

Envelhecimento forçado de lâminas de aços de grão orientado produzidas pela tecnologia de baixa temperatura de reaquecimento de placas

Aging of grain oriented electrical steels produced by low temperature slab reheating technology.

Rodrigo da Silva Braga^{1,2}, Adriano Alex de Almeida³, Tessie Gouvêa da Cruz Lopes^{1,2*}

RESUMO

Os aços de grão orientado (GO) são utilizados em núcleos de transformadores. Este trabalho descreve o efeito do teor de carbono em aços GO produzidos pela tecnologia de baixa temperatura de reaquecimento de placas. Para isso, as propriedades magnéticas de duas amostras antes e após o envelhecimento foram calculadas. Obtiveram-se imagens aleatórias de contraste topográfico no microscópio eletrônico de varredura para fins de cálculos de fração volumétrica de precipitados plotados no Software Image J. Pelas análises realizadas, o efeito do envelhecimento das amostras não se diferenciou das amostras antes do tratamento térmico, razão dada pelos resultados das propriedades das amostras envelhecidas terem apresentado valores de perdas magnéticas semelhantes àquelas antes do envelhecimento.

Palavras-chave: Aço de grão orientado, Perdas magnéticas, Teor de carbono.

ABSTRACT

Some steels are used for electromagnetic purposes, for example, in transformer cores and they are known as grain-oriented electrical steels (GOES). In this way, this paper has the objective to describe the effect of carbon content on GOES produced by low temperature slab reheating technology. Two samples were utilized in order to calculate their magnetic properties before and after aging. Random topographic contrast images were obtained from the scanning electron microscope for volumetric fraction calculations of precipitates plotted in Image J software. According to the effect of aging of the samples heat treated, it was not possible to differ them from the samples without aging, due to the similarity in magnetic losses before and after the treatment of both samples.

Keywords: Grain oriented electrical steels, Magnetic losses, Carbon content.

1. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Seropédica (RJ) – Brasil

2. SOLARMATERIAIS Soluções em Engenharia – Seropédica (RJ) – Brasil

3. Aperam South America- Timóteo (MG) – Brasil

Autor correspondente: tessie@ufrj.br

Recebido: 05/11/2019 **Aprovado:** 30/01/2020

INTRODUÇÃO

Os aços de grão orientado (GO) são materiais ferromagnéticos que apresentam ótimas propriedades magnéticas, como alta indução magnética (medida a 800 A/m – B8) e baixas perdas magnéticas (total, corrente parasita, anômala e por histerese). Tais características são justificadas em decorrência da orientação cristalográfica preferencial chamada de textura/componente Goss {110}<100>. Essas características são alcançadas por meio da laminação a quente, laminação a frio, descarbonetação, nitretação e recozimento em caixa¹.

Dentre os diferentes processos de fabricação de aços GO, destaca-se o de baixa temperatura de reaquecimento de placa. Nessa tecnologia, a bobina é recozida e laminada a frio em um único estágio após a laminação a quente, e segue posteriormente para a etapa de descarbonetação e nitretação, quando ocorre a aquisição do inibidor. Essa rota de produção objetiva a obtenção de aços GO com elevados valores de indução (B8) e baixíssimas perdas magnéticas².

A conservação e as melhorias das características desses materiais estão condicionadas, dentre outros fatores, à diminuição do teor de carbono durante a descarbonetação. Quando esse elemento está presente acima do limite de solubilidade na matriz ferrítica, tem-se a possibilidade da ocorrência do envelhecimento magnético. Esse fenômeno se manifesta pela precipitação de carbonetos de ferro devido ao tempo e temperatura na qual o aço GO está submetido em condições de aplicação em transformadores. Os carbonetos de ferro agem como barreiras à movimentação de paredes de domínios magnéticos durante o processo de magnetização e desmagnetização, o que causa aumento das perdas magnéticas do aço já aplicado nos núcleos³.

Ao longo do processamento desse aço, o alto teor de carbono torna-se fundamental. Isso porque, para a etapa de laminação por exemplo, ele contribui na dissolução do nitreto de alumínio (AlN) em presença da austenita. Na laminação a frio, por sua vez, o alto teor de carbono no tratamento térmico de envelhecimento entre passes ancora as discordâncias decorrentes do envelhecimento por deformação a frio⁴.

Em vista disso, a presença do carbono na fabricação de aços para aços GO continua sendo uma característica de extrema importância no comportamento desse material durante sua aplicação⁵. Dessa maneira, o presente trabalho objetiva estudar o efeito do teor de carbono residual no envelhecimento dos aços de grão orientado produzido pela tecnologia de baixa temperatura de reaquecimento de placa.

MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras de dois aços GO (composição química mostrada na Tabela 1), tiveram suas propriedades magnéticas avaliadas antes e após tratamento térmico de envelhecimento forçado, que foi conduzido por 24 h em atmosfera de oxigênio.

Tabela 1: Composição química das amostras em %.

Amostras	Mn	P	Si	Al	Sn	C
1	0,1634	0,0053	3,1623	0,0322	0,0501	0,0544
2	0,1634	0,0053	3,1623	0,0322	0,0501	0,0544

As amostras foram separadas em quatro grupos sendo 1a e 1b correspondentes à amostra 1, antes e após o envelhecimento, respectivamente. E, 2a e 2b relacionados à amostra 2, antes e após o envelhecimento, respectivamente, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Teor de carbono em ppm das amostras.

Amostra	1a	1b	2a	2b
Quantidade	40	45	47	38

Para avaliação metalográfica, as amostras foram lixadas na sequência 300#, 500#, 600#. O polimento se deu por meio de solução diamantada de 9, 3 e 1 µm, respectivamente. Com relação à análise das propriedades magnéticas, seguiu-se a norma ABNT NBR 5161. Dezesesseis lâminas de cada amostra foram dispostas no quadro de Epstein. Pesou-se cada agrupamento e adotou-se a densidade de 7650 kg/m³ para todos. Em seguida, as induções magnéticas (I) foram adicionadas ao Software MPG Expert e os valores 1,0; 1,5; 1,7 T foram programados para as faixas de 30,0; 50,0; 60,0 e 100,0 Hz. Uma relação de valores de perdas totais (P_t) e permeabilidade magnética B8 (800 A/m a 60 Hz) foi fornecida pelo programa. Aplicou-se, então, o modelo de separação de perdas (Eq. 1), ou seja, um mecanismo matemático que considera a soma de parcelas de todas as perdas: perda histerética (P_h), perda anômala (P_a) e perda parasita (P_p), também consideradas dissipação quando em J/m³ 6.

$$P_t = P_h + P_a + P_p \quad (1)$$

Para os valores de perda parasita de cada amostra, recorreu-se à Eq. 2 7.

$$P_p = \frac{\pi^2 * f^2 * B_{max}^2 * e^2}{6 * d * \rho} \quad (2)$$

Sendo f a frequência de ensaio em Hz, B_{max} a indução máxima do ensaio em T, e , a espessura da lâmina Epstein em m e d , a densidade do aço, 7650 kg/m³. O valor de resistividade elétrica, dado em Ω.m correspondeu à Eq. 3 8.

$$\rho = 10,7 + 3,4 * (%Mn) + 17 * (%P) + 14 * (%Si) + 12 * (%Al) + 8 * (%Sn) \quad (3)$$

As perdas histeréticas das amostras foram obtidas através do coeficiente linear das retas de P_t (J/m^3) por f , aplicados a cada valor de I . Já as perdas anômalas foram adquiridas pela diferença entre P_t e as P_h e P_p na Eq. 1.

O envelhecimento magnético das amostras foi calculado utilizando-se a Eq. 4. O tratamento térmico de envelhecimento delas seguiu a ABNT NBR 9025, a 225 °C durante 24 h.

$$EI(\%) = \frac{(P_{t d.e} - P_{t a.e})}{P_{t a.e}} * 100 \quad (4)$$

onde: $P_{t d.e}$ é a perda magnética após o tratamento térmico de envelhecimento; $P_{t a.e}$ é a perda magnética antes do tratamento térmico de envelhecimento.

Em sequência, com o propósito de visualizar e identificar os precipitados e/ou as inclusões para fins estereológicos, conceberam-se imagens aleatórias de contraste topográfico no microscópio eletrônico de varredura. Essas imagens foram plotadas no Software Image J para contabilização de fração volumétrica de precipitados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As composições químicas das amostras foram utilizadas no cálculo da resistividade elétrica dos aços e estão indicados na Tabela 3. Os dados exibiram o mesmo valor para as quatro amostras, uma vez que as composições químicas da Tabela 1 são iguais para ambas.

Tabela 3: Dados das amostras Epstein.

Amostras	Massa (kg)	Espessura (m)	Densidade (kg/m ³)	Resistividade (Ohm.m)
1 a	0,3258	2,909E-04	7650	5,64051E-07
1 b				
2 a	0,3228	2,882E-04		5,64051E-07
2 b				

O Si representa a maior parcela de contribuição nas propriedades gerais e intrínsecas dos aços GO, além de essenciais no processamento desses materiais. Os valores da espessura e densidade adquiridas no quadro de Epstein, apresentados também na Tabela 3, foram essenciais no cálculo da P_p (Fig. 1).

Diante da análise dos gráficos, observou-se que as perdas parasitas são iguais.

O Si, de modo geral, é o elemento mais representativo e importante no que diz respeito à resistividade elétrica para o produto final. As amostras de aço GO apresentaram uma quantidade de silício em torno de 3,1% em peso em sua composição. Segundo Cardoso⁹, o Si em conjunto com o Al corresponde a ganhos de resistividade elétrica, além de possibilitar boa orientação magnética nesse material. Esse aumento da resistividade, contribui na redução das perdas magnéticas, uma vez que, elevando o valor da resistividade, diminui-se a perda parasita. De acordo com Santos¹⁰, a função do Mn é adequar a orientação cristalina nesses aços, de modo a inibir o crescimento do tamanho do grão.

Dos dados gerados pelo ensaio no quadro de Epstein das lâminas de aço, extraíram-se os valores de perdas magnéticas totais P_t (Fig. 2).

De acordo com os valores de perda magnética total das amostras, verificou-se que as perdas não se distinguiram, o que corresponde que, tanto a amostra 1 quanto a amostra 2 não apresentaram envelhecimento magnético, ainda que seus teores de carbono estejam elevados quando se compara ao % de C admissível em aços elétricos de grão não orientado (GNO)¹¹. Essa teoria pode ser ratificada de acordo com a Fig. 3, que indica a evolução das perdas com o envelhecimento.

Nota-se que, pelos dados revelados dos índices de envelhecimento, obteve-se um envelhecimento negativo para ambas, ou seja, não ocorreu o envelhecimento das amostras, o que não era previsto, já que o envelhecimento correlaciona-se a amostras com elevados teores de carbono. Uma razão para isso deve-se ao fato de que o tratamento térmico funcionou mais para o alívio de tensões das amostras do que para a precipitação dos carbonetos. Vale ressaltar que as lâminas de cada amostra foram tratadas juntas no mesmo forno para a mesma temperatura.

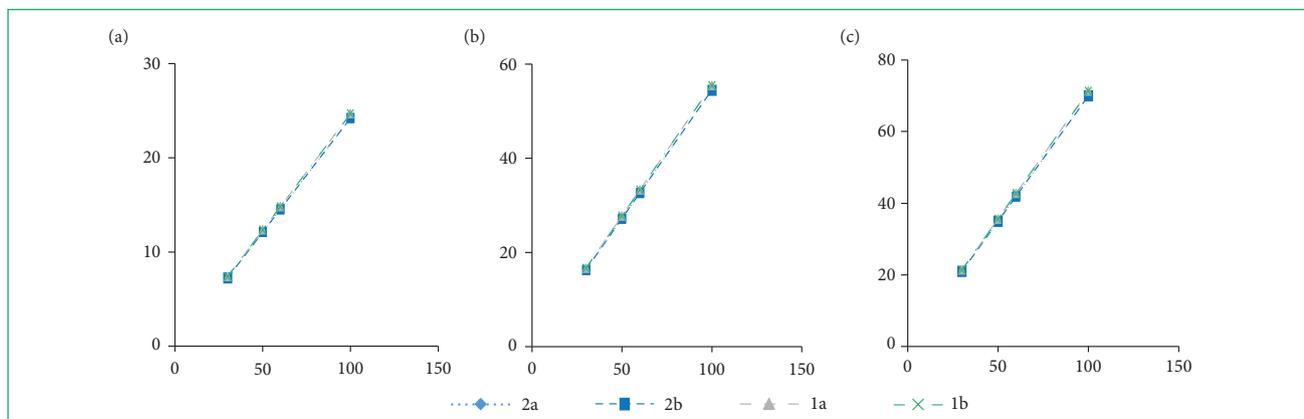


Figura 1: Perdas parasitas em f de 30, 50, 60 e 100 Hz. (a) indução a 1,0 T; (b) indução a 1,5 T e (c) indução a 1,7 T.

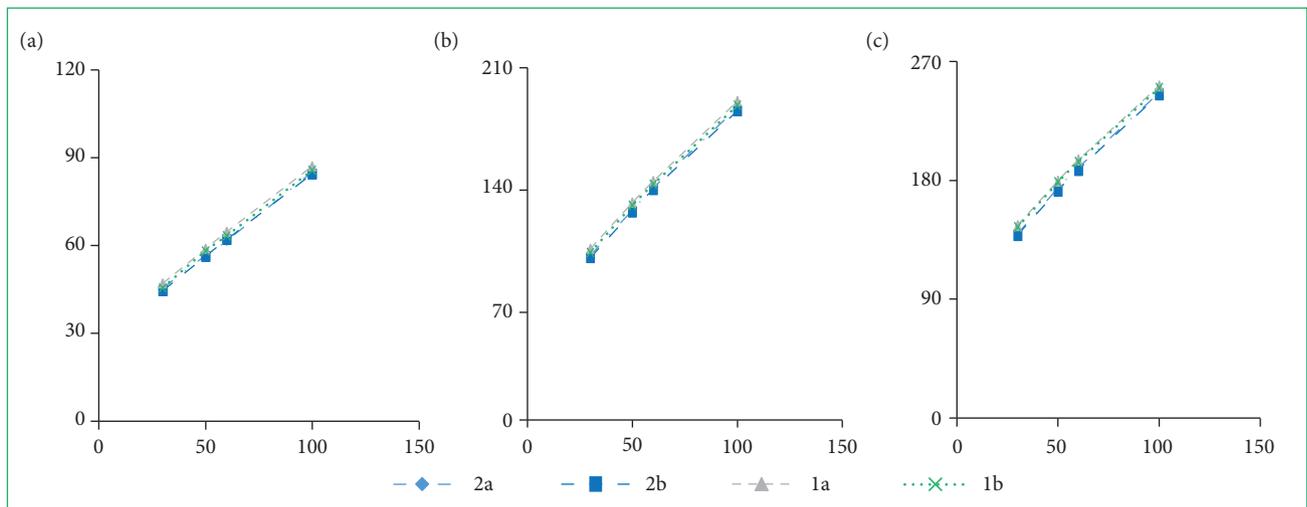


Figura 2: Perdas totais em f de 30, 50, 60 e 100 Hz. (a) indução a 1,0 T; (b) indução a 1,5 T e (c) indução a 1,7 T.

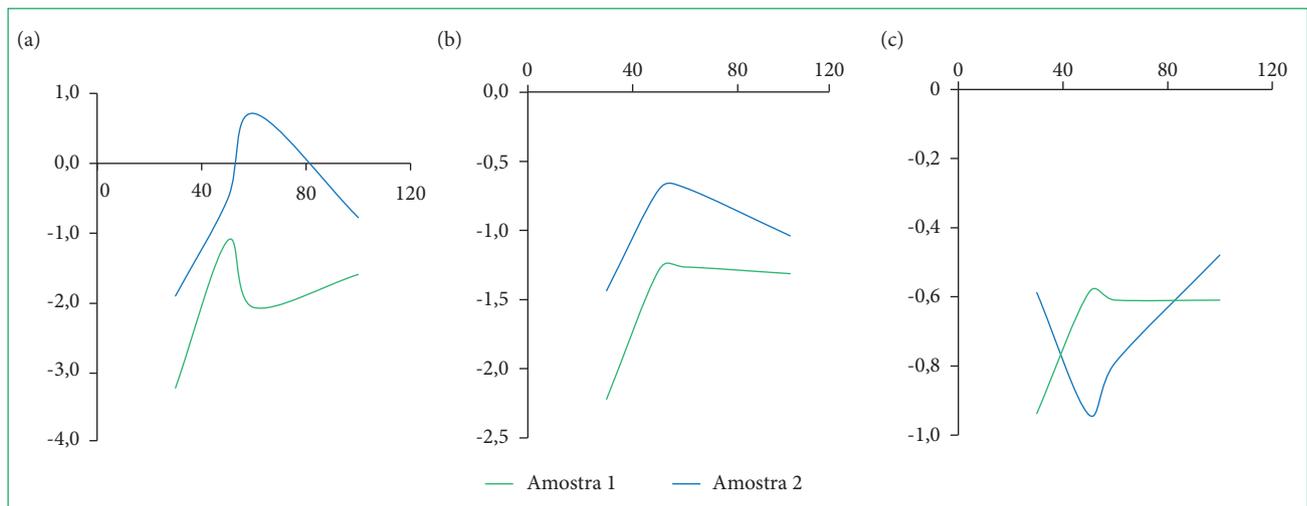


Figura 3: IE %.(a) indução a 1,0 T; (b) indução a 1,5 T e (c) indução a 1,7 T.

As P_{ms} das lâminas foram adquiridas pela inclinação das retas de P_r . Em frequências de 30, 50, 60 e 100 Hz, os resultados do coeficiente linear de cada uma delas foi utilizado em representação às perdas histeréticas (Tabela 4).

Tabela 4: Dados de perdas histeréticas dos aços obtidos do coeficiente linear de P_r .

Amostras	Perda Histerese (Ph) - J/m ³		
	1,0 T	1,5 T	1,7 T
2 a	28,14	61,99	96,75
2 b	27,74	61,30	95,61
1 a	30,25	66,22	103,37
1 b	29,11	64,51	102,31

De acordo com os dados obtidos, as perdas histeréticas nas amostras envelhecidas foram superiores às não envelhecidas. Marra e Buono¹² dizem que a presença de partículas implica na movimentação de domínios magnéticos diante de um campo

magnético em exercício e, dessa maneira, aumenta a perda por histerese do aço. Contudo era esperado que, com tratamento térmico de envelhecimento forçado, a perda por histerese fosse maior nas amostras envelhecidas, uma vez que os impedimentos dessa movimentação seriam possivelmente maiores em decorrência do surgimento de partículas.

Nesse contexto, entende-se que a precipitação não foi procedida mesmo sob tratamento térmico forçado (aumento das perdas), o que pode estar correlacionado à ocorrência de alívio da tensão das deformações geradas nas arestas da amostra por conta do seu corte ou ainda ao tamanho pequeno de grão.

A P_a das amostras calculadas na Eq. 1 está exibida na Fig. 4. Não ocorreu diferença entre os valores expressados. Cardoso² explica que a P_a está relacionada ao tamanho médio de grão, ou seja, quanto maior o tamanho de grão, maior é a distância entre as paredes de domínio. Os carbonetos precipitados podem ser vistos nas Figs. 5 (amostra 1) e 6 (amostra 2), respectivamente. Os dados de B8 das amostras estão listados a seguir: amostras 1 a e 1 b (1.861 T); amostras 2 a e 2 b (1.870 T). De um modo geral, não

ocorreu uma forte diferença entre os dados das amostras de modo que possa se configurar em justificativas a partir dos resultados de perdas.

Por essas análises, observou-se que a ocorrência de precipitados possa ter sido equivalente tanto para os casos antes ou após o envelhecimento magnético. No entanto, para o cálculo de fração volumétrica (Fig. 7), observaram-se menores frações volumétricas de precipitados para amostras que foram envelhecidas.

Um aumento percentual da fração volumétrica era aguardado para as amostras, uma vez que, tratando-se de um envelhecimento

magnético forçado, ocorreriam mudanças na microestrutura dessas lâminas.

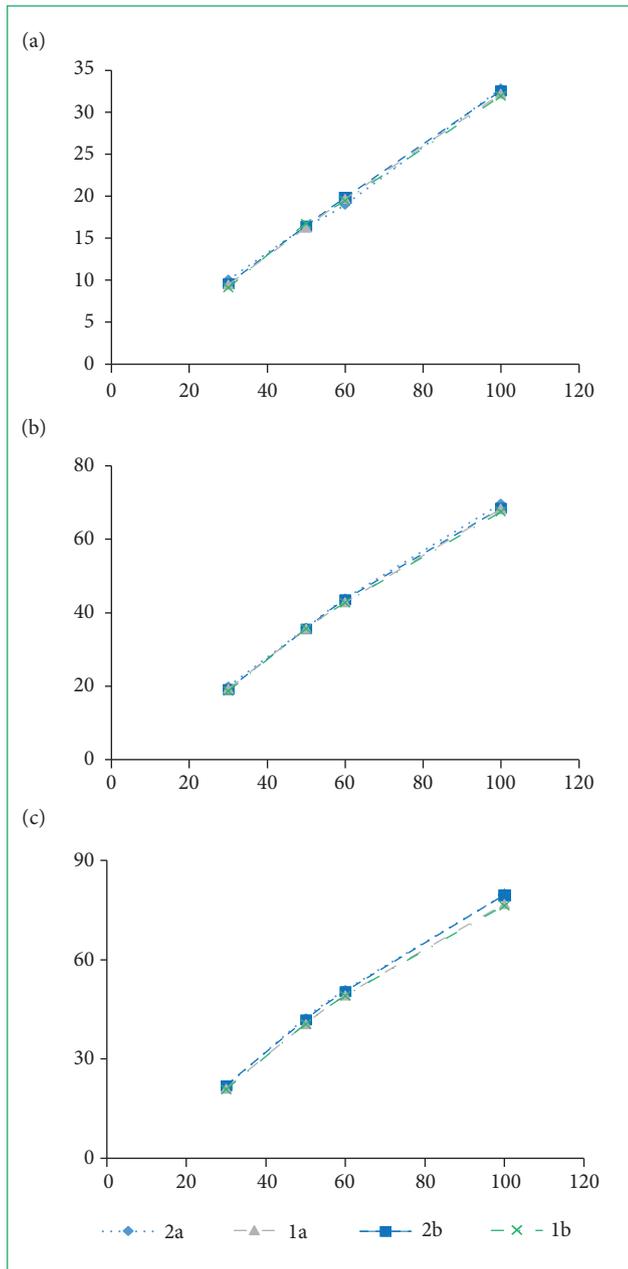


Figura 4: Perdas anômalas em f de 30 Hz, 50 Hz, 60 Hz e 100 Hz. (a) indução a 1,0 T; (b) indução a 1,5 T e (c) indução a 1,7 T.

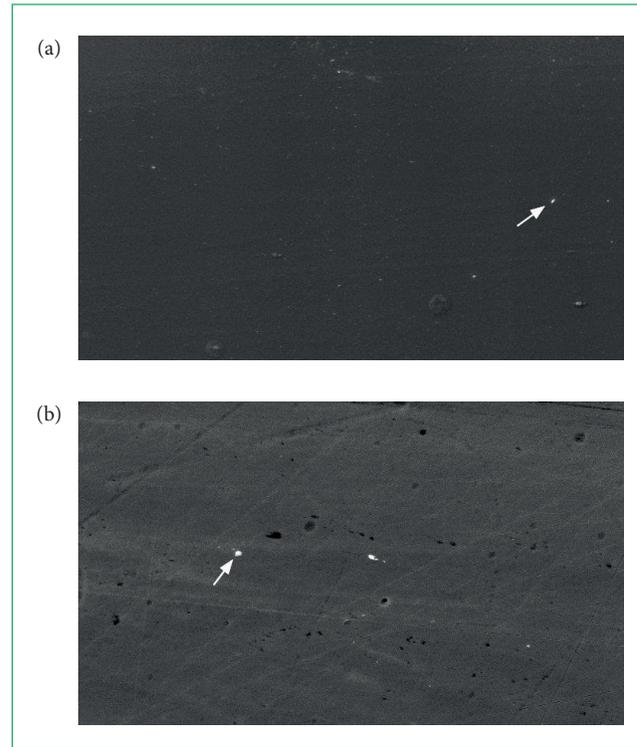


Figura 5: MEV das amostras 1. (a) antes do envelhecimento; (b) após o envelhecimento.

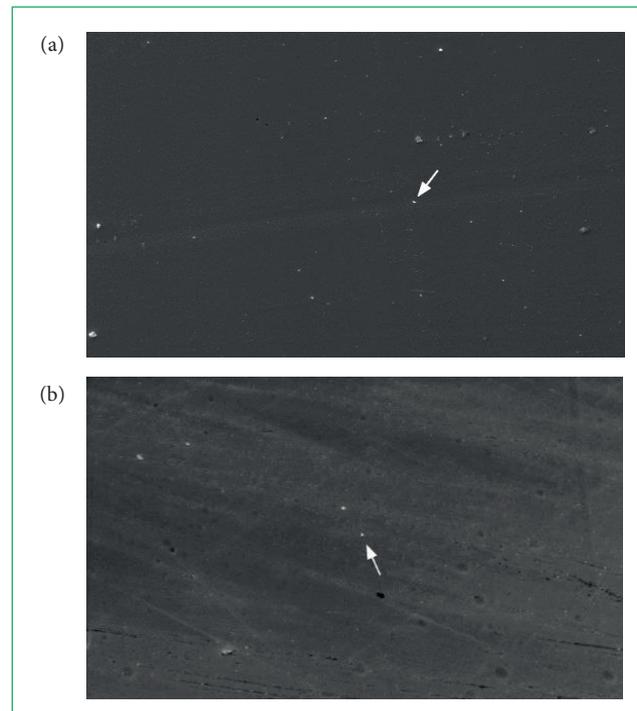


Figura 6: MEV das amostras 2. (a) antes do envelhecimento; (b) após o envelhecimento.

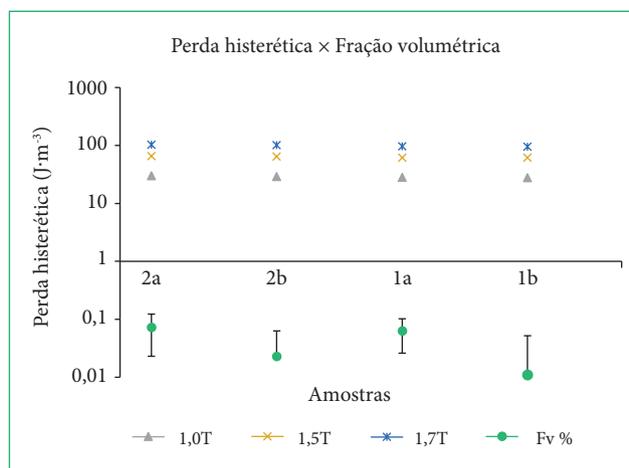


Figura 7: Fração volumétrica das amostras antes e após o envelhecimento.

CONCLUSÃO

O tratamento térmico de envelhecimento forçado nas duas amostras, com teor de carbono residual elevado, não favoreceu a precipitação de partículas para que se pudesse estudar os efeitos das perdas magnéticas em relação às amostras não envelhecidas. Em todos os casos, os valores das perdas magnéticas foram inferiores em relação às amostras envelhecidas. A microestrutura do material, por conseguinte, não foi afetada pelo tratamento térmico forçado para que se pudesse estudar os efeitos dos carbonetos em relação ao aumento da coercividade.

Diante disso, infere-se que nem todo o carbono foi precipitado na forma de carbonetos, mesmo as amostras tendo apresentado teor de carbono acima de 30 ppm. Além disso, a temperatura de trabalho não proporcionou diferença de precipitados em relação aos resultados e micrografias apresentadas. Nenhum efeito foi observado acerca do envelhecimento devido à precipitação, que ocorreu em grande parte nos contornos de grão, pouco influenciando nas perdas magnéticas.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem pelo apoio da Aperam South America Research Center.

REFERÊNCIAS

- Vilela TJS. Efeito da descarbonetação e nitretação simultâneas sobre estrutura e propriedades magnéticas de um aço silício de grão orientado. Dissertação [Mestrado em Engenharia de Materiais]. Ouro Preto (MG): Universidade Federal de Ouro Preto; 2015. [citado 19 Set. 2019]. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/7118>
- Cardoso AVM. Determinação da temperatura de recristalização secundária do aço elétrico de grão orientado produzido com baixa temperatura de reaquecimento de placa. Dissertação [Mestrado em Engenharia de Materiais]. Ouro Preto (MG): Universidade Federal de Ouro Preto; 2017. [citado 19 Set. 2019]. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/9984>
- Liao C-C, Hou C-K. Effect of nitriding time on secondary recrystallization behaviors and magnetic properties of grain-oriented electrical steel. *J Magn Mater.* 2010;322(4):434-42. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2009.09.072>
- Miranda PS. Evolução microestrutural de um aço HGO 3% Si ao longo do recozimento de descarbonetação. Dissertação [Mestrado em Ciência dos Materiais]. Rio de Janeiro (RJ): Instituto Militar de Engenharia; 2012. [citado 19 Set. 2019]. Disponível em: <https://pdfslide.net/documents/evolucao-microestrutural-de-aco-hgo-3si-ao-longo-do.html>
- Silveira CC. Influência da quantidade e morfologia da faialita e sílica nas características de um aço elétrico de grão orientado. Dissertação [Mestrado em Engenharia Metalúrgica]. Belo Horizonte (MG): Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais; 2011. [citado 19 Set. 2019]. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8MSG6D>
- Almeida AA. Influência do envelhecimento nas perdas dos aços não orientado. Tese [Doutorado em Ciências]. São Paulo (SP): Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Metalúrgica e de Materiais; 2018. <https://doi.org/10.11606/T.3.2018.tde-03102018-150435>
- Campos MF de, Emura M, Landgraf FJG. Consequences of magnetic aging for iron losses in electrical steels. *J Magn Mater.* 2006;304(2):593-5. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.02.185>
- Landgraf FJG. Nonoriented Electrical Steels. *JOM.* 2012;64(7):764-71. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0356-7>
- Cardoso RFA. Aços elétricos de alto silício por imersão a quente: análise do processo e da microestrutura. Tese [Doutorado em Ciência dos Materiais]. Rio de Janeiro (RJ) Instituto Militar de Engenharia; 2010. [citado 19 Set. 2019]. Disponível em: http://www.ime.eb.mil.br/arquivos/teses/se4/cm/Rodrigo_Felix.pdf
- Santos JP. Influências do ângulo de corte e da anisotropia nas propriedades magnéticas nos aços elétricos – o efeito textura. Dissertação [Mestrado em Engenharia Elétrica]. Uberlândia (SP): Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica – FEELT; 2005. [citado 19 Set. 2019]. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14406>
- Negri GMR. Estudo de caso de envelhecimento magnético em aços elétricos de grão não orientado de baixa eficiência. Dissertação [Mestre em Engenharia Elétrica]. Florianópolis (SC): Universidade Federal de Santa Catarina; 2011. [citado 19 Set. 2019]. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/95579>
- Marra KM, Buono VTL. Variação das perdas magnéticas durante envelhecimento de um aço elétrico. *Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais.* 2006;3(1):36-9. <https://doi.org/10.4322/tmm.00301008>