

# INTRODUÇÃO AO ESTUDO DO EFEITOS DAS INCLUSÕES NOS AÇOS ELÉTRICOS

*Fábio Cardoso Chagas*<sup>1,2</sup>  
*Fernando José Gomes Landgraf*<sup>3,4</sup>  
*Marcos Fukuhara*<sup>1</sup>  
*Marcos Luis Henrique*<sup>1</sup>  
*Taeko Yonamine*<sup>1</sup>

## **Resumo**

O objetivo deste trabalho é o estudo da influência do tamanho das inclusões nas propriedades magnéticas. São apresentados também os problemas relacionados ao processo de contagem das inclusões e as direções que podem ser tomadas em estudos futuros.

**Palavras-chave:** Aços elétricos; Perdas magnéticas; Inclusões

<sup>1</sup> Pesquisadores e Técnicos do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

<sup>2</sup> Mestrando do Programa de Pós Graduação da Escola Politécnica da USP.

<sup>3</sup> Professor convidado do Programa de Pós Graduação do Depto de Engenharia de Materiais e Metalurgia da Escola Politécnica da USP

<sup>4</sup> Pesquisador Titular do Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos do IPT.

## **INTRODUÇÃO**

Os novos aços elétricos (2) possuem ótimo desempenho em relação ao trabalho gerado. Teoricamente é possível melhorar este desempenho, minimizando o efeito das impurezas.

Parte das impurezas presentes em chapas de aço se apresentam sob a forma de inclusões. Nos aços elétricos, as inclusões acarretam um significativo aumento das perdas magnéticas(1,3,4e 5), fazendo com que mais energia elétrica seja consumida afim de suplantear tais perdas. Segundo a literatura (1), as inclusões submicroscópicas é que seriam as mais prejudiciais, todavia não se sabe até o momento, qual faixa de tamanhos é a mais prejudicial

Como no processo de fabricação dos aços elétricos é inviável eliminar completamente as impurezas, a correta definição de qual faixa de tamanhos de inclusões é a mais prejudicial possibilitaria ao fabricante ajustar, através de processos metalúrgicos normais, o tamanho de inclusões que minimizaria as perdas magnéticas. Tal informação é de grande interesse para os fabricantes de aços para motores elétricos.

O presente trabalho tem por objetivo introduzir o assunto para posteriores discussões e trabalhos futuros e descrever o trabalho efetuado e os resultados obtidos durante a vigência do projeto CNPQ n. 552354/2001-5

### **As Inclusões nos Aços Elétricos**

As inclusões nos aços elétricos são formadas basicamente por nitretos , óxidos e sulfetos. São partículas, isoladas ou não, cujo tamanho varia de menos de 1 micrômetro até no máximo 10 $\mu$ m de diâmetro. Quanto menor o tamanho, maior é a quantidade em que elas aparecem, pelo menos na faixa entre 1 e 10 $\mu$ m. Isto gera um problema na visualização ao microscópio pois as inclusões menores que 1 $\mu$ m são as mais numerosas e não podem ser observadas num microscópio óptico. Um outro problema comum ao se observar inclusões é que não se pode afirmar que o que estamos vendo ao microscópio seja realmente uma inclusão ou um artefato. Todavia é possível estabelecer uma relação entre forma e composição:

- Sulfetos se mostram alongados e/ou segmentados.
- Nitretos possuem morfologia próxima ao retângulo ou losango.
- Óxidos são circulares ou ovais.

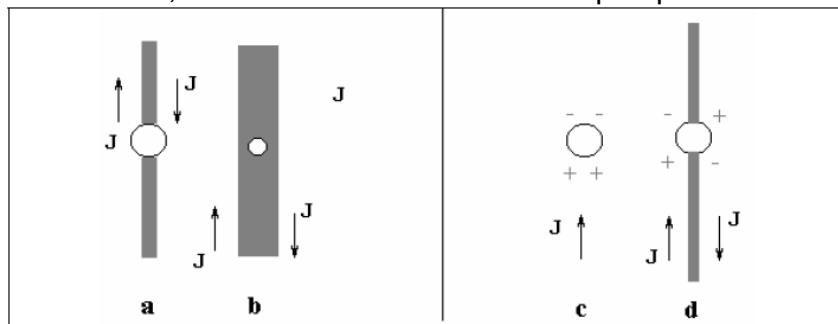
As inclusões de óxido são as mais difíceis de se diferenciar de artefatos.

### **Como as Inclusões Afetam as Propriedades Magnéticas**

As inclusões são fases não magnéticas e para o campo magnético a inclusão seria como um vazio no material. Num motor elétrico onde o campo magnético muda de direção 60 vezes por segundo, as paredes de domínio magnético acabam por se ancorar nas inclusões. Essas paredes possuem espessura da ordem de 200 nm (7) e a sua mobilidade está diretamente relacionada ao rendimento elétrico da máquina, quanto mais mobilidade, maior o

rendimento. As inclusões prejudicam essa mobilidade por ancorar as paredes. Duas explicações são mencionadas na literatura. Numa delas a inclusão representa um “furo” na parede, fazendo com que a energia total da parede diminua, estabilizando a parede de domínio na posição que inclui a inclusão (Figura 1 a e b). Essa situação resulta numa perda de rendimento pois mais energia é consumida para que a parede recupere seu movimento.

A segunda explicação baseia-se no acúmulo de energia magnetostática em torno da inclusão no interior de um domínio, em virtude da formação de pólos magnéticos e campos desmagnetizantes à eles associados. A passagem da parede de domínio pela inclusão diminui a energia magnetostática, pela redistribuição dos pólos (Figura 1 c e d). Como a energia total diminui, essa é uma posição metaestável da parede, ancorando-a. Para mover a parede a ponto dela separar-se da inclusão, é necessário aumentar o campo aplicado.



**Figura 1.** As figuras (a) e (b) mostram que a energia total da parede é reduzida. Em (c) e (d) é mostrado a reconfiguração do polos magnéticos quando a parede ancora numa inclusão. A energia Magnetostática é menor na situação (d) do que em (c).

Uma ótima imagem que demonstra o efeito das inclusões em paredes de domínio foi obtida por Geiss (8), numa sequência de vídeo mostrando uma parede ancorando em inclusões.

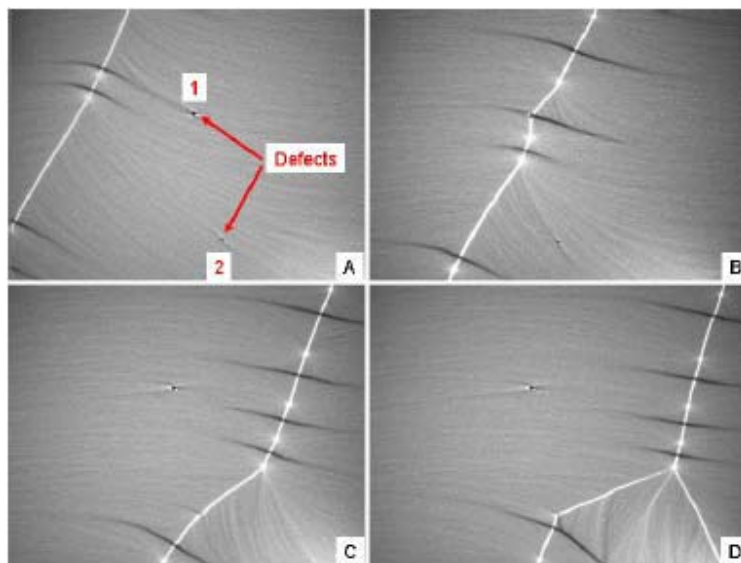


Fig. 1.1) Sequência de vídeo obtida por Geiss onde vê-se claramente a parede ancorando sobre o defeito 1 no quadro B. Nos quadros C e D a parede ancora permanentemente no defeito 2 apesar de ele ser bem menor.

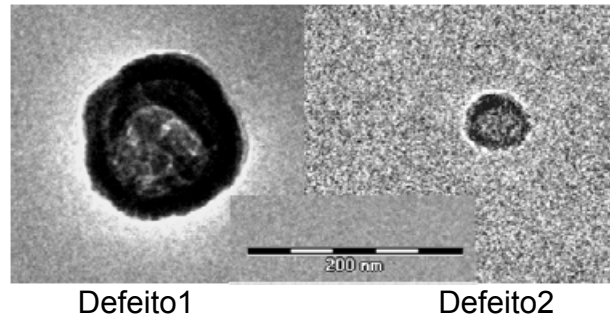


Fig. 1.2) Aspecto dos defeitos. Note que o defeito 2 é bem menor que o 1.

Vemos claramente que as imagens de Geiss confirmam a teoria de que as inclusões submicroscópicas é que seriam as mais prejudiciais.

## Materiais e Métodos

Quando diferentes lotes de um aço elétrico de um fabricante apresenta variações nas propriedades magnéticas, é difícil se levar em consideração o efeito das inclusões. Somente quando as outras variáveis microestruturais são constantes (tamanho de grão, densidade de discordâncias, composição química, etc) é que podemos avaliar, por comparação, o efeito das inclusões nas propriedades magnéticas.

Conseguir amostras com todas as variáveis iguais, só variando a distribuição de inclusões, é extremamente difícil. O Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos do IPT recebeu dois conjuntos de amostras de fabricantes diferentes para tal avaliação a saber:

**Fabricante A** – Duas amostras, em forma de chapas, que passaram pelo mesmo processo de fabricação, e que apresentam grande diferença de propriedades entre si.

**Fabricante B** – Duas amostras, em forma de chapas, sendo que uma delas passou por um novo processo na etapa de refino do metal líquido implementado na empresa (processo RH). Todo resto do processo foi semelhante.

Nos dois conjuntos, as chapas de cada fabricante possuem aproximadamente as mesmas características que eram relevantes para as propriedades magnéticas, com a exceção das inclusões.

A preparação de amostras para contagem de inclusões é descrita a seguir:

- Amostras das chapas foram cortadas e embutidas na secção longitudinal (paralela em relação à direção de laminação). Em seguida foram lixadas nas lixas 300, 400, 600 e 1000 respectivamente. Durante o lixamento nas lixas 600 e 1000 teve-se o cuidado de girar a amostra aleatoriamente durante o lixamento. Para o lixamento na lixa 1000, só foram usadas lixas novas. A observação no microscópio começou durante o último lixamento e algumas fotos das extremidades foram

tiradas para comparação e verificação para o caso da amostra se oxidar. Esse mesmo procedimento foi tomado durante todo o polimento. O polimento foi efetuado usando-se politrizes manuais com pastas de diamante policristalino de 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$ , com pano STRUERS tipo DP-DUR.

• Tomando como base a norma ASTM E 1245 que trata da preparação de amostras para contagem de inclusões, a contagem foi feita em no mínimo 20 campos consecutivos com um aumento de 250x (0,31mm<sup>2</sup> de área). Tal procedimento é cansativo para a contagem de várias amostras diretamente no microscópio, o que termina por afetar na precisão dos resultados. Para contornar o problema, usou-se um analisador de imagens configurado para capturar a imagem do microscópio num computador com a máxima resolução possível. Essas imagens foram gravadas. A contagem foi então efetuada nas imagens por um software analisador LECO IA32. É importante ressaltar algumas informações quanto à preparação de amostras de aço elétrico para contagem de inclusões:

1-) A contagem deve ser feita imediatamente após a preparação metalográfica. A oxidação aparece cerca de 1 hora após o polimento.

2-) Durante o polimento verificar periodicamente se não houve oxidação. Quando ocorre oxidação aparecem muitas inclusões arredondadas. Manter sempre os panos abrasivos observando se há pasta metalográfica impregnada suficiente. Durante polimento deve-se pressionar muito levemente a amostra para minimizar o arrancamento das inclusões.

3-) Dependendo da amostra é conveniente apenas um rápido polimento na politriz de 3 $\mu\text{m}$ , e 1 $\mu\text{m}$  pois o que se observou é que nelas a superfície é abaulada dificultando o foco no microscópio.

4-) Manchas de secagem são um sério problema na contagem de inclusões. Para evitar o uso do secador a ar quente, adotou-se uma politriz com pano sem pasta. Aplicou-se o álcool no pano e se procedeu o "polimento" até a secagem da amostra.

5-) As amostras foram então fotografadas em um microscópio Zeiss Neophot com câmera de vídeo acoplada. Foram 150 fotos de cada amostra do Fabricante A e 50 fotos de cada amostra do Fabricante B. O aumento foi de 250x em todas micrografias.

6-) A contagem das inclusões foi feita manualmente sobre as imagens na tela do computador usando o software auxiliar de contagem.

7-) Cada contagem foi então (usando a estereologia) transformada em fração volumétrica e comparada com a fração volumétrica obtida a partir da análise de composição química. Durante a contagem foi adotado 4 faixas de tamanho para facilitar as contagens: De 1 a 2 $\mu\text{m}$ , 2 a 4 $\mu\text{m}$ , 4 a 6 $\mu\text{m}$  e maiores que 6 $\mu\text{m}$ . Para o cálculo da fração volumétrica de cada faixa de tamanhos, foi adotado um diâmetro que é uma média ponderada dos diâmetros de inclusões encontrados em cada faixa.

## Medidas Magnéticas

Os elementos formadores de inclusões nos aços elétricos comerciais são: Nitrogênio (forma AlN), Enxofre (forma MnS) e Oxigênio (forma  $Al_2O_3$ ).

As quantidades de elementos que formam inclusões, obtidas por análise química, de cada uma das chapas é descrita a seguir na Tabela 1:

Tabela 1: Valores obtidos da determinação da composição química.

	Amostra	Nitrogênio(ppm)	Enxofre (ppm)	Oxigênio (ppm)	F. Vol. (ppm)
Fabricante A	2936	48	32	30	622
	2938	59	32	30	699
Fabricante B	3927	48	96	35	977
	3935	38	77	23	760

O oxigênio obtido das amostras do Fabricante A é o oxigênio teórico e não foi analisado.

Os valores das contagens de inclusões obtidas são descritos na Tabela 2. As inclusões foram classificadas com base no diâmetro das inclusões divididas em 4 faixas (1 a 2 $\mu$ m, 2 a 4 $\mu$ m, 4 a 6 $\mu$ m e diâmetros maiores que 6).

Tabela 2: Valores das contagens de distribuição de inclusões ( em Inclusões/mm<sup>2</sup> )

	Amostra	1 a 2 $\mu$ m	2 a 4 $\mu$ m	4 a 6 $\mu$ m	>6 $\mu$ m
Fabricante A	2936	102	34	13	3
	2938	75	45	26	10
Fabricante B	3927	856	80	9	3
	3935	29	10	3	1

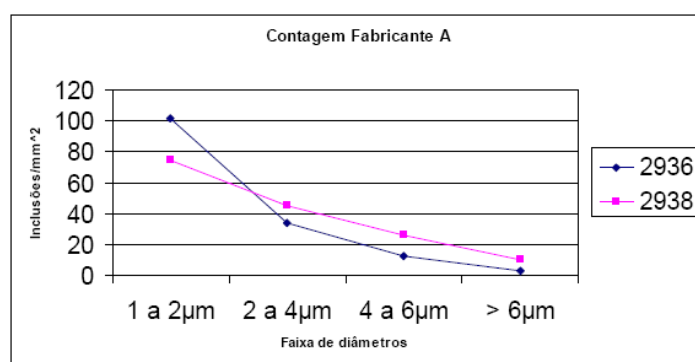


Gráfico 1 : Distribuição de inclusões das amostras do fabricante A

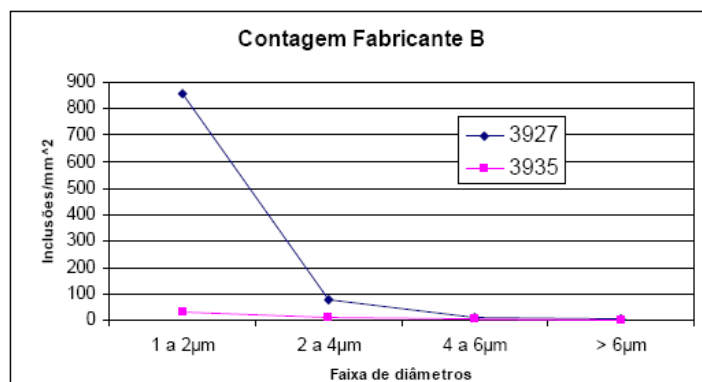


Gráfico 2: Distribuição de inclusões das amostras do fabricante B

Foram realizadas análises de perdas histeréticas em Quadro de Epstein. As medidas foram efetuadas à indução máxima de 1,5 Tesla a 5 mHz.

Os valores das perdas histeréticas são mostrados na Tabela 3. A perda histerética é um dos componentes da perda magnética total (6). A perda histerética é a mais afetada pela presença das inclusões tornando-a um parâmetro para a comparação com as distribuições de inclusões de cada amostra.

Tabela 3: Perdas histeréticas das amostra analisadas

Amostra	Perdas Histeréticas a 60 Hz (em W/kg)
2936	2,43
2938	2,64
3927	2,53
3935	1,67

A Tabela 4 compara a fração volumétrica calculada a partir dos teores dos elementos formadores de inclusão com a fração volumétrica calculada a partir da contagem das inclusões, adotando uma média ponderada para o diâmetro médio de cada faixa.

Tabela 4: Comparação entre frações volumétricas obtidas por análise química e a obtidas pela contagem de inclusões (perdas Histeréticas a 60Hz-W/kg).

	Amostra	Fração Vol. C. Química	Fração Vol. Contagem	Diferença %	Perdas Histeréticas
Fabricante A	2936	622	497	12,1	2,431
	2938	699	904	22,8 (acima)	2,638
Fabricante B	3927	977	1333	26,7 (acima)	2,529
	3935	760	137	453,1	1,672

Pode-se notar pelas diferenças percentuais que quanto maior o número de inclusões na faixa de 1 a 2 µm, maior o erro percentual. Isto é uma clara indicação da incerteza associada ao procedimento de contagem de inclusões. As inclusões menores que 1µm, que são a grande maioria, escapam ao microscópio óptico. Analisando a fração volumétrica obtida a partir da contagem e as perdas, podemos afirmar as perdas estão em acordo com a contagem, lembrando sempre

que o teor de oxigênio adotado para as amostras do Fabricante A é teórica e que foram tomadas as médias ponderadas dos diâmetros de cada faixa de tamanho para o cálculo da fração volumétrica a partir das contagens, tendo por isso, erros associados (não quantificados neste trabalho).

Devido à estes erros os resultados não são conclusivos. Todavia podemos observar que as perdas histeréticas estão associadas ao grau de pureza do material, como era de se esperar. Também, as perdas histeréticas parecem ser mais acentuadas quanto mais inclusões na faixa de 1 a 2  $\mu\text{m}$  (sugerindo assim um grande número de inclusões sub-microscópicas), como observado nas distribuições de inclusões das amostras do fabricante A, que estão em concordância com as teorias mais recentes.

Da relação entre a distribuição de inclusões e os valores de perda histerética do fabricante B, nota-se que a maior pureza proveniente do refino RH da amostra 3935, diminuiu de maneira significativa sua perda histerética. A diferença percentual entre a fração volumétrica da composição química e da contagem é significativa, e que assim podemos concluir haver um grande número de inclusões sub-microscópicas que não foram possíveis de contar. Ao que tudo indica, as inclusões submicroscópicas menores que 1 $\mu\text{m}$  parecem que não são as mais prejudiciais. Por outro lado, não podemos concluir nada sobre as outras faixas de tamanho.

É conveniente que se faça no futuro, uma análise onde a contagem seja feita em micrografias com aumentos maiores para uma melhor estatística da distribuição das inclusões, que se adote faixas de tamanho mais finas e que se leve em conta as distâncias médias entre as inclusões.

A seguir estão alguns exemplos das micrografias de cada amostra analisada.



Fig.1 Amostra 2936 – Fabricante A  
(250x)



Fig.2 Amostra 2938 – Fabricante A  
(250x)





Fig.4 Amostra 3927 – Fabricante B  
(250x)



Fig.5 Amostra 3935 – Fabricante B  
(250x)

### Conclusões

1-) Confirmou-se que a pureza do material é determinante no valor das perdas histeréticas. Quanto menos inclusões, menor a perda.

2-) O procedimento adotado apesar de prático, não é conclusivo e precisa ser melhorado.

3-) Deve-se continuar o estudo procurando analisar também as distância entre as inclusões.

4-) Nos casos analisados, as amostras com maior número de inclusões na faixa entre 1 e 2 tiveram maiores perdas. Não se dispõe de informações sobre as inclusões submicroscópicas.

### Referências

1. DIJKSTRA, L. J.; WERT, C. Effect of inclusions on Coercive Force of Iron. *Physical Review*, v.79, n. 6, p. 979-985 1950

2. SHIMANAKA, H; MATSUMURA, K; IRIE, T; NAKAMURA, H. A New Non-Oriented Si-Steel with texture of {100}. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v.19, p. 63-64 1980

3. YONAMINE, T.; HENRIQUE, M., L.; TAKANOHASHI, R.; CHAGAS, F. C.; WOLGIEN, V.; ZWIRMAN, N.; SERNA, M.; LIMA, N. B.; VILELA, J. M. C.; ANDRADE, M. S.; LANDGRAF, F. J. G. Anisotropia das propriedades magnéticas de Aços Semi-Processados, p. 913-927, 57º Congresso da ABM, CD-ROM, 2002

4. YESEN, T. D. PITTSBURGH E. Effect of the impurities on ferromagnetism. *Conference of Ferromagnetism*, p. 358-368 1932.

5. STEPHENSON, E. T. The effect of Sulfide and Oxide Inclusions on the Core Loss and Permeability of Motor Lamination Steels. *Soft and Hard Magnetic Mat. With applications*, p. 55-62 1986.

6. LANDGRAF, F. J. G., CAMPOS, M. F., TEIXEIRA, J. T. Modelamento das perdas magnéticas de aços elétricos totalmente processados. *Contribuição Técnica apresentada no 53º. Anual da ABM 1998.*

7. PODURETS, K. M., SHILSTEIN, S.S. Measurement of the domain wall thickness in silicon iron using the adiabatic spin-flip effect on neutron refraction. Physica B 297 (2001) pgs. 263-267

8. GEISS, R. H., Micrometer-Scale Reliability: Nanomagnetodynamic Imaging of Magnetic Domain Walls. NIST Magnetic Sensor Competence Program 2004-2009 (2004).

## **Introduction to study of the effects of the inclusions on electrical steel magnetic properties**

### **ABSTRACT**

The aim of this work is to determine what inclusions size are most harmful to magnetic properties. The problems associate with quantitative measurements made results unconvincing but these indicate some new study directions.

Key-words: Electrical Steels, Magnetic losses, Inclusions.