

PERDAS HISTERÉTICAS EM AÇO-SILÍCIO E SUA DEPENDÊNCIA COM A DEFORMAÇÃO¹

Marcos Fukuhara²
Taeko Yonamine³
Carlos Alberto Senna⁴
Frank Patrick Missell⁵

Resumo

Apresentamos resultados para perdas histeréticas em chapas de aço silício que sofreram diferentes reduções na espessura por laminação e também em chapas que sofreram posterior recozimento. Foram determinadas as propriedades magnéticas, o tamanho de grão e a textura cristalográfica por difração de elétrons retro-espalhados (EBSD). A relação entre a microestrutura e os mecanismos de magnetização é discutida. Os dados são confrontados com um modelo onde a perda histerética é dividida em parcelas de alta e baixa indução.

Palavras-chave: Aço elétrico; Perda histerética; Permeabilidade; Textura cristalográfica.

HYSTERESIS LOSSES IN SILICON STEEL AND THEIR DEPENDENCE ON DEFORMATION

Abstract

We present results for hysteresis losses in silicon steel sheets whose thickness had been reduced by rolling and also in sheets which had been annealed. The magnetic properties were determined as well as the grain size and the crystallographic texture by electron backscatter diffraction. The relation between microstructure and magnetization mechanisms is discussed. The data are confronted with a model where the hysteresis loss is divided into high and low induction parts.

Key words: Electrical steel; Hysteresis loss; Permeability; Crystallographic texture.

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

² *Bacharel, Inmetro-Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.*

³ *Doutor, Inmetro-Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.*

⁴ *Técnico, Inmetro-Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.*

⁵ *Doutor, UCS-Universidade de Caxias do Sul.*

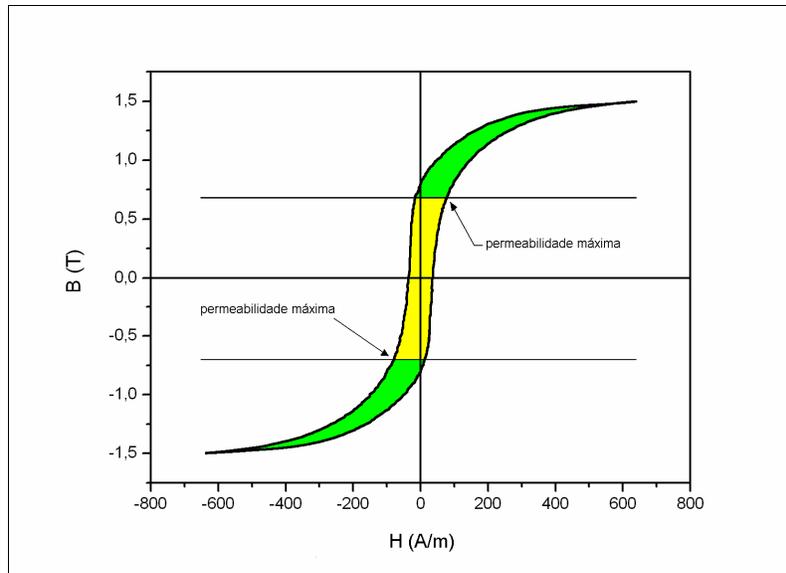
1 INTRODUÇÃO

O modelo de perdas magnéticas utilizado há décadas no desenvolvimento de novos tipos de aço elétrico, as divide em três parcelas:⁽¹⁾ a perda histerética, a perda parasita clássica e a perda de excesso. Os efeitos das características elétricas e dimensionais do material sobre a perda parasita clássica são bem aceitos. Buscando um maior entendimento dos mecanismos de dissipação de energia devido à histerese magnética, foi proposta uma subdivisão da perda histerética,^(2,3,4) obtida em regime quase-estático, em parcelas de alta indução (AI) e baixa indução (BI), com o objetivo de relacioná-las às características microestruturais do material. Neste trabalho apresentaremos os resultados até o momento obtidos nesta instituição em lâminas de aço GNO cortadas na direção de laminação. Em trabalhos já realizados foi visto que tamanho de grão influencia com maior intensidade na parcela de baixa indução do que na alta. Já a textura cristalográfica predomina mais na alta do que na baixa indução.⁽⁴⁾ O aumento do tamanho de grão age principalmente na redução da perda histerética, pois quanto maiores os grãos, menos contornos de grão existirão, sendo um dos responsáveis em impedir a livre movimentação das paredes entre domínios.

Pesquisas⁽⁵⁾ relacionam, numa visão mais aprofundada, que a movimentação irreversível de paredes entre domínios predominam na região próxima ao campo coercivo, enquanto a nucleação, aniquilação de domínios ocorrem em regiões onde a indução tem maior intensidade, sendo mais afetadas pela textura cristalográfica. Em altas induções predomina a rotação de domínios.⁽⁶⁾ O encruamento adquirido pelo material devido ao processo de laminação está relacionado ao aumento da densidade de discordâncias. Qualquer obstáculo à livre movimentação das paredes entre domínios aumenta a perda. Então as discordâncias também reduzem a movimentação das paredes entre domínios resultando no aumento da perda. Para a recuperação das propriedades magnéticas do material deformado é realizado um tratamento térmico, que irá promover a recristalização, crescimento e nucleação de novos grãos, alterando sua textura cristalográfica, reduzindo a perda magnética.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foi proposto⁽²⁻⁴⁾ uma subdivisão de perdas que consiste na determinação da indução $B(\mu_{max})$ para a permeabilidade máxima $\mu_{max}=B/\mu_0H$, obtida no primeiro quadrante da curva de histerese traçada em regime quase-estático, no ramo onde a intensidade do campo magnético aumenta. Traça-se uma linha horizontal em $B(\mu_{max})$. O mesmo é feito simetricamente no terceiro quadrante. Desta maneira delimita-se a região relacionada à baixa indução, localizada entre as retas traçadas, e a de alta indução, resultante da soma da parte que está acima da reta superior e abaixo da reta inferior. Na Figura 1 temos uma representação destas retas as regiões subdivididas. Assim pode-se determinar o valor da perda relacionado à baixa indução, calculando-se a área entre as retas, representada na cor amarela, sendo expresso em J/m^3 quando estamos utilizando o Sistema Internacional de Unidades (SI). Analogamente calcula-se a soma das áreas representadas em verde, obtendo-se o valor da perda de alta indução.



Fonte: Inmetro

Figura 1. Subdivisão da histerese em regiões de Alta indução (verde) e Baixa indução (amarelo).

Neste estudo foi utilizado um aço de grão não orientado (GNO) com 2% de silício, totalmente processado, cedido pela Arcelor Mittal, previamente cortado na direção de laminação (RD) em lâminas de comprimento de 300mm; largura de 30mm e espessura de 0,5mm. As dimensões foram expressas em milímetros por ser prática comum nesta especialidade. A seguir foram laminadas a frio em várias taxas de deformação. A redução na espessura r_{esp} é calculada a partir os valores de espessura inicial $e1$ e final $e2$ conforme a equação abaixo.

$$r_{esp} = 1 - \frac{e2}{e1} \quad (1)$$

Em seguida as lâminas foram cortadas na metade, sendo que uma metade sofreu um recozimento (760°C/2h, resfriamento lento), realizado em um forno a vácuo. A laminação e tratamento térmico foram realizados no IPT-SP. Desta maneira temos dois grupos de amostras: as amostras laminadas e as amostras recozidas, sendo que estas foram laminadas e recozidas.

Para a determinação das propriedades magnéticas foi utilizado o sistema de medição MPG-100D da Brockhaus equipado com um sensor de lâmina única (Single Sheet Tester-SST) e fluxímetro para a realização de medidas em corrente contínua, sendo configurado para a execução na indução máxima de 1,5 T. As lâminas a serem medidas no SST foram cortadas no tamanho 100mm x 30mm. Para cada amostra houve a repetição de cinco vezes. Partes menores foram preparadas para a caracterização metalográfica por microscopia óptica convencional, consistindo no embutimento em baquelite, lixamento até a meia espessura, polimento com pasta diamantada e polimento final com sílica coloidal.

A determinação do tamanho de grão foi realizada após a determinação da textura cristalográfica, e orientada pela norma específica.⁽⁷⁾ Na revelação dos contornos de grão as amostras foram atacadas com Nital 5%. Para cada amostra foram selecionadas aleatoriamente cinco regiões, e em cada região foram traçadas cinco linhas de testes para a contagem de interseções. A determinação das texturas

cristalográficas foram feitas no microscópio eletrônico por varredura Quanta 200 da FEI equipado com sistema EBSD da TexSEM Laboratories (TSL). A caracterização magnética, EBSD, metalografia e sua preparação foram realizados nos equipamentos em operação no Inmetro.

3 RESULTADOS

Na Tabela 1a são apresentados os resultados das amostras deformadas: μ_{max} , B_{max} , os valores obtidos da subdivisão em parcelas de AI e BI, a perda histerética, o campo coercivo H_c . As mesmas informações estão na Tabela 1b acrescido pelo tamanho de grão (TG) das amostras tratadas termicamente.

Tabela 1a. Resultados das amostras laminadas. Fevereiro/2009.

r_{esp} (%)	μ_{max}	$B(\mu_{max})$ (T)	AI (J/m ³)	BI (J/m ³)	Perda Hist. (J/m ³)	H_c (A/m)
0,0	14197	920.8	146	97	243	31,5
2,1	1709	479.7	339	203	543	101,0
3.8	1589	452.7	382	199	581	110,1
5,6	1472	453.0	408	212	620	115,3
13,4	1097	452.4	519	278	797	150,3
16,7	920	417.5	570	283	853	166,8
20,2	875	424.4	652	293	945	179,7
33,7	628	439.3	831	438	1269	237,3
51,7	481	465.7	1151	624	1775	308,6
61,0	476	513.3	1205	698	1903	342,0
67,8	484	531.9	1132	788	1921	346,9

Fonte: Inmetro.

Tabela 1b. Resultados das amostras recozidas. Fevereiro/2009.

r_{esp} (%)	μ_{max}	$B(\mu_{max})$ (T)	AI (J/m ³)	BI (J/m ³)	Perda Hist. (J/m ³)	H_c (A/m)	TG (μ m)
0,0	14197	920,8	146	97	243	31,5	72
2,1	5896	593,5	220	111	331	42,4	68
3.8	5730	660,1	206	139	346	47,1	72
5,6	5744	634,5	221	123	344	47,2	71
13,4	8753	678,7	159	81	240	32,4	114
16,7	8675	722,4	163	101	263	35,9	82
20,2	7677	6819	182	105	288	38,7	63
33,7	9077	1002,6	127	206	333	50,7	37
51,7	3133	456,0	349	113	462	61,7	26
61,0	3228	502,4	341	139	480	64,7	23
67,8	1988	379,5	457	133	590	79,0	20

Fonte: Inmetro.

3.1 Resultados das Amostras Laminadas

Pelos dados obtidos listados na Tabela 1a das amostras laminadas obtivemos os gráfico a seguir (Figuras 2 a 5). Observando a Figura 2, vemos que existe uma dependência linear entre r_{esp} e H_c . Na Figura 3 os dados mostram que μ_{max} tende a um valor mínimo à medida que r_{esp} cresce.

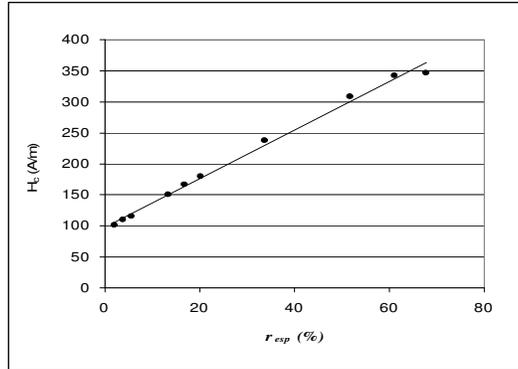


Figura 2. H_c em função da redução da espessura r_{esp}

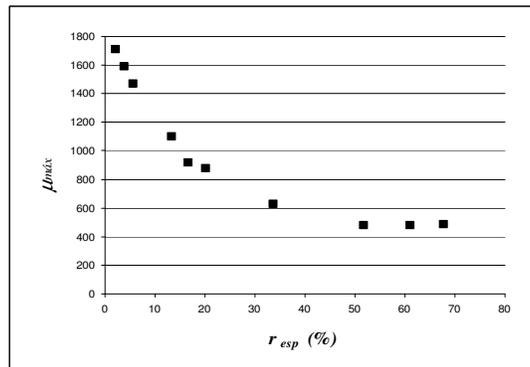


Figura 3. μ_{max} em função da redução da espessura r_{esp} .

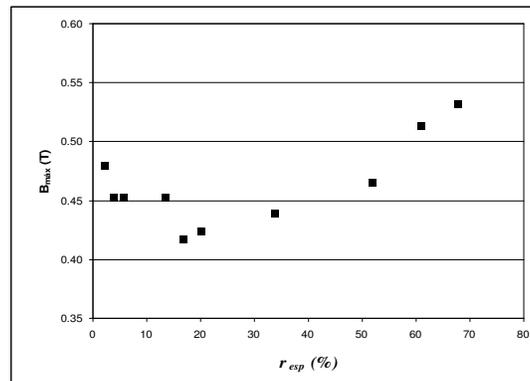


Figura 4. $B(\mu_{max})$ em função da redução da espessura r_{esp} .

Acima, na Figura 4, temos ao que parece uma região no qual existe um r_{esp} que fornecerá um $B(\mu_{max})$ mínimo. Al sempre foi superior a BI para todos r_{esp} , como mostra a Figura 5.

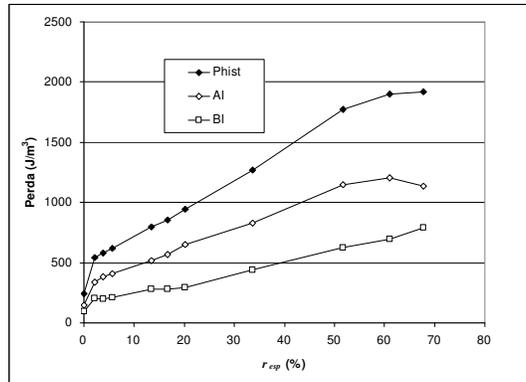


Figura 5. Perda em função da redução da espessura r_{esp} .

3.2 Resultados das Amostras Recozidas

Pelos dados obtidos listados na tabela 1b das amostras recozidas obtivemos os gráficos a seguir (Figuras 6 a 8).

Pode-se ver na Figura 6 que somente uma amostra, com r_{esp} igual a 13,4% exibiu um H_c próximo ao medido na lâmina como recebida ($r_{esp} = 0\%$), 32,4 A/m e 31,5 A/m, respectivamente.

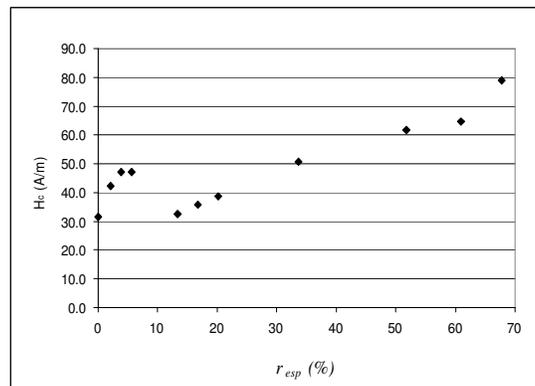


Figura 6. H_c em função da redução da espessura r_{esp} , após recozimento.

Continuando a comparação, nesta mesma amostra verificou-se um grande crescimento de grão (de $72\mu\text{m}$ p/ $114\mu\text{m}$) após o recozimento. As amostras com $r_{esp} = 2,1\%$, $3,8\%$ e $5,6\%$ não apresentaram grande variação no tamanho de grão final após o recozimento, pois não é observada a nucleação de novos grãos, talvez por se tratar de aço totalmente processado. Após o pico relacionado à $r_{esp} = 13,4\%$, a partir do qual começam a surgir novos grãos, o tamanho reduz-se com o aumento de r_{esp} (Figura 7).

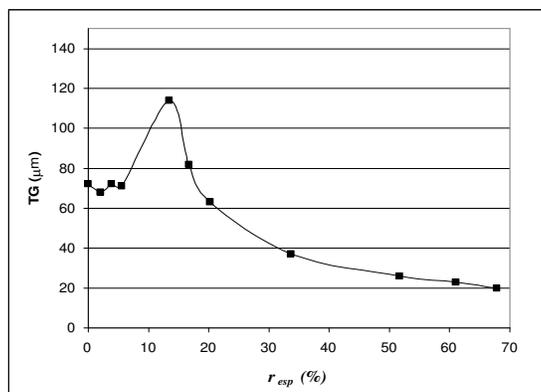


Figura 7. Tamanho de grão Gráfico final em função da redução da espessura r_{esp} , após recozimento.

Al é inferior a BI para $r_{esp}=33,7\%$, como mostra o gráfico na Figura 8.

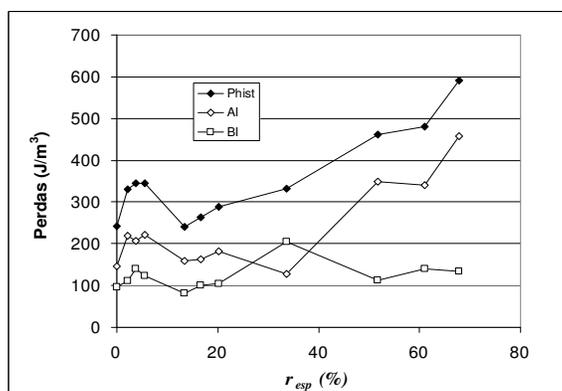


Figura 8. Perda em função da redução da espessura r_{esp} , após recozimento.

4 DISCUSSÃO

O comportamento das propriedades magnéticas das lâminas deformadas esteve dentro do esperado. A deformação implica no aumento da densidade de discordâncias, e estas irão promover o ancoramento das paredes entre domínios durante o processo de magnetização, resultando principalmente no aumento das perdas, redução da permeabilidade, aumento de H_c . Como sempre é visto, mas não muito compreendido, uma pequena deformação inicial causa uma grande piora nas propriedades magnéticas do material. Em todas as lâminas a parcela Al sempre contribuiu com 60% a 70% na perda histerética. Analisando os resultados da determinação da estrutura cristalográfica por EBSD^(8,9) visto que deformações até $r_{esp} = 13,4\%$ não alteraram profundamente a textura cristalográfica em comparação com a lâmina como recebida. As representações da função de distribuição de orientações (ODF) para seções $\Phi_2=45^\circ$ estão exibidas nas Figuras 9a e 9b.

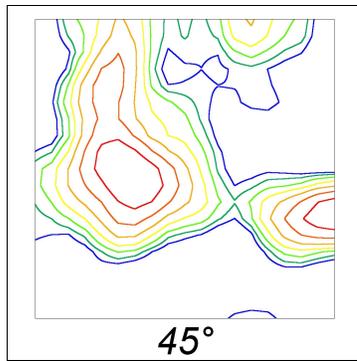


Figura 9a. ODF como recebida

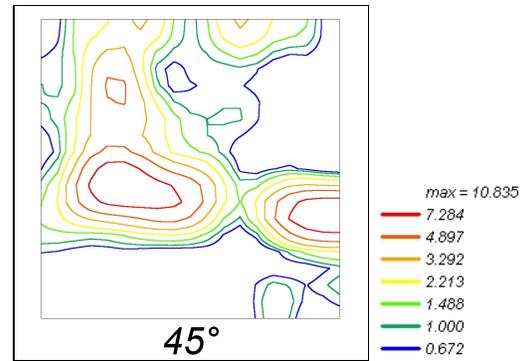


Figura 9b. ODF para $r_{esp} = 13,4\%$

Deformações maiores se caracterizaram pelo desaparecimento da orientação (110) paralela à superfície da lâmina, sendo que todas se assemelhavam à que está na Figura 10.

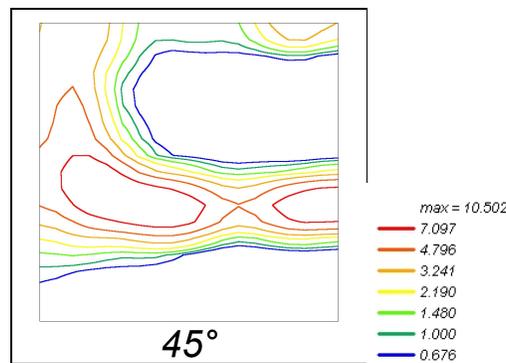


Figura 10. ODF para $r_{esp} = 67,8\%$

Após o recozimento, na lâmina com $r_{esp} = 13,4\%$ a perda histerética e o H_c não sofreram mudanças significativas de valor em comparação com a lâmina como recebida. A parcela de Al aumentou aproximadamente 10%. A redução de $B(\mu_{max})$ após o recozimento implicou na redução da parcela de BI.

As lâminas com r_{esp} inferiores a 13,4% apresentaram o aparecimento de pouca orientação (110) paralela à superfície da lâmina. Deste valor e acima apresentaram um considerável aparecimento desta orientação, em alguns casos apresentando a textura "Goss",⁽⁹⁾ que contribuem na melhora das propriedades magnéticas na direção de laminação. Nas Figuras 11 e 12 são exibidos alguns exemplos. Para as outras amostras a imagem é semelhante. As lâminas com r_{esp} iguais a 2,1%, 3,8%, 5,6% não resultaram em grande variação no TG após o recozimento, pois não houve a nucleação de novos grãos, exibidos na figura 7, talvez por se tratar de aço totalmente processado. Após o pico no TG relacionado $r_{esp} = 13,4\%$, a partir do qual começaram a nuclear novos grãos, o TG reduziu com o aumento de r_{esp} , ocasionando valores de perdas gradativamente maiores.

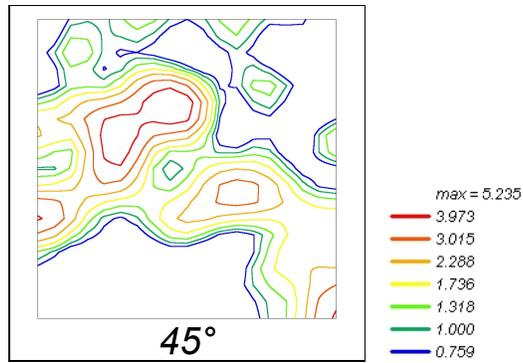


Figura 11. ODF para $r_{esp} = 13,4\%$

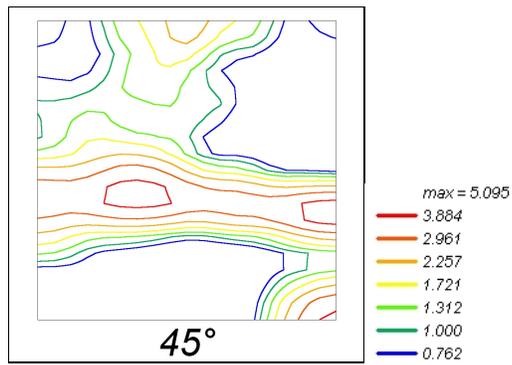


Figura 12. ODF para $r_{esp} = 67,8\%$

Na maioria das amostras recozidas verificamos não houve uma recuperação completa. Isto pode ser observado pelo EBSD por meio de degradês na cores que identificam a orientação do grão. Isto é devido à pequena desorientação desta região em relação ao resto do grão. Para r_{esp} maior que 51,7% não é mais possível observar este degradê. Na Figura 13 temos o mapa OIM (Orientation Imaging Microscopy) de um dos casos.

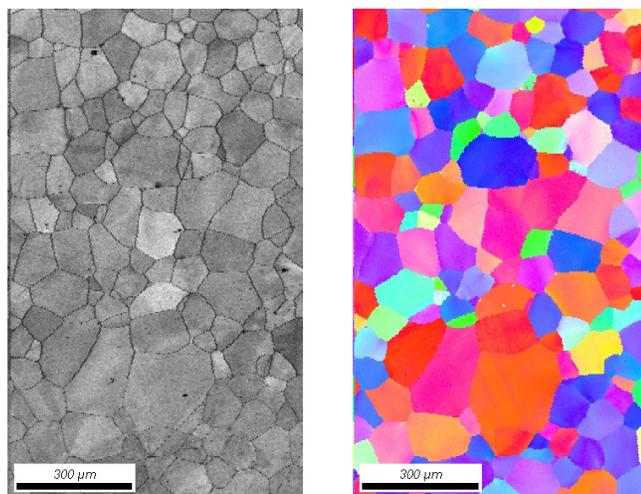


Figura 13. OIM de um trecho da lâmina com $r_{esp} = 3,8\%$.

5 CONCLUSÃO

Conforme os resultados apresentados, observamos que dependendo da deformação sofrida pelo material, a maneira como as contribuições das parcelas A1 e B1 mudam após o recozimento variam. Em uma das amostras recozidas verificamos que a parcela B1 é superior a A1, indicando que para este caso a rotação de domínios contribuiu menos que a movimentação de paredes entre domínios. O recozimento não foi o suficiente para a recuperação total das amostras. Com um tempo ou temperatura maiores acreditamos em tamanhos de grão maiores e melhores propriedades magnéticas.

Foi possível promover um grande crescimento de grão após o processo de laminação e posterior recozimento da lâmina com $r_{esp} = 13,4\%$, com recuperação das propriedades magnéticas perda histerética e H_c aos valores iniciais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq/Prometro, IPT, N. A. Castro e Arcelor Mittal.

REFERÊNCIAS

- 1 BERTOTTI G. Hysteresis in Magnetism: For Physicist Materials Scientist and Engineers. Academic Press, San Diego, 1998.
- 2 LANDGRAF, F. J. G., TEIXEIRA, J. C., EMURA, M., de CAMPOS M. F., MURANAKA C. S. Separating components of the hysteresis loss of non-oriented electrical steels. Materials Science Forum v. 302, pp. 440-445, 1999.
- 3 LANDGRAF F. J. G., CAMPOS M. F., LEICHT J. Hysteresis loss subdivision. Journal of magnetism and magnetic materials v. 320, pp. 2494-2498, 2008.
- 4 LANDGRAF, F. J. G., EMURA, M., TEIXEIRA, J. C., de CAMPOS M. F. Effect of grain size, deformation, aging and anisotropy on hysteresis loss of electrical steels. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 215-216, pp. 97-99, 2000.
- 5 HALLER T. R., KRAMER J. J., "Model for Reverse-Domain Nucleation in Ferromagnetic Conductor". Journal of Applied Physics 41-3, pp. 1036-1037, 1970.
- 6 CULLITY, B.D. Introduction to Magnetic Materials, Massachusetts: Addison-Wesley, 1972.
- 7 NBR 11568: Determinação o tamanho de grão em materiais metálicos. Rio de Janeiro, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990.
- 8 HUMPHREYS F. J. Review Grain and subgrain characterisation by electron backscatter diffraction. Journal of Materials Science 36, pp. 3833 – 3854, 2001.
- 9 PARK J. T., SZPUNAR J. A. Evolution of recrystallization texture in nonoriented electrical steels. Acta Materialia 51, pp. 3037–3051, 2003.