fe-3%P apresentou tensão de escoamento de 120 MPa ($11,99 \text{ kgf/mm}^2$) e o Fe-5%Si, de 172,4 MPa ($17,23 \text{ kgf/mm}^2$). O aço 1008 utilizado em alguns núcleos de máquinas elétricas possui tensão de escoamento média de 170 MPa $16,99 \text{ kgf/mm}^2$, valor próximo das ligas estudadas. O Aço AISI 1008 possui dureza de 86 HB (Fletcher, 1990). A dureza do Ferro puro sinterizado foi de 52,5 HB, e o Fe-3%P apresentou dureza de 242,9 HB.

Portanto, com relação às propriedades mecânicas, os materiais sinterizados estudados estão dentro de parâmetros aceitáveis para sua utilização na construção dos núcleos da maioria dos dispositivos eletromagnéticos, como máquinas elétricas rotativas, transformadores e alto-falantes (Fitzgerald *et al.*, 1990; Verma e Upadhyaya, 2007).

Perdas em função da frequência

A Figura 16 apresenta o gráfico das perdas magnéticas em Watts para frequências de 60

Hz a 1 kHz para o transformador com núcleo de chapas e para os núcleos dos materiais sinterizados. Contudo, as perdas em núcleos de chapas constam neste ensaio somente como referência e comparação com os núcleos sinterizados. Na verdade, os núcleos de alto-falantes, convencionalmente, são construídos a partir de blocos maciços de aço baixo carbono, obtidos por fundição (Dickason, 1997). Na Figura 16, pode-se observar que, enquanto as perdas magnéticas no núcleo de chapas permanecem praticamente constantes, as perdas nos núcleos sinterizados decaem exponencialmente até 400 Hz, permanecendo praticamente constante a partir dessa frequência. Tal característica permite a utilização desses materiais sinterizados em dispositivos eletromagnéticos com corrente elétrica de elevada frequência, como, por exemplo, alguns motores elétricos (Lall, 1992). A faixa de frequência audível e que deve ser reproduzida em ondas sonoras por um alto-falante varia de 20 Hz a 20 kHz. Assim, na bobina de um alto-falante circulam correntes nessa faixa de frequência, induzindo também correntes parasitas na mesma faixa (Eargle, 1997).

Resultados das simulações

Foram obtidos os resultados da densidade de fluxo magnético (Tesla) do entreferro, local em que ocorre o deslocamento da bobina. A Figura 17 apresenta as densidades de fluxo magnético no entreferro para cada uma das ligas estudadas.

Em dispositivos eletromagnéticos como os motores elétricos e alto-falantes, para os quais existe uma conversão eletromecânica de energia, com movimentos de rotação ou vibração, a conversão de energia elétrica para mecânica ocorre no campo magnético de entreferro. Nos casos dos motores elétricos e alto-falantes, estes são transdutores de energia, pois transformam energia elétrica em mecânica. Considerando-se que a densidade de fluxo magnético no entreferro é proporcional ao campo magnético ali existente, uma maior densidade de fluxo resulta em maior campo de entreferro e, como consequência, maiores serão as forças atuando sobre o cone de um alto-falante, gerando maior potência. Assim, para mesmas dimensões e topologias, uma maior densidade de fluxo no entreferro resultará em maior potência, desde que as bobinas sejam devidamente redimensionadas (Nasar, 1987).

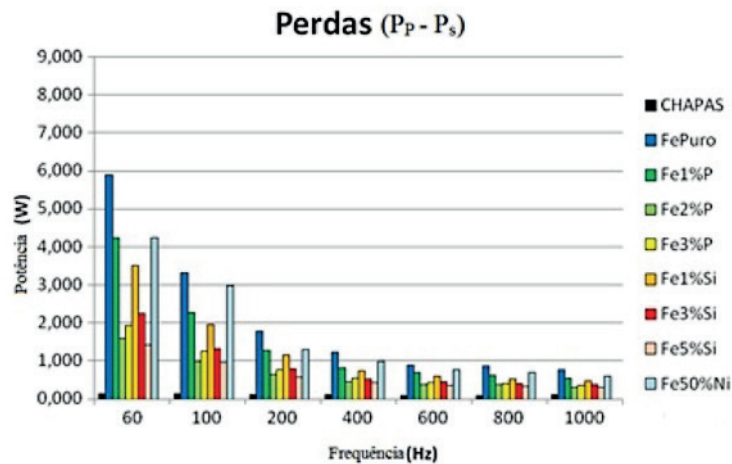


Figura 16. Perdas magnéticas em transformadores com núcleo de chapas e com Fe sinterizado com os seguintes teores: fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 5%) e níquel (50%).

Figure 16. Magnetic losses in transformers having core sheets and sintered Fe with the following contents: phosphorous (1, 2 and 3%), silicon (1, 3 and 5%) and nickel (50%).

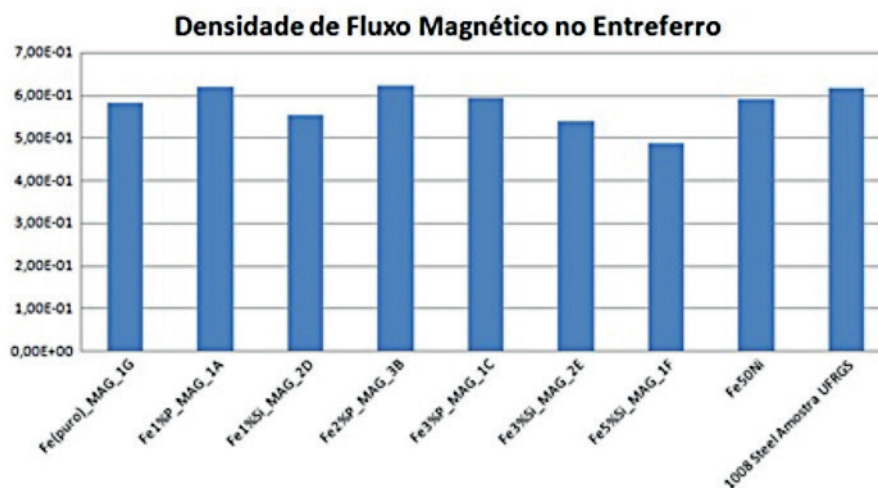


Figura 17. Comparativo entre densidade de fluxo das ligas estudadas.

Figure 17. Comparison concerning the flux density of the studied alloys.

Nas simulações realizadas estaticamente, o fluxo magnético dos núcleos com as ligas sinterizadas Fe1%P e Fe2%P resultou em valores próximos em relação ao tradicional aço 1008. O núcleo com Fe1%P apresentou fluxo magnético de 0,62 T, mesmo valor do aço 1008, contudo, o núcleo com Fe2%P apresentou valor 0,63 T. Entretanto, os núcleos com as ligas Fe3%P e Fe50%Ni apresentaram valores um pouco menores, ou seja, aproximadamente 0,59 T. O bom desempenho nas simulações das ligas sinterizadas citadas se deve aos seus valores de elevadas permeabilidade magnética e indução de saturação (Jiles, 1998).

Conclusões

A adição de P, Si e Ni no Fe aumentou consideravelmente a resistividade elétrica dos materiais magnéticos macios, sendo um fator preponderante na redução de perdas magnéticas. O Fe puro apresentou resistividade de $1,57 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$, contra $4,82 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$ da liga Fe5%Si, que foi a maior alcançada. A redução das correntes induzidas pode ser interpretada como um aumento da resistência elétrica do corpo, uma vez que são grandezas físicas inversamente proporcionais. Esse 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.

Os ensaios de perdas magnéticas nos materiais sinterizados apresentaram resultados equivalentes entre si em frequências elevadas. As ligas Fe1-2%P foram as que apresentaram o melhor conjunto de propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas entre as ligas estudadas. Em alto-falantes, a frequência das correntes que movimentam as bobinas compreendem uma faixa, e não somente uma frequência constante, como em motores e transformadores. Assim, este ensaio foi importante para demonstrar qual material possui menor perdas em função da frequência.

Nas simulações realizadas estaticamente, o fluxo magnético nos núcleos com as ligas de FeP (1,2 e 3%) resultou em indução magnética de entreferro próximas aos núcleos com aço 1008, sendo, inclusive, maior para a liga Fe2%P. Nessa condição, as forças atuantes na bobina de alto-falante que movem o cone irão gerar uma maior potência, desde que seguida de um aumento da corrente da bobina. Nessa condição, um alto-falante construído a partir da liga Fe2%P, teoricamente, poderia desenvolver uma maior potência que o mesmo alto-falante construído a partir do aço 1008.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos financiadores FINEP, FAPERGS e CNPq.

Referências

- ASAKA, K.; ISHIHARA, C. 2005. Technical trends in soft magnetic parts and materials. *Hitachi Powdered Metals Technical Report*, 4:3-9.
- ASTM A773/A773M-14. 2014. Standard Test Method for Direct Current Magnetic Properties of Low Coercivity Magnetic Materials Using Hysteresigraphs. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM E9-09. 2009. Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM E10-15. 2015. Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- BAS, J.A.; CALERO, J.A.; DOUGAN, M.J. 2003. Sintered soft magnetic materials. Properties and applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254-255:391-398. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00934-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00934-4)
- BAS, J.A.; PUIG, J.; MOLINS, C.B. 1988. Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art. *Proceedings of the International Powder Metallurgy Conference*, Orlando, p. 745-756.
- BOYLESTAD, R.L.; NASHELSKY, L. 2009. *Electronic Devices and Circuit Theory*. New Jersey, Prentice Hall, 894 p.
- BRADBURY, S. 1986. *Powder Metallurgy Equipment Manual*. New Jersey, MPIF, 199 p.
- BUSCHOW, K.H.J. 2011. *Handbook of Magnetic Materials*. North Holland, Elsevier Science, vol. 19, 464 p.
- DICKASON, V. 1997. *Caixas Acústicas & Alto-Falantes*. 5ª ed., Rio de Janeiro, H.Sheldon, 148 p.
- EARGLE, J. 1997. *Loudspeaker Handbook*. New York, Springer, 325 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-5680-7>
- ENESCU, E.; SOPTEA, E.; GAVRILIU, S.; CRISTESCU, E. 1998. New Composite Materials Based on Iron for Soft Magnetic Cores. *Cercetari Metalurgice (Metallurgy and New Materials Researches)*, II(3):69-78.
- FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, Jr. C.; UMANS, S.D. 1990. *Electric Machinery*. New York, McGraw-Hill Inc., 599 p.
- FLETCHER, F.B. 1990. Carbon and Low-Alloy Steel Plate. *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. Ohio, Materials Park, p. 226-239.
- GERMAN, R.M. 1984. *Powder Metallurgy Science*. New Jersey, Metal Powder Industries Federation, 279 p.
- GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. 2009. *A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental*. 1ª ed., São Paulo, Metallum Eventos Técnicos e Científicos, 320 p.
- HANEIJO, F.G.; PHAN, H.G. 1996. Powder metallurgy materials for AC magnetic applications. Washington, D.C.. Presented at PM TEC, 96 World Congress, June 16-21. Disponível em: <http://www.gkn.com/hoeganaes/media/Tech%20Library/44.%20Powder%20Metallurgy%20Materials%20for%20AC%20Magnetic%20Applications.pdf>. Acesso em: 07/06/2016.
- JILES, D. 1998. *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. Boca Raton, Chapman and Hall, 568 p.
- KHRAISAT, W.; NYBORG, L. 2003. Liquid phase sintering of ferrous powder by carbon and phosphorus control. *Powder Metallurgy*, 46(3):265-270. <http://dx.doi.org/10.1179/003258903225008535>
- LALL, C. 1992. *Soft Magnetism: Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding*. Princeton, Metal Powder Industries Federation, 160 p.
- LALL, C.; BAUM, L.W. 1988. High Performance Soft Magnetic Components by Powder Metallurgy and Metal Injection Molding. In: P.U. GUMMELSON; D.A. GUSTAFSON (eds.), *Modern Developments in Powder Metallurgy*. Orlando, Metal Powder Industries Federation, p. 363-389.

- MEEKER, D. 2010. *Finite Element Method Magnetics*. User's Manual, v.4.2, 160 p. Disponível em: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>. Acesso em: 09/06/2016.
- NARASIMHAM, K.; HANEJKO, F.; MARUCCI, M.L. 2008. *Growth Opportunities with Soft Magnetic Materials*. Washington, D.C., Hoeganaes Corporation, 9 p.
- NARASIMHAN, K.; HANEJKO, F.; MARUCCI, M.L. 1997. *Soft Magnetic Materials for A.C. Applications*. Disponível em: <http://www.gkn.com/hoeganaes/media/Tech%20Library/201.%20Soft%20Magnetic%20Material%20for%20A.C.%20Applications.pdf>. Acesso em: 15/02/2015.
- NASAR, S.A. 1987. *Handbook of Electric Machines*. New York, McGraw-Hill, 608 p.
- SILVA, M.C.A.; BOLFARINI, C.; KIMINAMI, C.S.; GUSSON, P.P. 2003. Magnetic Properties of Spray Formed Fe-3%wtSi, Fe-5%wtSi and Fe-6%wtSi Alloys. *Materials Science Forum*, **416(4)**:113-118.
- VERMA, N.; UPADHYAYA, A. 2007. *Effect of Phosphorus addition as sintering activator in Sinter-Hardened alloy steels*. Kanpur, Department of Materials and Metallurgical Eng, Indian Institute of Technology, 26 p.
- VAN VLACK, L.H. 1970. *Princípio de Ciência dos Materiais*. São Paulo, Edgard Blücher Ltda., 427 p.

Submetido: 01/10/2015

Aceito: 11/03/2016