



INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E ATMOSFERA DE RECOZIMENTO FINAL NAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS AÇOS ELÉTRICOS¹

Édina Serpa Alexandre²

Cesar Edil da Costa³

Jose Luiz dos Santos⁴

Resumo

Aços elétricos com diferentes composições químicas foram submetidos a tratamentos de recozimento final sob variadas condições de temperatura e atmosfera, visando melhorar as propriedades magnéticas. A otimização dos parâmetros de recozimento final minimiza as perdas no ferro, maximiza a permeabilidade magnética e reduz a oxidação superficial. Estes materiais foram analisados do ponto de vista microestrutural através de microscopia óptica e eletrônica. As propriedades magnéticas foram avaliadas por ensaio de Epstein.

Palavras-chave: Recozimento final; Alívio de tensões.

INFLUENCE OF FINAL ANNEALING HEAT TREATMENT TEMPERATURE AND ATMOSPHERE IN MAGNETIC PROPERTIES OF ELECTRICAL STEELS

Abstract

Electrical steels with different chemical compositions were submitted to final annealing heat treatment under various conditions of temperature and atmosphere, to improve the magnetic properties. The optimization of the final annealing reduces the iron losses, maximizes the magnetic permeability and it reduces surface oxidation. These materials were analyzed from the viewpoint of microstructure by optical and electronic microscopy. The magnetic properties were evaluated by Epstein test.

Key words: Final annealing heat treatment; Stress relief.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Engenheira Metalúrgica, MSc; WEG Equipamentos Elétricos S.A., Jaraguá do Sul, SC.

³ Professor Dr., Departamento de Engenharia Mecânica; UDESC, Joinville, SC.

⁴ Graduando em nível superior em Eng^a Mecânica; UDESC, Joinville, SC.



1 INTRODUÇÃO

Os aços elétricos semiprocessados são aços siliciosos ou não, geralmente fornecidos com um passe de 'laminação de encruamento' na faixa de 2% a 8%. São submetidos a tratamento térmico de descarbonetação, nos consumidores, que visam, além de reduzir o teor de carbono, promover o crescimento de grão, formar uma textura cristalográfica mais adequada e desenvolver isolamento elétrico pela criação de uma camada contínua de óxidos sobre a superfície do aço.

Os aços totalmente processados são aços ao silício onde suas propriedades são desenvolvidas plenamente pelo fabricante do aço, ou seja, são prontos para estampagem e uso. Durante a manufatura, tensões e deformações são introduzidas, resultando na deterioração das propriedades magnéticas. Em muitos casos, recozimento para alívio de tensões é aplicado nestes aços, onde as partes deformadas são recuperadas ou recristalizadas, as tensões residuais são aliviadas e pode ocorrer crescimento normal de grãos.

Para a melhoria das propriedades magnéticas, a redução do teor de carbono é muito importante, pois diminui a susceptibilidade ao envelhecimento magnético, promove queda na perda do núcleo e eleva a permeabilidade. Este fenômeno pode ocorrer durante a vida útil dos aços elétricos, onde alterações microestruturais tais como precipitação de carbono ou nitrogênio, formando carbeto e nitreto, aceleram as perdas das propriedades magnéticas.⁽¹⁾

Segundo alguns autores, o conteúdo em carbono deve ser menor que 30 ppm,^(2,3) porém envelhecimento magnético tem sido observado para carbono menor que 10 ppm.⁽⁴⁾ Quando se trabalha com tempos suficientes para atingir carbono menor que 50 ppm, um outro complicador que usualmente aparece é a oxidação superficial.^(5,6) Desse modo, é de grande interesse a obtenção de carbono menor que 0,003%, considerado satisfatório para as aplicações magnéticas, sem que o material fique exposto à oxidação prolongada. Os óxidos formados ancoram as paredes dos domínios magnéticos, dificultando o processo de magnetização.

Essa camada de óxidos apresenta espessura relativamente uniforme dentro dos grãos, com penetração adicional próxima aos dos contornos de grão, e geralmente está associada 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 o alumínio e o silício. Por isto, a superfície de um aço silício pode ser facilmente oxidada, até mesmo quando forem utilizados baixos pontos de orvalho.⁽⁷⁾

Foram realizados recozimentos finais com temperatura de recozimento e atmosfera variados em amostras de aços para fins elétricos com diferentes composições químicas, visando definir os parâmetros mais apropriados para o tratamento térmico para cada aço estudado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados aços elétricos com teores de silício diferentes, onde na Tabela 1 estão listados os valores determinados para as composições químicas. Os aços deste estudo são utilizados para a confecção de motores elétricos.

Os corpos-de-prova consistiram de lâminas cortadas nas direções longitudinais e transversais ao sentido de laminação, com dimensões 30x280mm.

Tabela 1. Composições químicas dos aços estudados

Amostra	Composição Química (% em peso)			
	C	Mn	Al	Si
A	0,0042	0,44	0,42	0,30
B	0,0062	0,24	0,42	0,57
C	0,0049	0,40	0,005	2,00

Foram estudadas as seguintes variáveis no recozimento final destes aços: duas temperaturas de recozimento (T_{rec}): 760°C e 790°C; 05 atmosferas: $N_2+7\%H_2$ sem vapor (atm 1), $N_2+10\%H_2$ com ponto de orvalho de 5°C (atm 2), 10°C (atm 3), 20°C (atm 4) e 25°C (atm 5).

Os ensaios sem vapor foram realizados em forno laboratorial, Brasimet/Metaltrend modelo K250, adaptado para controlar a atmosfera interna. As amostras foram aquecidas a taxa de 9°C/min, mantidas durante 105 minutos da temperatura de tratamento térmico (760°C ou 790°C) e resfriadas dentro do forno com gás e porta fechada até 400°C. A partir de 400°C, o resfriamento foi realizado com a porta do forno aberta. Os demais ensaios foram realizados em forno contínuo, com os demais parâmetros empregados na prática industrial mantidos constantes.

Perdas magnéticas a 1,5 T e 60 Hz e permeabilidade a 1,5 T foram medidas por ensaio de Epstein. Análise microestrutural foi realizada na seção transversal do corpo-de-prova, nas amostras sem recozimento (SR) e após recozimento. O tamanho de grão foi medido em microscópio pelo método do intercepto linear médio. Por microscopia eletrônica de varredura foi verificada a formação da camada de óxidos em cada tratamento realizado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As perdas magnéticas obtidas para a amostra A são apresentadas na Figura 1. Ligeiro aumento foi observado no tratamento realizado com atmosferas atm1 e atm5, evidenciando a necessidade de umidade na atmosfera para o recozimento deste material, porém limitando esta quantidade de umidade, pois há tendência da propriedade degradar com o aumento da umidade. O melhor resultado foi obtido com a atmosfera atm3, onde a redução das perdas chegou a 5% em comparação com a amostra realizada com atmosfera atm5 na temperatura de 760°C. Não houve alteração significativa com relação à variação da temperatura de recozimento.

Na Figura 2 encontram-se os valores de perdas magnéticas obtidas para a amostra B. Pode-se observar que a redução da umidade a 790°C, nas amostras realizadas em forno industrial, foi proporcional a redução das perdas magnéticas. Na temperatura de 760°C não foi observada esta tendência, onde praticamente não ocorreu variação com a redução da umidade nas atmosferas de atm2 a atm5. As amostras realizadas nas atmosferas atm1 foram as que apresentaram os piores resultados, onde a temperatura de 760°C foi a mais prejudicial.

Na amostra C (Figura 3), na temperatura de 760°C praticamente não ocorreu variação de perdas entre as diferentes atmosferas estudadas. A 790°C, a redução das perdas magnéticas foi maior quanto menor foi a umidade utilizada. O melhor resultado foi obtido com a temperatura de 790°C e atmosfera atm1. A melhora das perdas magnéticas com o recozimento final não foi tão evidente para a Amostra C em comparação com os demais aços estudados neste trabalho.

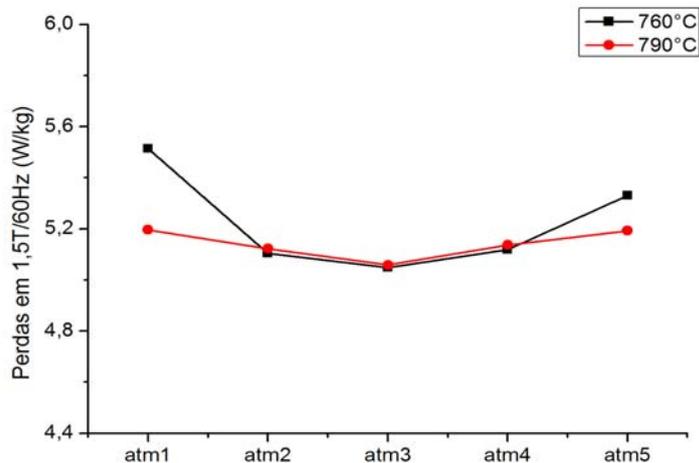


Figura 1. Efeito da temperatura e atmosfera de recozimento final sobre as perdas magnéticas a 1,5T/60Hz – Material A.

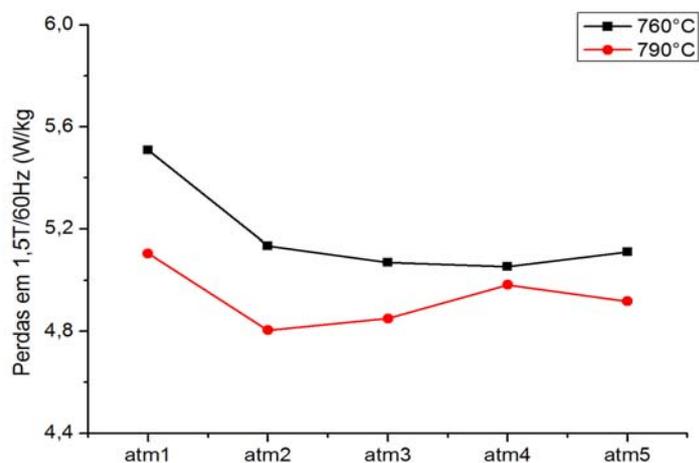


Figura 2. Efeito da temperatura e atmosfera de recozimento final sobre as perdas magnéticas a 1,5T/60Hz – Material B.

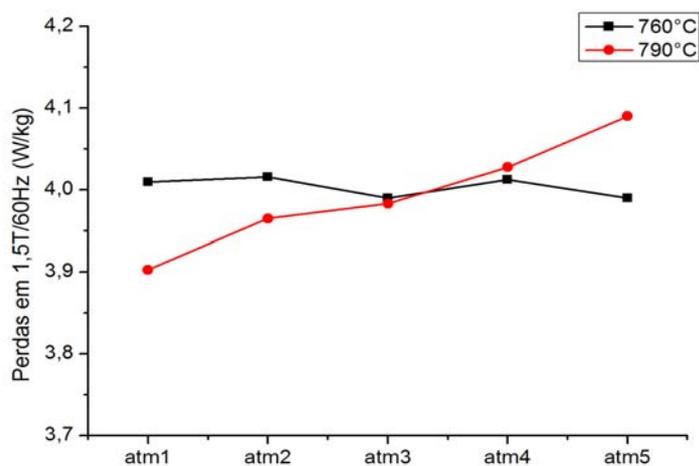


Figura 3. Efeito da temperatura e atmosfera de recozimento final sobre as perdas magnéticas a 1,5T/60Hz – Material C.

Os resultados obtidos para a permeabilidade na amostra A são apresentados na Figura 4. No recozimento realizado com atmosfera atm5 houve redução desta propriedade de até 19%, em relação aos demais recozimentos realizados. Os melhores resultados foram obtidos com as atmosferas com umidade reduzida. O melhor resultado foi obtido com a temperatura de 790°C na atmosfera atm1.

Na permeabilidade para a amostra B (Figura 5) foi observado melhora com a redução da umidade até a atmosfera atm 2, sendo mais evidente na temperatura de 790°C. Obteve-se aumento de 6% a 790°C em relação à temperatura de 760°C. Com atmosfera atm5 foram obtidos os piores resultados, onde a temperatura de 790°C foi a mais prejudicial. As amostras com atmosfera atm1 apresentaram resultados inferiores que as atmosferas atm2 e atm3.

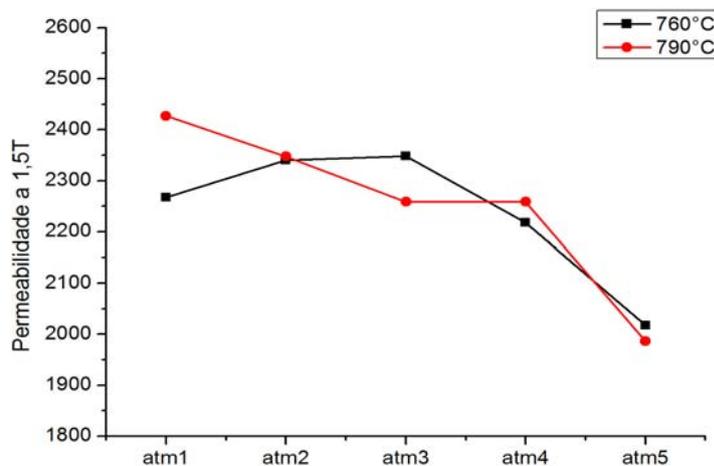


Figura 4. Efeito da temperatura e atmosfera de recozimento final sobre a permeabilidade a 1,5T/60Hz – Material A.

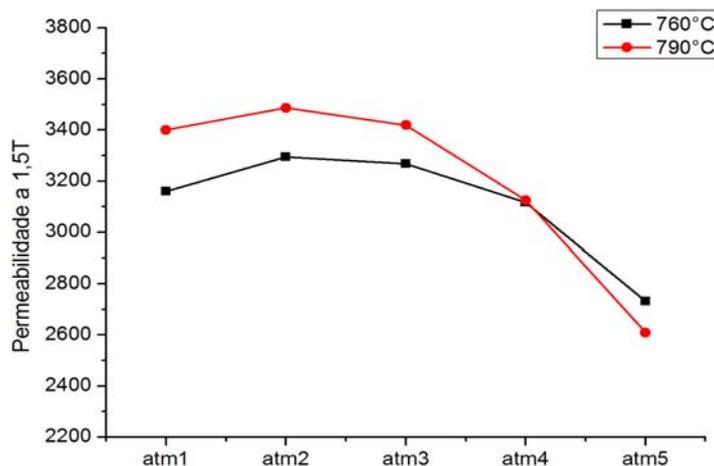


Figura 5. Efeito da temperatura e atmosfera de recozimento final sobre a permeabilidade a 1,5T/60Hz – Material B.

A Figura 6 representa a variação da permeabilidade para a amostra C. A redução da umidade aumentou ligeiramente a permeabilidade na temperatura de 760°C. Esta melhora foi mais efetiva na temperatura de 790°C para as amostras com atmosfera atm1, atm2 e atm3. Nas atmosferas atm4 e atm5, os resultados foram inferiores nesta temperatura que a 760°C. Os melhores resultados foram obtidos na temperatura de 790°C e atmosfera atm1.

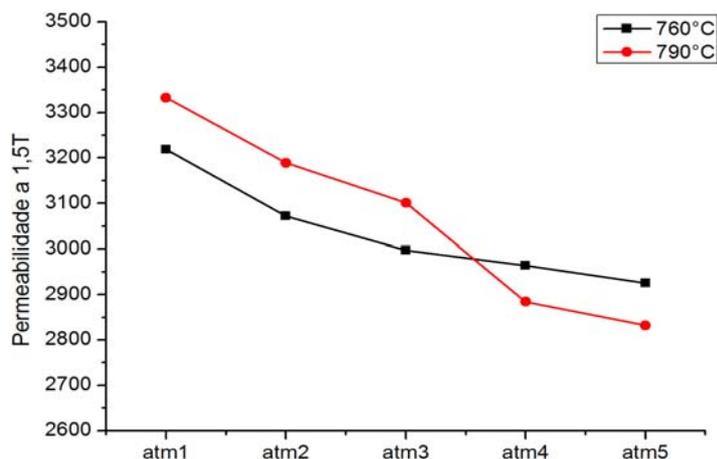


Figura 6. Efeito da temperatura e atmosfera de recozimento final sobre a permeabilidade a 1,5T/60Hz – Material C.

Na amostra A não foi observada variação significativa no tamanho de grão nas diferentes condições de recozimento final realizadas, conforme Figura 7. Em comparação com a condição sem recozimento, como mostra a Figura 8.a, ocorreu crescimento de grão significativo após o recozimento final, atingindo o tamanho médio aproximado de 0,180 mm (Figura 8.b). Apesar de ocorrer crescimento de grão em todas as amostras que sofreram recozimento, houve deterioração nas propriedades magnéticas com o aumento da umidade, principalmente na permeabilidade, conforme pode ser visto na Figura 4. Esta redução deve estar associada à presença de oxidação superficial nos contornos de grãos, como demonstra a Figura 9, que foram observadas nas amostras recozidas com atmosferas atm4 e atm5 para ambas as temperaturas.

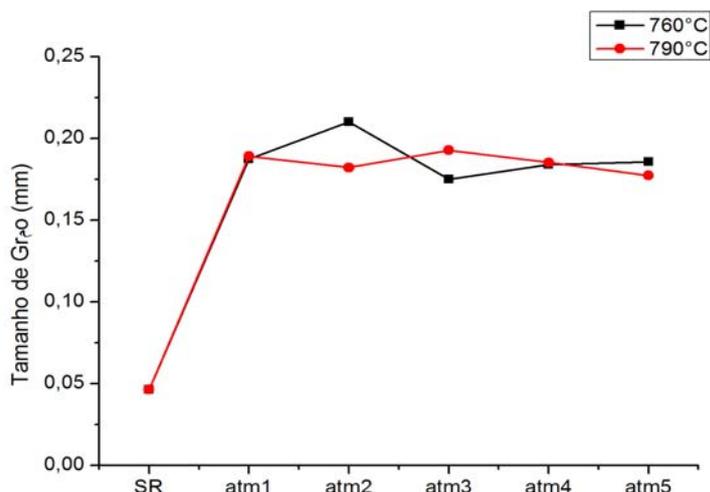


Figura 7. Efeito da temperatura e atmosfera de recozimento final sobre o tamanho de grão (em mm) – Amostra A.

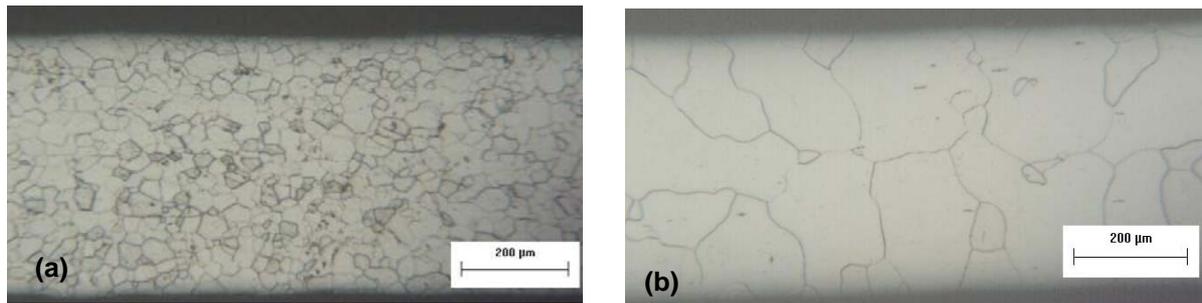


Figura 8. Amostra A. (a) Sem recozimento; (b) Após recozimento ($T_{rec}=760^{\circ}\text{C} - \text{atm1}$).

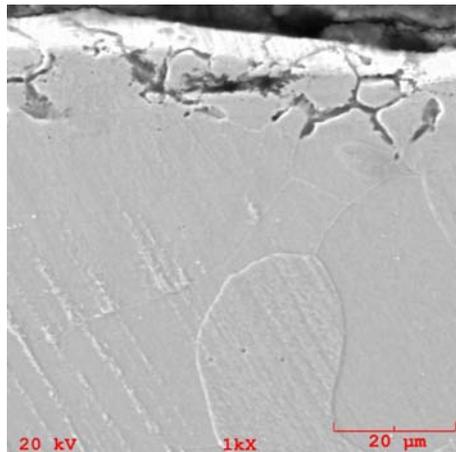


Figura 9. Micrografia evidenciando a formação oxidação superficial – Amostra A ($T_{rec}=760^{\circ}\text{C} - \text{atm4}$). Análise sobre microscopia ótica de varredura com aumento de 1.000X.

A Figura 10 mostra a variação do tamanho de grão para a amostra B. Verifica-se que ocorreu crescimento de grão em todos os recozimentos realizados (Figura 11.a,b), sendo que o crescimento foi menos efetivo nas atmosferas atm1. Nas amostras com atmosfera atm5 houve redução do tamanho de grão em comparação com as demais amostras recozidas com umidade. De um modo geral, o crescimento de grão foi mais efetivo a 790°C que na temperatura de 760°C .

Comparando os resultados de tamanho de grão com os obtidos para perdas magnéticas (Figura 2) e permeabilidade (Figura 5), verifica-se que a melhora nas propriedades magnéticas com o recozimento final realizado na amostra A deve estar associada ao alívio de tensões e ao crescimento de grão. O crescimento de grão foi maior na temperatura de 790°C , e nesta temperatura obtiveram-se menores valores de perdas magnéticas e maior permeabilidade. O crescimento de grão foi menor nas amostras recozidas na atmosfera atm1, onde foi verificado aumento nas perdas em relação as demais amostras recozidas, ligeira redução na permeabilidade com comparação com as amostras recozidas com atmosfera atm4 e atm5.

A redução da permeabilidade e o ligeiro aumento nas perdas magnéticas observadas no recozimento realizado com as atmosferas atm4 e atm5 pode ser justificada pela presença de oxidação superficial que ocorreram nestas amostras, como demonstra a Figura 12.

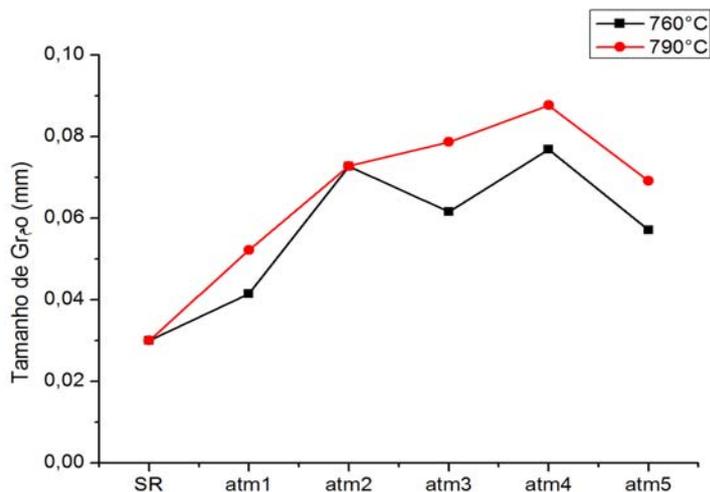


Figura 10. Efeito da temperatura e atmosfera de recozimento final sobre o tamanho de grão (em mm) – Amostra B.

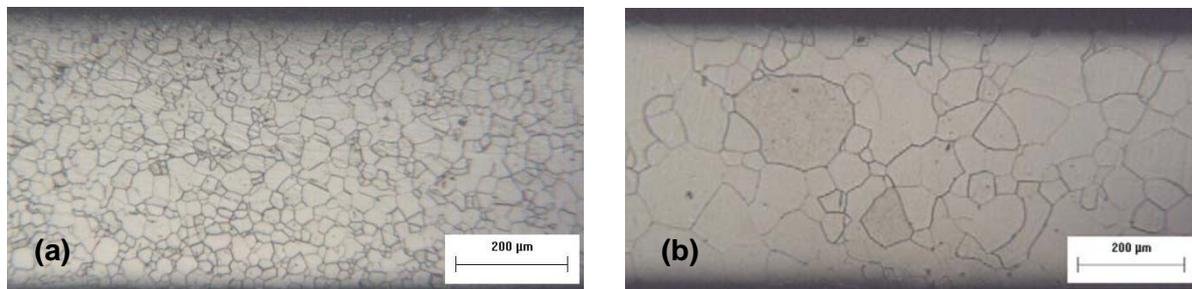


Figura 11. Amostra B. (a) Sem recozimento; (b) Após recozimento ($T_{rec}=790^{\circ}\text{C}$ – atm5).

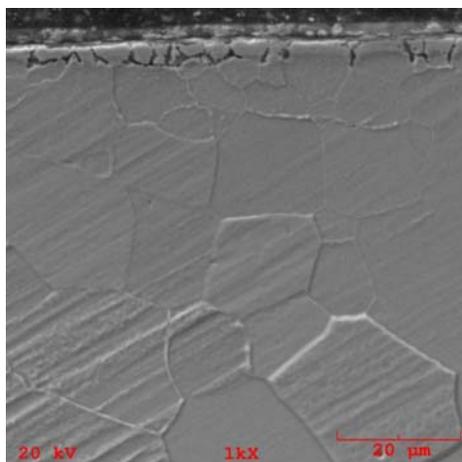


Figura 12. Micrografia evidenciando a formação de oxidação superficial – Amostra B ($T_{rec}=760^{\circ}\text{C}$ – atm4). Análise sobre microscopia ótica de varredura com aumento de 1.000X.

Como pode ser verificado na Figura 13, não ocorreu crescimento de grão significativo com o recozimento final na amostra C. Na Figura 14 encontram-se as micrografias antes e após o recozimento final.

O resultado das perdas magnéticas, como foi visto na Figura 3, não apresentou variação significativa entre as condições com e sem recozimento e entre as diferentes condições de recozimento realizadas, estando coerente com o crescimento de grão apresentado neste material.

Nos resultados de permeabilidade, como foi mostrada na Figura 6, a redução da umidade aumentou o parâmetro e os resultados foram superiores a 790°C . Também

houve grande melhora com a aplicação do recozimento final em comparação com a condição sem recozimento, evidenciando que neste material ocorreu alívio de tensões. No tratamento de alívio de tensões ocorre a eliminação das tensões residuais e deformações provocadas pelo corte com conseqüente restauração das propriedades magnéticas.

As respostas as diferentes condições de umidade pode ser explicada pela degradação microestrutural causada pela presença de camada de óxido superficial, como pode ser visto na Figura 15. Porém esta camada foi encontrada em todas as amostras recozidas. Possivelmente, nos aços recozidos com menor umidade não houve penetração significativa de óxidos nos contornos de grãos, como pode ter ocorrido nas amostras com umidade mais elevada. Quanto maiores os teores de silício e de alumínio, maior a propensão a oxidar e mais crítico o tratamento.⁽⁸⁾

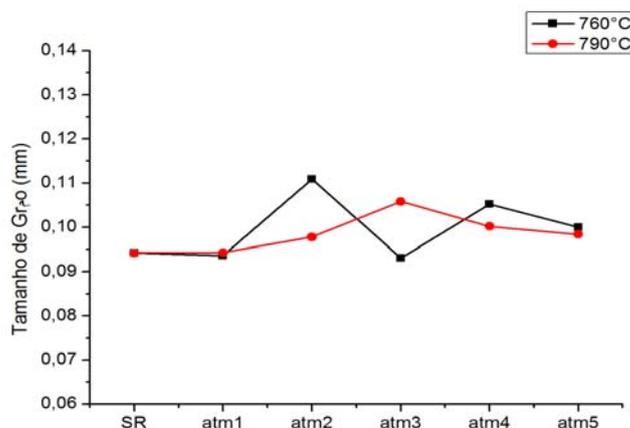


Figura 13. Efeito da temperatura e atmosfera de recozimento final sobre o tamanho de grão (em mm) – Amostra C.

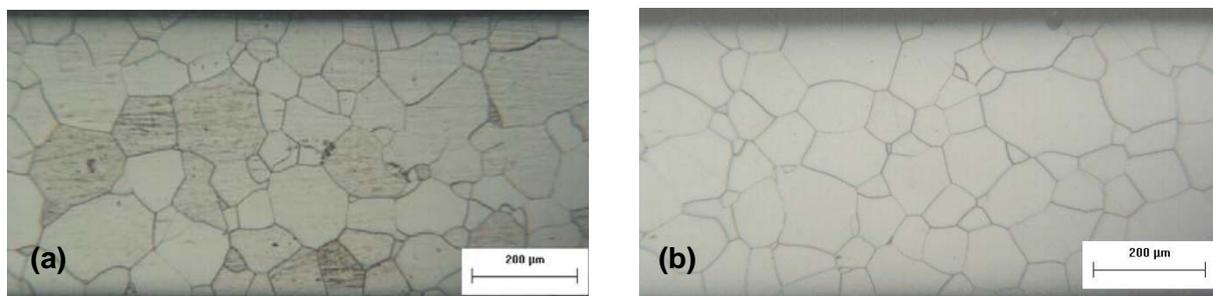


Figura 14. Amostra C. (a) Sem recozimento; (b) Após recozimento ($T_{rec}=760^{\circ}\text{C}$ – atm1).

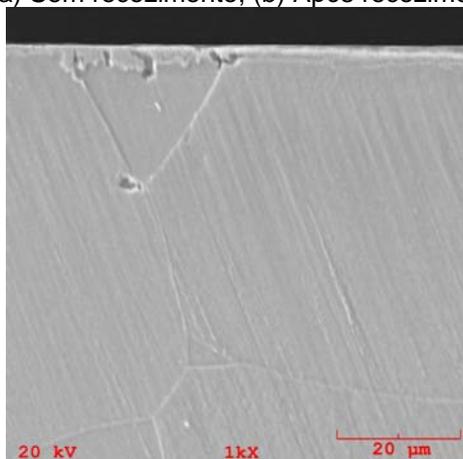


Figura 15. Micrografia evidenciando a formação de camada de óxido superficial – Amostra C ($T_{rec}=760^{\circ}\text{C}$ – atm4). Análise sobre microscopia óptica de varredura com aumento de 1.000X.



4 CONCLUSÃO

A atmosfera de recozimento final tem importante influência nas propriedades magnéticas dos aços elétricos, onde a presença de umidade, aliada a composição química do material, pode causar oxidação superficial.

A temperatura de recozimento apresentou maior influência nas propriedades magnéticas das amostras com 0,57% e 2,0% de silício, principalmente na permeabilidade.

Degradação das propriedades magnéticas, ou seja, aumento das perdas e redução da permeabilidade ocorreu nas três amostras com o aumento da umidade no recozimento. Porém, nas amostras com menor teor de silício, ocorreu redução das propriedades magnéticas nos recozimentos realizados com ausência de umidade.

O material com maior teor de silício apresentou os melhores resultados quando recozido em atmosfera sem umidade.

Agradecimentos

A WEG, a UDESC e meus colegas, que me ajudaram de alguma forma para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 CASTRO, J.A.; CAMPOS, M.F.; CASTRO, N.A.; LANDGRAF, F.J.G. Comparação de Modelos Analíticos e Resultados Experimentais com Modelo de Volumes Finitos para o Fenômeno de Descarbonetação em Aços Elétricos. In: 17^o CBECIMat, Foz do Iguaçu, PR, 2006. 1 CD.
- 2 WERNER, F.E.; JAFFEL, R.I. Journal Mat. Eng. Perf. 1, p. 227, 1992.
- 3 DIJKSTRA, L. J.; WERT, C. Phys. Ver. 79, p. 979, 1950.
- 4 ELOOT, K.; DILEWIJINS, J; STANDAERT, C; COOMAN, B.C. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 135, p. 223-225, 1994.
- 5 STEPHENSON, E.T. The Effects of Decarburization Annealing on the Microstructure and Magnetic Properties of Semiprocessed Motor Laminations Steels. Journal of Materials Engineering, V. 12 N^o1, p. 69-83, 1990.
- 6 JUDD, R.R.; STANESCU, M.S.; BACI, D. Heat Treatment of Metals, p. 83, 1995.
- 7 PETROVIC, D.S.; JENKO, M.; DOLECEK, V. The influence of copper on the decarburization and recrystallization of Fe-Si-Al alloys, Materials in Tehnologie, V.40, p.13-16, 2006.
- 8 GEIGER, A. L. Effects of internal oxidation and nitridation on the magnetic properties of non-oriented electrical steels, Journal Applied Physics, v.50, p. 2366-2368, 1979.