

EFEITO DO POTENCIAL DE OXIGÊNIO NA OXIDAÇÃO SUBSUPERFICIAL E SUAS INFLUÊNCIAS NAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE AÇOS ELÉTRICOS APÓS O RECOZIMENTO FINAL¹

*Ellen Regina Giroto²
Fernando José Gomes Landgraf³*

Resumo

Identificar a influência do ponto de orvalho na formação de uma camada interna de óxidos e quantificar seus efeitos deletérios nas propriedades magnéticas. A otimização dessa camada minimiza os valores de perdas e maximiza a permeabilidade magnética.

Palavras-chave: Descarboxinação; Aço elétrico; Oxidação.

OXYGEN POTENCIAL EFFECTS ON THE OXIDATION SUBLAYER AND ITS INFLUENCE ON THE MAGNETIC PROPERTIES OF ELETRIC STEELS AFTER THE FINAL ANNEALING HEAT TREATMENT¹

Abstract

Identify the dew point influence in forming an internal oxides layer and quantify its deleterious effects on magnetic properties. The optimization of this layer can minimize the core losses and maximize the magnetic permeability

Key words: Decarburizing; Electrical steel; Oxidation.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheira Metalurgista; Engenheira de Processos da SEW Eurodrive, Guarulhos, SP*

³ *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP)*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Recozimento

O recozimento de um aço elétrico semiprocessado é uma etapa fundamental para melhorar suas propriedades magnéticas, devido ao crescimento do grão, eliminação das tensões residuais e descarbonetação (redução do teor de carbono)

O tratamento é realizado sob uma mistura gasosa composta por H_2 , N_2 e $H_2O_{(v)}$, em uma faixa de temperatura de 750 °C a 900 °C, com uma pressão parcial de vapor d'água e hidrogênio controlado pela relação p_{H_2O}/p_{H_2} (ponto de orvalho).

O uso inadequado do teor de umidade na prática industrial pode resultar na formação de uma camada de óxidos subsuperficial, a qual tem influência significativa em suas propriedades magnéticas, o que afeta diretamente no desempenho das máquinas elétricas.

1.2 Oxidação Subsuperficial

A degradação das propriedades magnéticas é observada durante o estágio final da descarbonetação prolongada e é causada pela oxidação interna, a qual ocorre pela formação de uma camada subsuperficial de óxidos no aço. A oxidação interna começa após certo tempo de patamar seguinte a descarbonetação.^(1,2)

Essa camada de óxidos de espessura relativamente uniforme dentro dos grãos, com penetração adicional próxima aos contornos de grão, está geralmente relacionada com o emprego de uma pressão parcial de umidade na mistura gasosa suficientemente capaz de oxidar os elementos de liga de maior afinidade com o oxigênio, como no caso o alumínio e o silício. Por esta razão, a superfície de um aço silício pode ser facilmente oxidada, até mesmo quando baixos pontos de orvalho forem utilizados.⁽³⁾

Uma estimativa grosseira, assumindo valores de atividade química de silício de 0,002 vezes o teor de silício resultam em pressões parciais de umidade correspondentes a um ponto de orvalho de -70°C.

A literatura reporta a presença de camadas de 2 μm a 30 μm de espessura por face, ou seja, até mais de 10% da espessura típica dessas chapas, que é de 0,5 mm.

Os carbonetos podem apresentar diferentes morfologias. Na morfologia mais comumente encontrada, as partículas de óxido são usualmente esféricas e sua composição pode ser alterada com o aumento do ponto de orvalho de quase 100% sílica para 100% fayalita.⁽⁴⁾

1.3 Influências nas Propriedades Magnéticas

Geralmente quando se aplica um tempo excessivo e/ou alto potencial de oxigênio, tem-se a formação de uma subcamada de óxidos. Na maioria dos casos, tanto as perdas magnéticas quanto a permeabilidade variam quase que parabolicamente com o logaritmo do tempo de patamar.⁽³⁾

Estudos prévios afirmam que cada micron de espessura dessa subcamada diminui a permeabilidade relativa em 50 unidades a 1,5T.⁽⁵⁾ Quando as perdas magnéticas a 1,5T e 60 Hz foram estudadas em amostras de 0,64 mm e teores de silício de 0,5% a 2,5%, notou-se que cada micrometro de espessura de subcamada oxidada aumenta a perda em 0,02 W/kg.⁽⁶⁾

Esse aumento da perda magnética com a oxidação interna é provavelmente causado pelo efeito das inclusões não-metálicas no movimento das paredes de domínio magnético.

1.4 O Efeito do Antimônio na Oxidação Interna

Como alternativa, para tentar solucionar o problema da oxidação interna, atualmente se pratica adições de elementos de liga que bloqueiem a difusão do oxigênio pelos contornos de grão do metal. Esses elementos são ativos na superfície e devem diminuir a taxa de formação da subcamada, pois afetam a difusividade do oxigênio pelos contornos de grão. De inúmeros elementos ativadores de superfície, o antimônio foi escolhido por ser um elemento que quando adicionado promoveria também uma textura magneticamente favorável.

Estudos mostram que adições de 0,08% Sb em aços elétricos contendo Si-Al, resultam não apenas em melhoria da textura magnética, mas também suprimam a oxidação interna e conseqüentemente melhorem as propriedades magnéticas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse trabalho foram estudados três aços elétricos com teores de silício diferentes, onde os valores determinados para as composições químicas estão listados na Tabela 1. Todos os aços objetos desse estudo são utilizados para a confecção de motores elétricos.

Tabela 1 – Composições químicas dos aços estudados (% em massa)

Amostra	C	Mn	Si	P	S	Al	Sb	Cu
A	0,0035	0,5395	2,4404	0,0183	0,0005	0,0075	0,0023	0,0081
B	0,0069	0,5019	0,6663	0,0338	0,0041	0,4793	0,0027	0,0140
C	0,0033	0,5513	0,9825	0,0173	0,0048	0,5793	0,0510	0,0130

Foram utilizadas lâminas cortadas nas direções paralelas e longitudinais à direção de laminação e transversais de 30 x 305 mm para o três aços estudados. Um conjunto de 16 lâminas, sendo 8 lâminas longitudinais e 8 lâminas transversais de cada amostra foi submetido a sucessivos tratamentos térmicos e após cada um deles foi realizado o Ensaio de Epstein para verificação das perdas magnéticas e permeabilidade. Nesse ensaio, as perdas foram avaliadas para uma faixa de frequência entre 8 e 80 Hz.

Algumas lâminas foram separadas e furadas e acompanharam toda a seqüência de tratamentos com as amostras para o ensaio de perdas magnéticas. As mesmas foram pesadas em balança analítica antes e após cada tratamento, para se determinar se o fenômeno de ganho de massa devido à oxidação estava ocorrendo a cada etapa.

A análise da microestrutura em secção transversal das amostras foi realizada através da microscopia ótica, na qual foi possível evidenciar a formação da camada de óxidos a cada tratamento realizado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As amostras sofreram sucessivos e subseqüentes tratamentos térmicos em forno contínuo, a temperatura constante e pontos de orvalhos empregados na prática industrial. A Tabela 2 detalha cada tratamento realizado.

Tabela 2 – Detalhamento da seqüência de tratamento e variáveis de processo para as amostras estudadas

Amostra	Tratamento	Ponto de orvalho (°C)
A B C	1° Tratamento	22
	2° Tratamento	26
	3° Tratamento	14
	4° Tratamento	18
	5° Tratamento	19
	6° Tratamento	17

Os resultados da evolução dos valores de perda totais e permeabilidade magnética das amostras após os sucessivos recozimentos medidos em ensaio de Epstein foram plotados em gráficos, conforme ilustram as Figuras 1, 2 e 3. Com os resultados de perdas magnéticas de cada amostra apresentados por essas figuras, é possível notar que quanto maior o tempo de exposição das amostras à atmosfera de tratamento, maiores são os valores de perda magnética e menores são os valores de permeabilidade relativa.

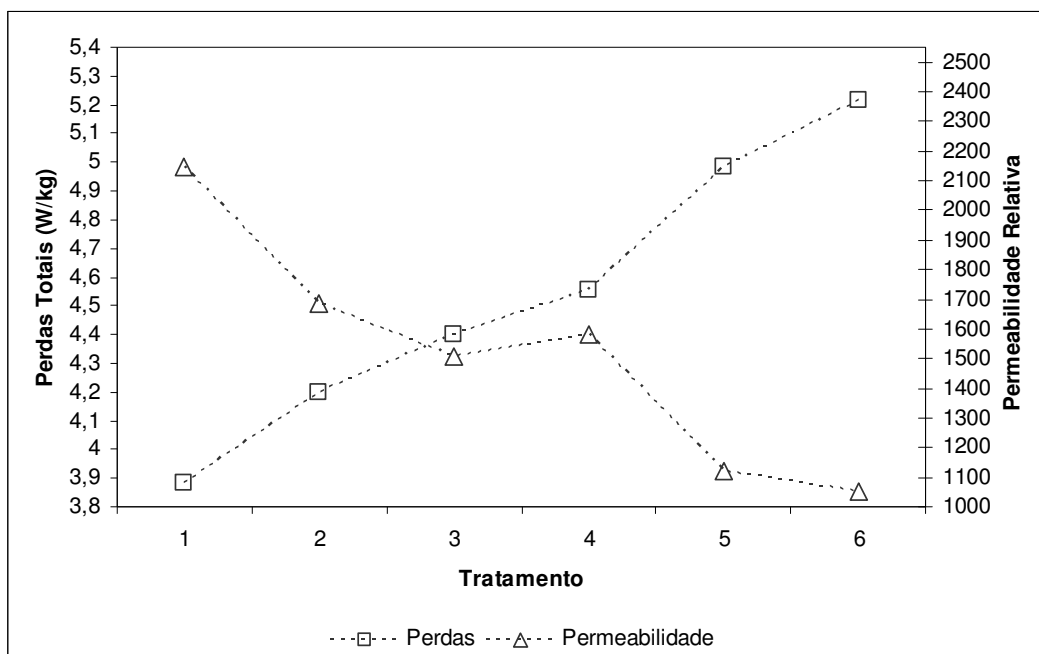


Figura 1 - Evolução das Perdas Totais e Permeabilidade Magnética (1,5T/60Hz) da amostra A após sucessivos tratamentos térmicos.

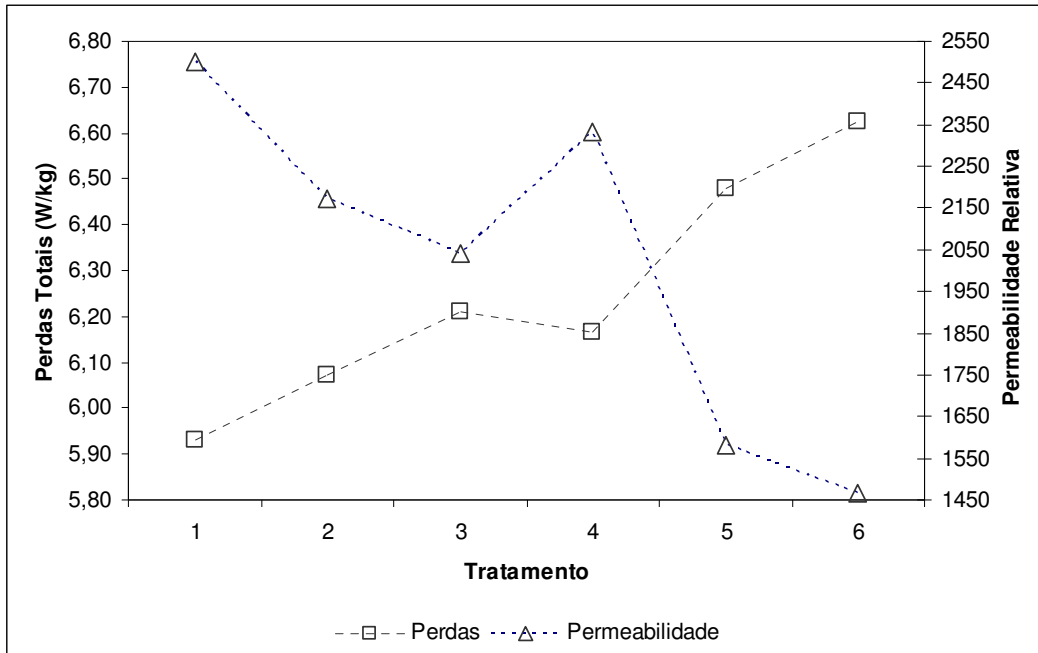


Figura 2 - Evolução das Perdas Totais e Permeabilidade Magnética (1,5T/60Hz) da amostra B após sucessivos tratamentos térmicos.

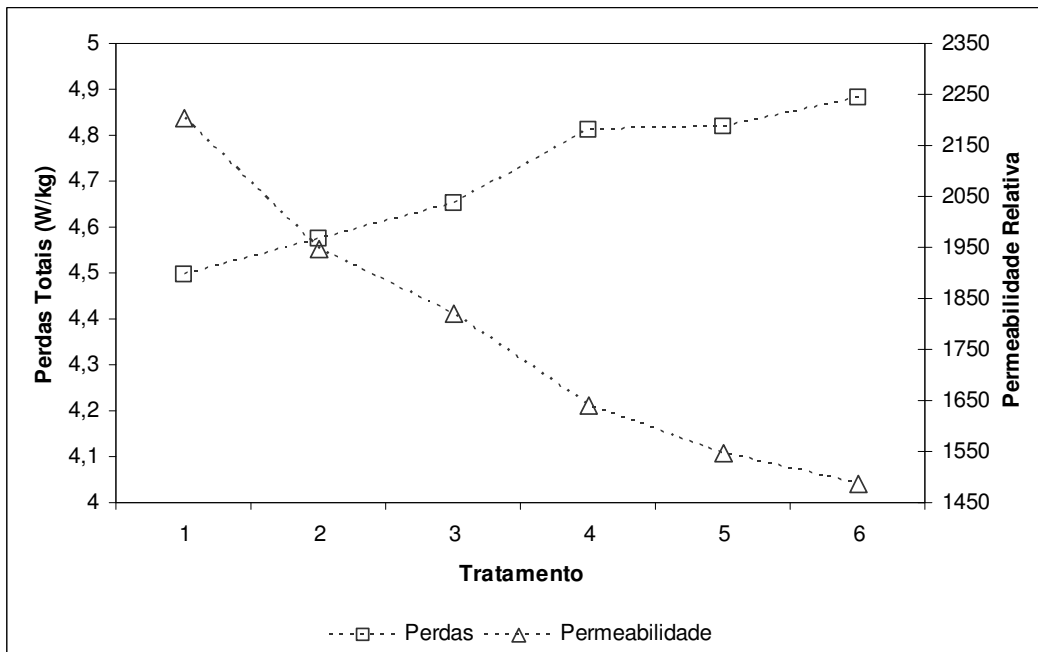


Figura 3 - Evolução das Perdas Totais e Permeabilidade Magnética (1,5T/60Hz) da amostra C após sucessivos tratamentos térmicos.

Os valores de perdas magnéticas foram separados em três componentes: perdas histeréticas (P_h), as perdas parasitas (P_p) e as perdas anômalas (P_a). As perdas histeréticas foram obtidas pelo método da extrapolação dos valores de perdas para frequência zero, as perdas parasitas foram calculadas pelo método clássico e as perdas anômalas foram obtidas por diferença.⁽⁷⁾ Sabendo que a espessura e a resistividade têm influência sobre as perdas parasitas enquanto que

as perdas histeréticas e anômalas são fortemente influenciadas pela microestrutura, a Figura 4 detalha a evolução dos valores de perda histerética após sucessivos tratamentos térmicos para cada amostra. O aumento da perda histerética após cada tratamento térmico pode estar relacionado com a formação e espessamento da camada de óxidos, objeto desse trabalho.

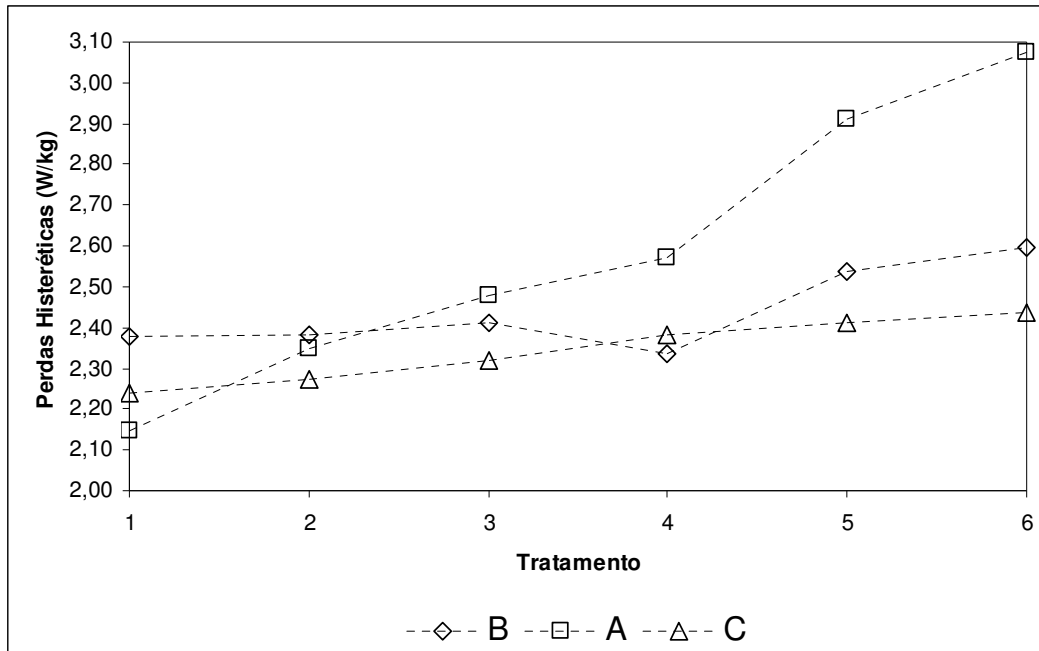


Figura 4 - Evolução das Perdas Histeréticas das três amostras após sucessivos tratamentos térmicos.

Com o objetivo de comprovar a formação da camada de óxidos, o ensaio de ganho de massa foi realizado nas três amostras conforme descrito no item 2. Após seis tratamentos térmicos sucessivos, os resultados evidenciaram que todas as amostras apresentaram ganho de massa representativo, conforme indicado na Figura 5.

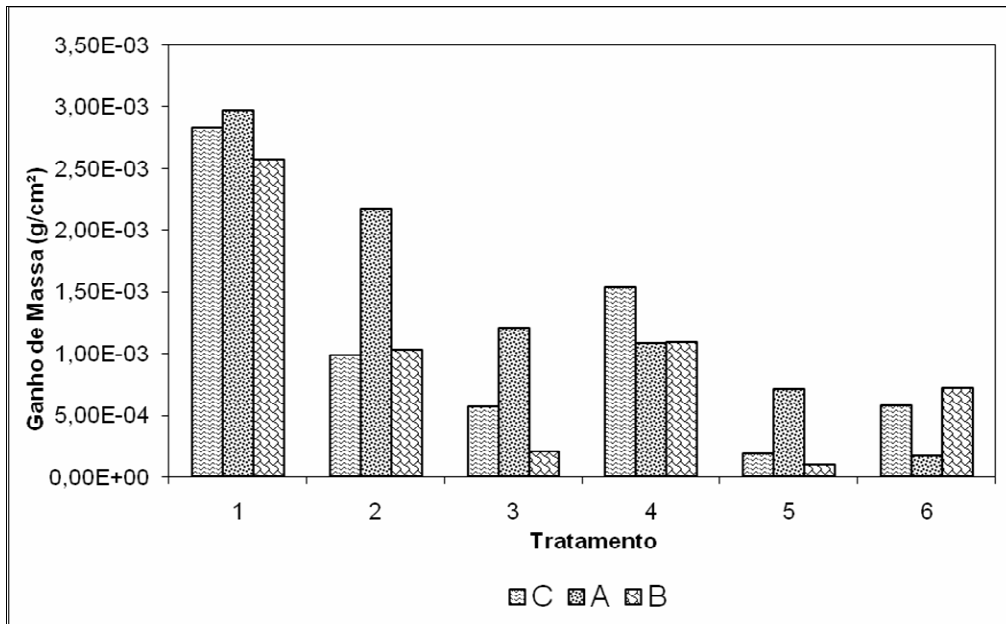


Figura 5 - Ganha de massa de cada amostra após o término de cada tratamento térmico.

A Figura 6 relaciona o ganho de massa total com a somatória dos teores de silício e alumínio das amostras; quanto maior for essa somatória, maior será o ganho de massa durante os tratamentos. Pode-se previamente concluir que quanto maior a somatória, maior deverá ser a subcamada de óxidos formada e maiores serão os efeitos deletérios nas propriedades magnéticas.

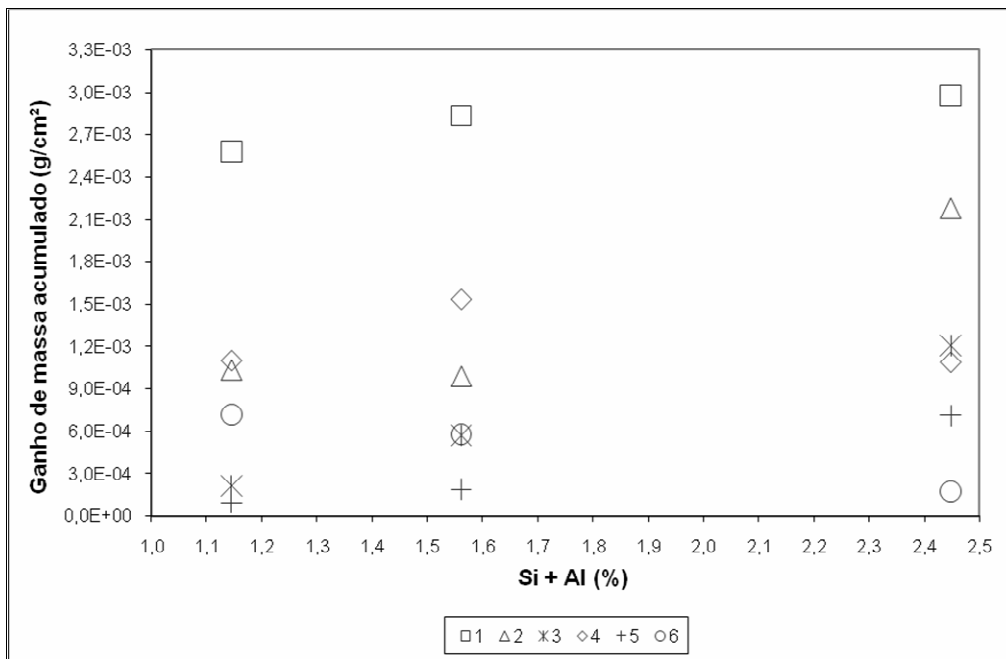


Figura 6 – Relação do ganho de massa acumulado e somatória do teor de silício e alumínio das amostras, após o término de sucessivos tratamentos térmicos.

A Figura 7 relaciona o ganho de massa total com a perda histerética de cada amostra, no qual se pode notar a mesma tendência que a observada na Figura 6, ou

seja, as amostras que obtiveram maior ganho de massa apresentaram perdas histeréticas maiores.

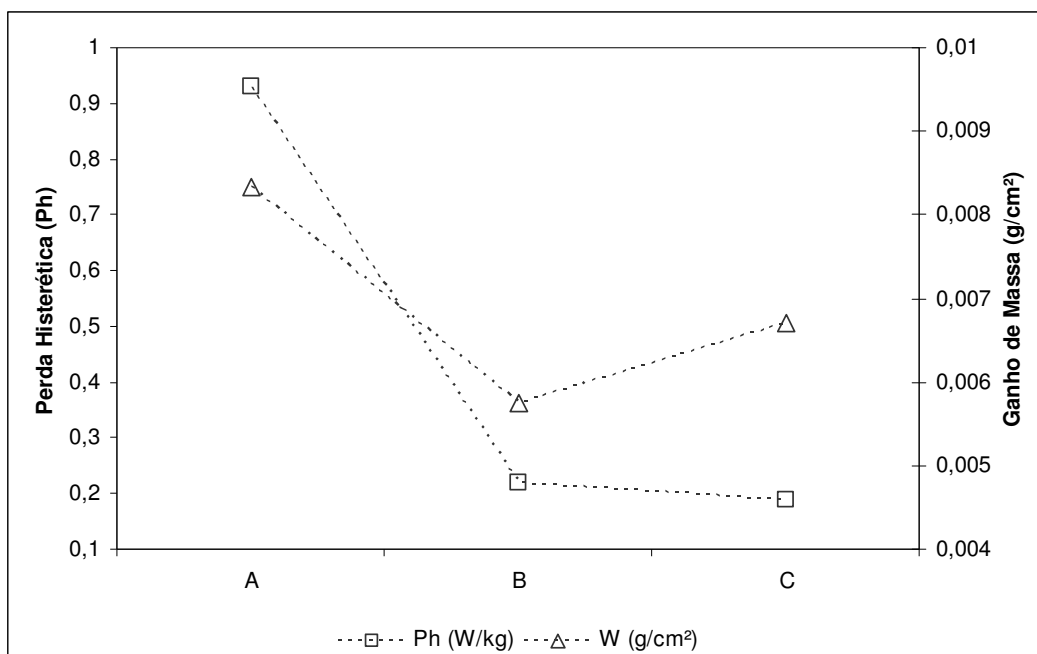


Figura 7 – Relação do ganho de massa total e perda histerética das amostras após o término de sucessivos tratamentos térmicos.

A formação da subcamada de óxidos foi evidenciada após os tratamentos realizados, através de análise da secção transversal das amostras com o auxílio de microscópio óptico, como detalha a Figura 8. Porém, com esse recurso, não foi possível medir com precisão a espessura da subcamada.

Para uma análise mais precisa sobre a influência de cada micrometro de espessura de óxidos nas propriedades magnéticas, bem como definir a morfologia da subcamada formada, é necessário realizar tal análise em microscópio eletrônico de varredura, o que não foi possível nesse estudo.

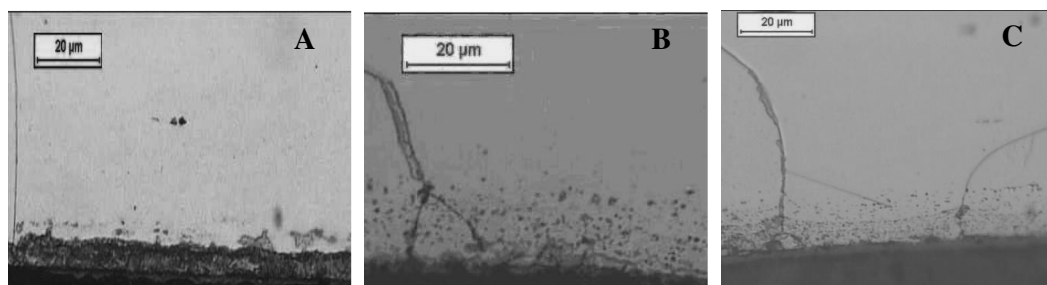


Figura 8 – A microestrutura evidencia a formação da subcamada de óxidos. Análise sob microscópio óptico com aumento de 1000 vezes. Para uma melhor caracterização da subcamada, as amostras sofreram ataque químico com Nital 3%.

4 CONCLUSÃO

Sucessivos recozimentos aumentam significativamente as perdas magnéticas nos três aços elétricos estudados e mais significativamente no aço elétrico de composição química A.

O aço elétrico C apesar de possuir teores de Si + Al maior do que o aço B apresentou um aumento de perdas magnéticas similar, o que deve estar relacionado com a presença de Sb em sua composição química.

As medidas de espessura das subcamadas oxidadas não explicam sozinho o aumento das perdas magnéticas. É possível que uma oxidação mais fina, não visível no microscópio óptico possa estar aumentando as perdas magnéticas após sucessivos tratamentos térmicos.

A degradação das propriedades magnéticas, ou seja, aumento das perdas e diminuição da permeabilidade relativa ocorreu nas três amostras após cada tratamento realizado e mais intensamente no aço elétrico X.

Todos os aços apresentaram ganho de massa após os tratamentos, porém mais intensamente na amostra A, devido à mesma possuir teores de Si + Al maiores do que as demais amostras.

Agradecimentos

Ao Prof.Dr.Fernando Landgraf pela teoria e metodologia de trabalho.

Aos meus pais pelo apoio e minha família pelo incentivo e respeito.

A SEW e meus colegas, os quais me ajudaram de alguma forma para a realização deste.

REFERÊNCIAS

- 1 LYUDKOVSKY, G.; PREBAN, A. G.; SHAPIRO, J. M. J. Appl. Phys. v.53 p.2419-2421 (1982)
- 2 LYUDKOVSKY, G.; BARNETT, J. B.; RASTOGI, P. K, BALAKRISHNAN, M. J. Mechanical Working and Steel Processing, XXII, ISS-AIME, Warrendale, Pennsylvania p.197-206 (1985)
- 3 PETROVIC, D. S.; JENKO, M.;DOLECEK, V. "The influence of copper on the decarburization and recrystallization of Fe-Si-Al alloys". Materiali in Tehnologije, v. 40, p. 13-16 (2006)
- 4 CESAR, M.d.G.M.M, MANTEL, M. J. "Effect of the temperature and dew point of the decarburization process on the oxide subscale of a 3% silicon steel".Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 254 – 255, p. 337 – 339 (2003)
- 5 STEPHENSON, E. T. "The effects of decarburization annealing on the microstructure and magnetic properties of semiprocessed motor lamination steels". Journal Materials Engineering, v. 12, n. 1, p. 69 – 83 (1990)
- 6 GEIGER, A. L. "Effects of internal oxidation and nitridation on the magnetic properties of non – oriented electrical steels". J. Appl. Phys., vol. 50, n. 3, p. 2366-2368 (1979)
- 7 LANDGRAF, Fernando José Gomes, "Propriedades Magnéticas dos Aços para fins elétricos", IPT, (2001).