

# EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO E FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO NAS PERDAS ANÔMALAS DOS AÇOS GNO<sup>1</sup>

Adriano Alex de Almeida<sup>2</sup>  
Fernando José Gomes Landgraf<sup>3</sup>  
Sebastião da Costa Paolinelli<sup>4</sup>  
Daniel Luiz Rodrigues Junior<sup>5</sup>  
Laura Spinelli Pinheiro Perassa<sup>6</sup>  
Bruno Ferreira Antunes da Silva<sup>7</sup>

## Resumo

O efeito da microestrutura e frequência de excitação nas propriedades magnéticas de duas ligas de aço GNO, com diferentes resistividades, diferentes temperaturas de recozimento final e mesma espessura, foi estudado. Os resultados mostram que a perda anômala (Pa) é proporcional ao tamanho de grão elevado ao expoente médio de 0,32. A frequência ( $f$ ) de excitação na qual os aços foram submetidos mostrou a relação diretamente proporcional entre perda histerética (Ph) e  $f$ , já a perda anômala foi proporcional a  $f^{5/3}$  o que nos leva a um TG ótimo. Os dados das curvas histeréticas foram submetidos à interpolação linear e assim foram traçadas as histereses das perdas anômalas e parasitas.

**Palavras-chave:** Aço elétrico de grão não orientado; Perdas anômalas; Tamanho de grão; Frequência de excitação.

## THE EFFECT OF GRAIN SIZE AND MAGNETIZATION FREQUENCY ON ANOMALOUS LOSS OF NON-ORIENTED ELECTRICAL STEELS

### Abstract

The effect of microstructure and magnetization frequency on the magnetic properties of two GNO steel alloys with different resistivities, different final annealing temperatures and same thickness were studied. The results show that the anomalous loss (Pa) is proportional to the grain size raised to the exponent of 0.32 Avg. The frequency ( $f$ ) of excitement in which the steels were submitted showed a directly proportional relationship between Ph and  $f$ , since the anomalous loss was proportional to  $f^{5/3}$  which leads to optimum GS. The data of hysteretic curves were subjected to interpolation thus generating the curves of anomalous and parasites loss.

**Key words:** NGOES, Anomalous Loss, Grain size; Magnetization frequency.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 68<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Mestrando, Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, USP, São Paulo, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro metalúrgico. Dr. Diretor Presidente, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT); Professor do Deto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, USP. São Paulo, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro de Materiais. Dr.. Analista Consultor, Aperam South America, Timóte, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Metalúrgico e de Materiais. Doutorando, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, USP, São Paulo, Brasil.

<sup>6</sup> Graduanda, Escola Politécnica, USP, aluna de Iniciação Científica, São Paulo, Brasil.

<sup>7</sup> Físico. Mestre em Engenharia de Materiais, IPEN/CNEN, USP, São Paulo, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O entendimento da relação entre a microestrutura e as perdas magnéticas dos aços elétricos, torna-se cada vez mais importante, impulsionada pela elevada demanda de aços com maior eficiência energética e também pelo crescente desenvolvimento dos carros híbridos.

A produção de aços elétricos corresponde a 1% da produção total de laminados.<sup>(1)</sup> Dentre estes, o aço elétrico de grão não orientado, GNO, se destaca pela sua anisotropia, sendo empregado principalmente em motores onde há variação da direção de densidade de fluxo magnético, indução.

Fatores microestruturais como o tamanho de grão, afetam incisivamente as propriedades magnéticas,<sup>(2)</sup> perda histeréticas e perdas de anômalas dos aços GNO.<sup>(3)</sup> Ao observar o efeito do TG nas Ph's e Pa's nota-se que a soma destas levará a um tamanho de grão ótimo, uma vez que a perda parasita, equacionamento proposto por J. J. Thomson em 1892,<sup>(4)</sup> independe do tamanho de grão. O tamanho de grão ótimo que minimizasse as perdas foi proposto experimentalmente com sendo aproximadamente 150  $\mu\text{m}$ .<sup>(5)</sup> Tratamento teórico com base nas perdas anômalas e no modelo de Pry e Bean, chegou ao tamanho de grão ótimo de 110  $\mu\text{m}$ .<sup>(6)</sup>

A perda anômala que é função da velocidade de movimentação das paredes de domínio<sup>(7)</sup> pode ser melhor entendida quando se pode relacioná-la às curvas de histerese da perda total e da perda histerética, levando em conta que a Ph pode ser dividida em regiões de alta e baixa indução<sup>(8)</sup> onde é possível inferir sobre a movimentação, rotação e nucleação de domínios magnéticos.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas duas ligas, L1 e L2 no total de 14 amostras, de aço GNO com mesma espessura 0,64mm. As ligas foram tratadas termicamente sobre a mesma sequência de temperatura, para crescimento de grão, as temperaturas de recozimento final e o número de identificação de cada amostra estão expostos na Tabela 1. Os dados de densidade, resistividade e teor de silício estão alocados na Tabela 2.

**Tabela 1.** Temperatura de recozimento final das ligas L1 e L2

| L1      | L2      | T.rec.f |
|---------|---------|---------|
| Amostra | Amostra | °C      |
| 1       | 8       | 860     |
| 2       | 9       | 900     |
| 3       | 10      | 940     |
| 4       | 11      | 980     |
| 5       | 12      | 1020    |
| 6       | 13      | 1060    |
| 7       | 14      | 1100    |

**Tabela 2.** Densidade e resistividade das ligas L1, L2

| Liga | Densidade         | Resistividade       | Si  |
|------|-------------------|---------------------|-----|
|      | Kg/m <sup>3</sup> | $\mu\Omega\text{m}$ | %   |
| L1   | 7700              | 43                  | 2,4 |
| L2   | 7650              | 53                  | 3,3 |

A caracterização microestrutural foi feita por meio de micrografias extraídas do plano paralelo à superfície da chapa. Após a preparação da amostra, lixamento e polimento, os Cp's foram atacados quimicamente com Nital 10%. A medida do tamanho de grão foi realizada pelo método de interceptos segundo a norma ASTM.<sup>(9)</sup> Os ensaios para caracterização das propriedades e perdas magnéticas foi realizado no quadro de Epstein no Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT. As amostras foram ensaiadas para determinação da perda total Pt, em frequência de 50 Hz, 60 Hz, 100 Hz e 150 Hz e também no regime quase estático (5 mHz) para determinar a perda histerética, todos ensaios a 1,5 T de indução.

Os dados de Ph e Pt foram tratados por interpolação linear através do software OringePro<sup>®</sup>, para que as perdas tivessem a mesma indução, de forma a possibilitar a construção da histerese da Pa. A Pp foi obtida através do equacionamento proposto por Bertotti.<sup>(10)</sup> As áreas das histereses foram mantidas exatamente como medidas pelo quadro de Epstein, portando não houve modificações nas perdas.

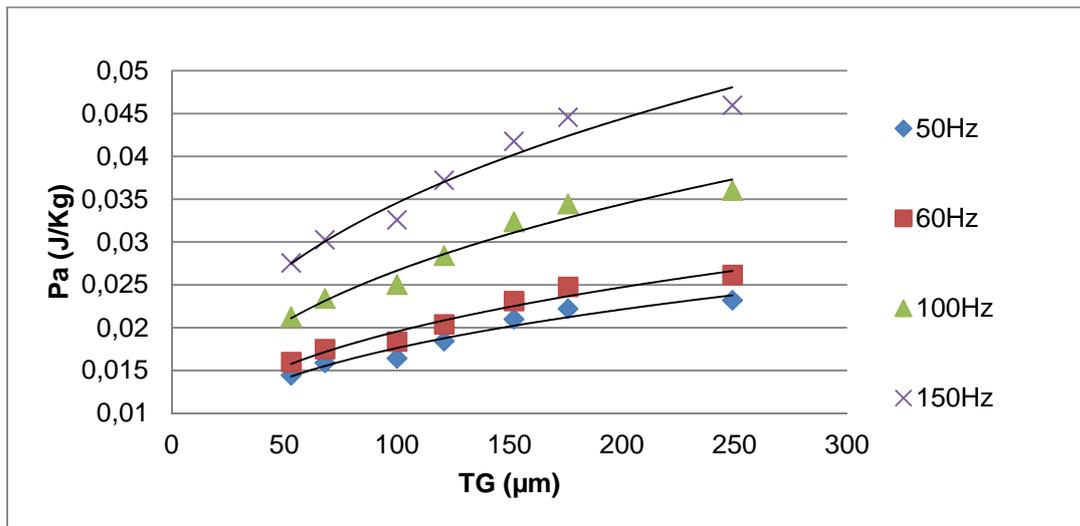
### 3 RESULTADOS

Os resultados obtidos pela medição do tamanho de grão podem ser vistos na Tabela 3. A perda anômala (J/Kg) em função do tamanho de grão ( $\mu\text{m}$ ) para as ligas L1 e L2 está disposta nas Figuras 1 e 2 respectivamente. Os pontos foram ajustados pelo melhor R<sup>2</sup>, linha de tendência de potência, indicando uma variação média da Pa em função do TG<sup>0,32</sup>.

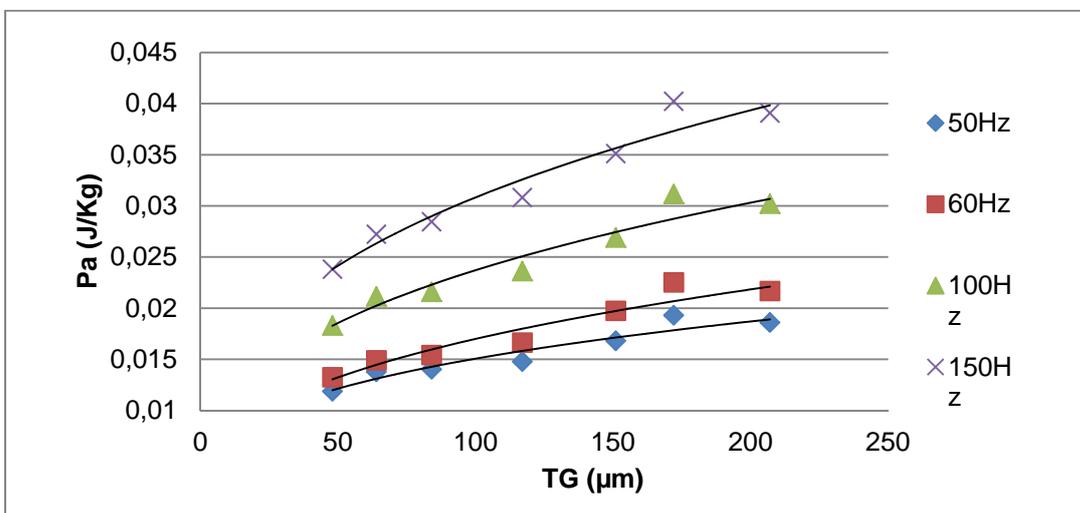
**Tabela 3.** Número das amostras de cada liga e seu respectivo tamanho de grão

| Liga L1<br>Amostra | TG<br>$\mu\text{m}$ | Liga L2<br>Amostra | TG<br>$\mu\text{m}$ |
|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 1                  | 53                  | 8                  | 48                  |
| 2                  | 68                  | 9                  | 64                  |
| 3                  | 100                 | 10                 | 84                  |
| 4                  | 121                 | 11                 | 117                 |
| 5                  | 152                 | 12                 | 151                 |
| 6                  | 176                 | 13                 | 172                 |
| 7                  | 249                 | 14                 | 207                 |

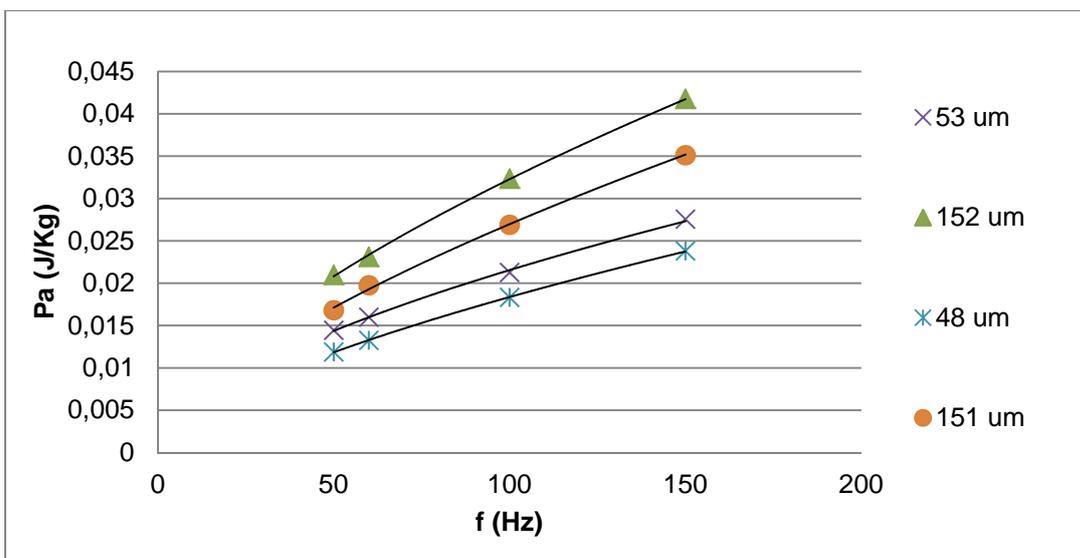
A análise da perda anômala em função da frequência é mostrada na Figura 3 onde estão expostas as curvas de duas amostras de cada liga, para a liga L1 amostras 1 e 5, liga 2 amostras 8 e 12.



**Figura 1.** Perda anômala em função do tamanho de grão para cada frequência, aço GNO da liga L1, resistividade 43,41μΩm.



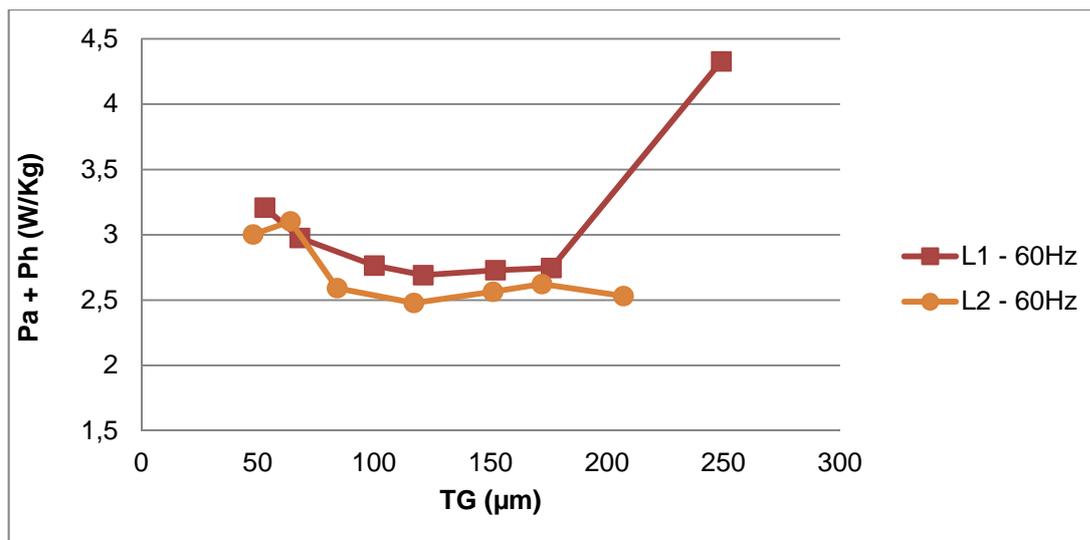
**Figura 2.** Perda anômala em função do tamanho de grão para diferentes frequências, aço GNO liga L2, resistividade 53,05 μΩm



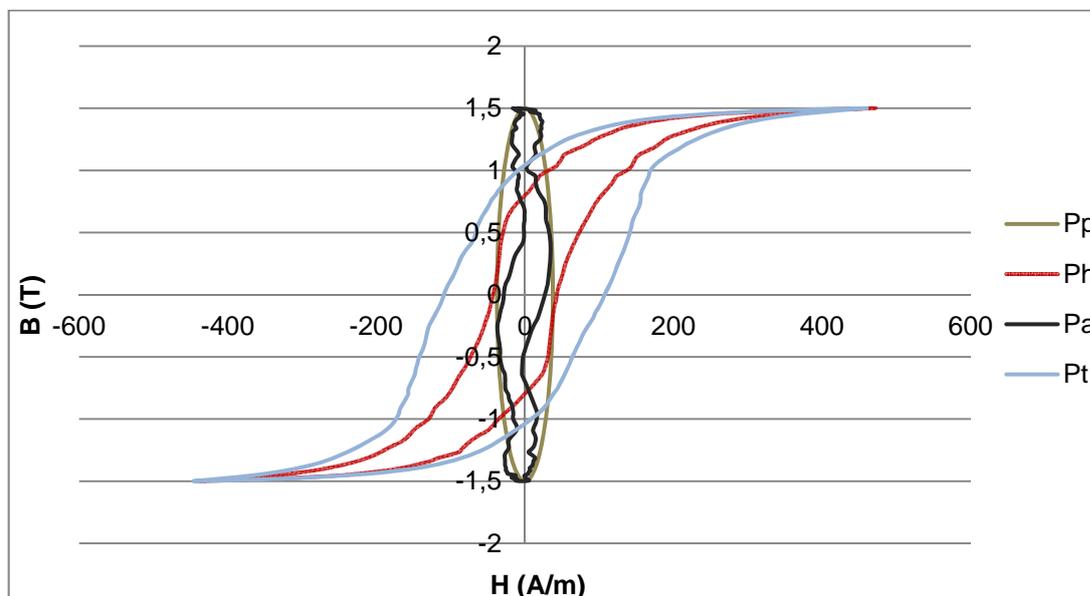
**Figura 3.** Perda anômala em função frequência, do aço GNO, sendo a liga 1 com TG de 53 e 152 μm e liga 2 com TG 48 e 151 μm.

A soma das perdas anômala e histerética são mostradas na Figura 4, como o TG ótimo não variou com a frequência, foram plotadas somente as curvas da perda a 60 Hz para as duas ligas.

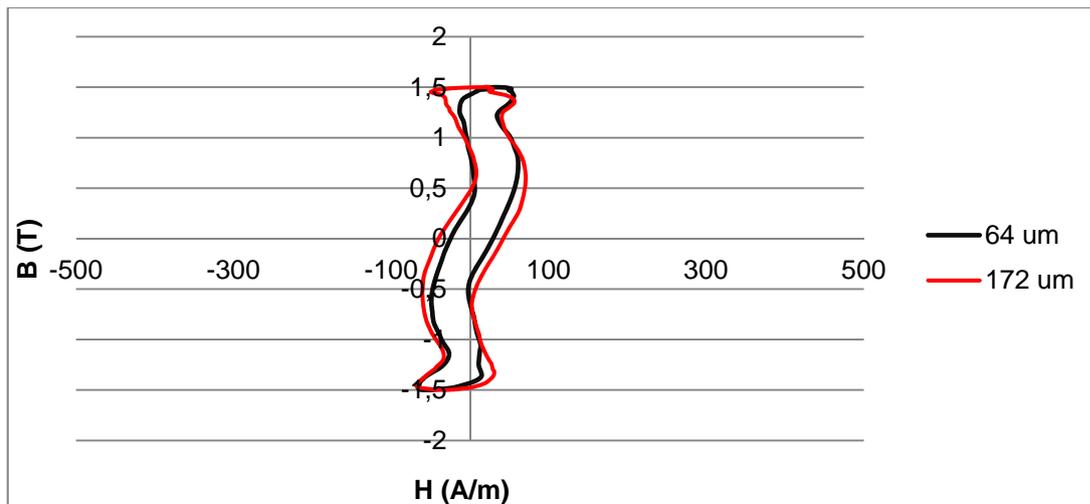
Na Figura 5 é apresentado as curvas da perda total, histerética, parasita e a histerese da perda anômala a 60 Hz 1,5 T, da amostra 8, 48  $\mu\text{m}$ , liga 2. Para comparação entre TG diferentes, a figura 6 mostra a diferença de área entre as histereses da perda anômala a 100 Hz da liga 2, com TG de 64 e 172  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.** Soma da perda anômala e perda histerética em função do tamanho de grão, a 60 Hz e 1,5 T, da liga 1 e 2.



**Figura 5.** Curvas de histereses do aço GNO amostra 8, liga L2, tamanho de grão de 53  $\mu\text{m}$ , resistividade 43,41  $\mu\Omega\text{m}$ , 60 Hz 1,5 T.



**Figura 6.** Histerese da perda anômala aço GNO 100 Hz e 1,5T, Liga 2, tamanho de grão de 64, 172  $\mu\text{m}$ .

#### 4 DISCUSSÃO

Todas as amostras apresentaram aumento do tamanho de grão após o tratamento de recozimento final, para maiores temperaturas, maiores tamanhos de grão. Com relação à perda anômala em função de TG, como visto na figura 1 e 2, a melhor linha de tendência para o comportamento da perda foi a curva de potência, com expoente médio de 0,35 tendo como resultado a  $P_a \propto TG^{0,35}$ , tal comportamento difere do demonstrado por Campos et al.<sup>(6)</sup> como sendo  $P_a \propto TG^{0,5}$ . Ao se comparar o TG de 50  $\mu\text{m}$  com  $TG > 100 \mu\text{m}$  é notável que estes sejam mais sensíveis ao aumento da frequência. A hipótese seria de que o aumento da frequência eleva a velocidade da movimentação das paredes de domínios.

O tamanho de grão que minimizasse as perdas variou conforme a resistividade, 121  $\mu\text{m}$  e 117  $\mu\text{m}$  para as Ligas 1 e 2 respectivamente (Figura 4), não houve variação do TG ótimo com  $f$ . O resultado está entre o tamanho de grão do tratamento teórico<sup>(6)</sup> que é de 110  $\mu\text{m}$  e a constatação experimental de 150  $\mu\text{m}$ .<sup>(5)</sup>

A Figura 5 mostra a histerese da perda anômala juntamente com a histerese da perda parasita, perda histerética e perda total, obtidas pela interpolação linear de uma nova indução. A perda parasita foi obtida conforme equacionamento proposto por Bertotti.<sup>(10)</sup> Pode-se inferir também que, no primeiro e terceiro quadrante tem-se o aumento da perda anômala, como já proposto<sup>(8)</sup> a perda histerética na região de baixa indução é provocada pelo movimento das paredes de domínios, o que em frequência, leva à  $P_a$ .

O aumento da perda anômala em função do aumento de TG é mostrado na Figura 6, onde se compara tamanho de grão 64, 172  $\mu\text{m}$  da liga 2 a 100 Hz e indução de 1,5 T. Entretanto para frequências maiores que 60 Hz foi observado que a histerese da perda anômala, no segundo e quarto quadrante, possui curvatura acentuada que permeia no campo de sentido oposto, o que pode ser visto entre 0,5 a 1T (-0,5 T a -1 T). O comportamento pode ser justificado pela utilização do equacionamento<sup>(10)</sup> onde se supõem que o campo aplicado seja aproximadamente igual ao campo no interior da amostra, assim uma perda parasita variando de forma uniforme.

## 5 CONCLUSÃO

Dos resultados expostos conclui-se que, o tamanho de grão ótimo experimental está próximo ao TG teórico, contudo o TG ótimo varia com a resistividade, efeito gerado pela perda anômala. Grãos maiores são mais afetados pela frequência do que grãos menores. A histerese da perda anômala pode ser utilizada para representar a parcela da perda, entretanto devido às considerações de uniformidade da perda parasita a histerese da  $P_a$  pode apresentar desvios com relação a forma.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Aperam South America ao Instituto de Tecnologia de São Paulo - IPT. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 Fischer, O.; J, Schneider. Influence of deformation process on the improvement of non-oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic materials*. v. 254-255, p. 302-06, 2003.
- 2 Hou, C. K., Effects of sulfur content and slab reheating temperature on the magnetic properties of fully processed nonoriented electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. v. 320, p. 1115-122, 2008.
- 3 Bertotti, G. et al. On the effect of grain size on magnetic losses of 3% non-oriented SiFe. *Journal de Physique Archives, Europhysics Conference on Magnetic Materials for Applications*. V. 46, p 385-86, sept/1985.
- 4 Thomson, J. J. On the heat produced by eddy currents in an iron plate exposed to an alternating magnetic field. *The Electrician*. April/1892.
- 5 Shimanaka, H., et al.; Recent development of non-oriented electrical steel sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. v. 26, p 57-64, 1982.
- 6 Campos, M. F. et al.; The optimum grain size for minimizing energy losses in iron. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. v. 301, p 94-99, 2006.
- 7 Williams, H. J. et al.; Studies of the Propagation Velocity of a Ferromagnetic Domain Boundary. *Physical Review*. V. 80, p. 1090-94, 1957.
- 8 Landgraf, F. J. G. et al.; Separating components of the hysteresis loss of non-oriented electrical steels. *Materials Science Forum*. v.302-303, p. 440-45, 1999.
- 9 *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, ASTM Standard, E 112 1996, ASTM International, West Conshohocken, 2004.
- 10 G. Bertotti.; Hysteresis in magnetism; For physicists, Materials Scientists, and engineers. Ed.1, p.400-404, 1998.