



VISUALIZAÇÃO DE DOMÍNIOS MAGNÉTICOS EM AÇOS DE GRÃO ORIENTADO UTILIZANDO EFEITO KERR¹

Thomas Seiji Pascoto Nishikawa²
Daniel Luiz Rodrigues Junior³
Fernando José Gomes Landgraf⁴
João Ricardo Filipini da Silveira⁵
Antonio Domingues dos Santos⁶
Taeko Yonamine Fukuhara⁷

Resumo

Este trabalho discute as estruturas *de domínios* magnéticos observadas em aços de grão orientado. Foi utilizado o efeito Kerr para visualizar tais estruturas, nas quais foi detectada uma orientação fora do usual para as paredes de domínio. O crescimento se deu perpendicular à direção do campo magnetizante, contrariando a expectativa lógica.

Palavras-chave: Aços de grão orientado; Efeito Kerr; Contorno de grão; Domínios magnéticos.

VISUALIZATION OF MAGNETIC DOMAINS IN GRAIN ORIENTED STEEL USING KERR EFFECT

Abstract

This paper discusses the magnetic structures observed in grain oriented silicon steel. Keer effect was used to visualize such structures, in which unusual orientation of the domain walls was detected. The growth was perpendicular to the direction of the magnetic field, contrary to the expected.

Key-words: Grain oriented steel; Kerr effect; Grain boundaries; Magnetic domains.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Aluno Graduando – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica, Universidade São Paulo – USP.

³ Mestre em Engenharia de Materiais – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica, Universidade São Paulo – USP.

⁴ Professor Doutor – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica, Universidade São Paulo – USP.

⁵ Bacharel em Engenharia de Materiais – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica, Universidade São Paulo – USP.

⁶ Professor Doutor – Instituto de Física, Universidade São Paulo – USP.

⁷ Diretoria de Metrologia Científica e Industrial – Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro – INMETRO.

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de materiais magnéticos é das mais extensas no campo da indústria elétrica.⁽¹⁾ Dentre esses materiais merecem destaque os aços elétricos. Estes aços não são usados na condução de corrente elétrica, mas sim fluxo magnético, que circula no interior do material. Esses materiais são magneticamente moles e sua aplicação se dá na forma de chapas usadas na confecção de dispositivos elétricos, tais como núcleos de transformadores e motores elétricos.

Os aços de grão orientado (GO) possuem forte textura cristalográfica onde a grande maioria dos cristais que compõem a chapa tem planos {110} paralelos à superfície da mesma, com a direção <001> paralela à sua direção de laminação. Isso confere forte anisotropia às propriedades magnéticas do material fazendo com que este exiba características ótimas apenas na direção de laminação. É o material mais indicado para a construção de grandes transformadores, onde a chapa é submetida a um campo magnético unidirecional que pode ser alinhado à direção longitudinal da chapa.

Tendo em mente a importância dos aços de grão orientado, foi realizada uma pesquisa para estudar o comportamento superficial das estruturas dos domínios magnéticos, presentes ao longo da amostra de aço de grão-orientado quando há variação de campo externo, principalmente nas regiões de paredes de domínio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental do trabalho consistiu de duas etapas, a preparação da amostra, e a visualização dos domínios magnéticos no microscópio de transmissão longitudinal. Ambas as etapas que estão descritas abaixo tem como objetivo gerar imagens que permitam avaliar a estrutura de domínios magnéticos em aços elétricos durante o ciclo de magnetização e desmagnetização da amostra.

2.1 Preparação da Amostra

A amostra de aço de grão orientado utilizada no trabalho foi fornecida gentilmente pelo Inmetro. Para a execução da preparação metalográfica, a amostra foi cortada em pequenos corpos de prova que foram embutidos em baquelite.

A etapa de preparação consiste em uma seqüência de lixamento e polimento da superfície dos corpos de prova para a remoção de riscos e óxido superficiais. O lixamento foi conduzido com lubrificação em água e lixas de carbetto de silício na granulometrias 360, 800 e 1200. A seqüência de polimento usou pastas de diamante de granulometrias 6 µm, 3 µm e 1 µm como abrasivo e álcool etílico como lubrificante.

Para dar melhor acabamento à superfície dos corpos de prova, amostra foi novamente polida, porém dessa vez foi como abrasivo uma solução de sílica coloidal com partículas de 0,06µm adicionada de pasta de diamante de tamanho de 0,25 µm, o polimento se deu em uma Minimet por 80 minutos. Logo após isso a amostra foi polida novamente com sílica coloidal 0,06 µm só que desta vez sem a pasta de diamante misturada na solução. Novamente o equipamento usado nessa etapa de polimento foi uma Minimet, porém o tempo de polimento dessa vez foi de duas horas. Após essas sucessões de polimentos, a amostra foi lavada com água destilada.

2.2 Visualização dos Domínios Magnéticos

As imagens de domínios magnéticos foram geradas no Laboratório de Materiais Magnéticos do Instituto de Física da Universidade de São Paulo – IFUSP. Para a obtenção dessas fotos foi utilizado um microscópio de transmissão longitudinal, no qual a luz entra em um plano inclinado a amostra e incide na mesma, o que causa a polarização perpendicular da luz incidente graças a magnetização da chapa. A partir dessa polarização, que se dá em direções opostas para sentidos opostos de magnetização é possível visualizar, calibrando duas lentes de modo a destacar sentidos opostos de uma direção, os domínios magnéticos que possuem esses sentidos opostos.⁽²⁾

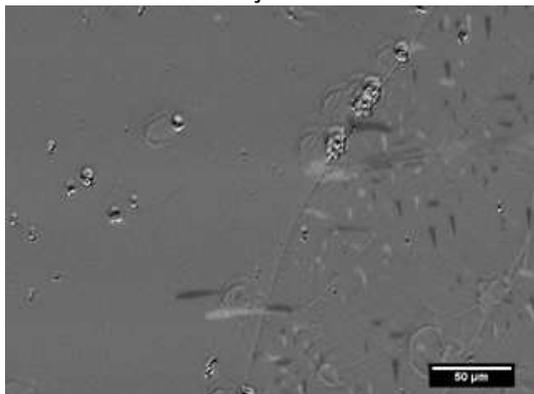
Esse microscópio possui também um sistema de criação de campo magnético acoplado a amostra de modo a permitir a variação de magnetização da mesma tanto em intensidade como em direção, enquanto a amostra é observada. O equipamento é ligado a um computador dotado de um software para tratamento de imagens de modo a melhorar o contraste e remover detritos superficiais que possam dificultar a visualização. Dentre as fotos tiradas, as que foram utilizadas neste trabalho apresentam um aumento de 50 vezes.

3 RESULTADOS

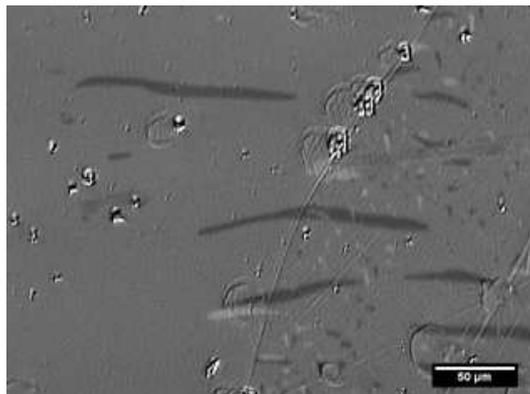
No microscópio óptico de efeito Kerr longitudinal foram tiradas sequências de fotos, variando a posição de onde foram tiradas as fotos entre as sequências. Por exemplo a primeira seqüência (Figura 1), que está logo a abaixo, foi escolhida por apresentar um contorno de grão cortando a amostra ao meio. Nela o campo externo aparece paralelo à direção de laminação como pode ser observado nos quadros abaixo, onde a direção de laminação e o campo externo estão na vertical da foto. O campo externo foi variado de intensidade até que ocorresse inversão do sentido do campo externo para o inverso do inicial, sem que houvesse variação da direção das componentes do campo.

A segunda (Figura 2) e terceira (Figura 3) seqüências apresentam o mesmo esquema da primeira, possuindo mesmas direções de laminação e direções do campo magnético, no entanto, como comentado anteriormente as duas seqüências de fotos foram tiradas em outra região. As amostras apresentam-se inicialmente magnetizadas em um sentido e com a inversão do campo externo é possível visualizar a variação dos domínios magnéticos até chegarmos quase na saturação magnética no sentido oposto da magnetização inicial. A segunda seqüência foi escolhida nesse local pelo caráter peculiar do comportamento dos domínios magnéticos frente ao contorno de grão enquanto a terceira seqüência foi escolhida por apresentar um ponto triplo, ou seja um ponto onde há o encontro de três grãos diferentes. Vale ressaltar que ambas as fotos não chegaram até o valor de campo externo de saturação magnética, portanto é natural que haja a presença de alguns domínios magnéticos remanescentes da magnetização inversa.

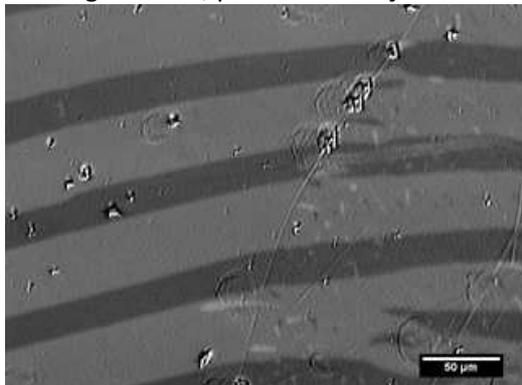
1 – Próximo à saturação.



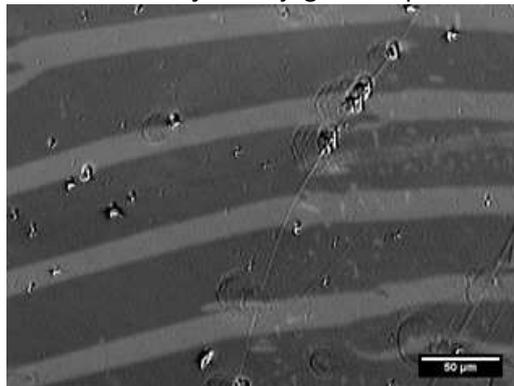
2 – Crescimento de domínios remanescentes.



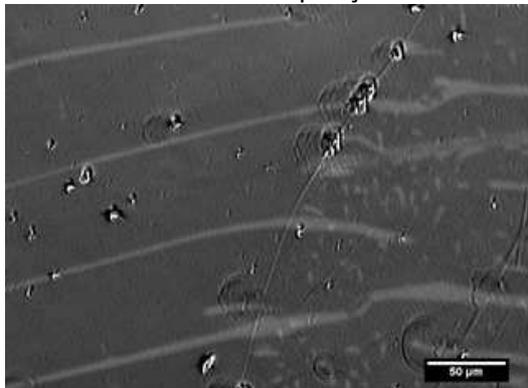
3 – Estrutura típica de material desmagnetizado, porém na direção errada.



4 – Movimentação conjugada de paredes.



5 – Proximidades da aniquilação de domínios.



6 – Novamente a saturação.

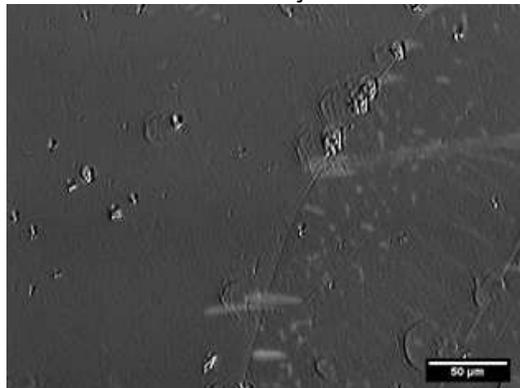
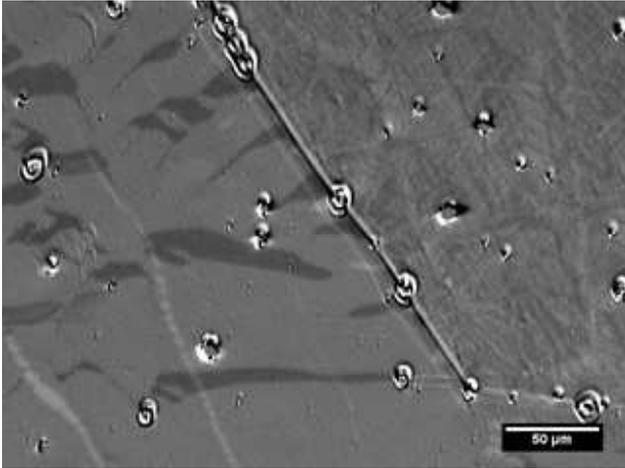
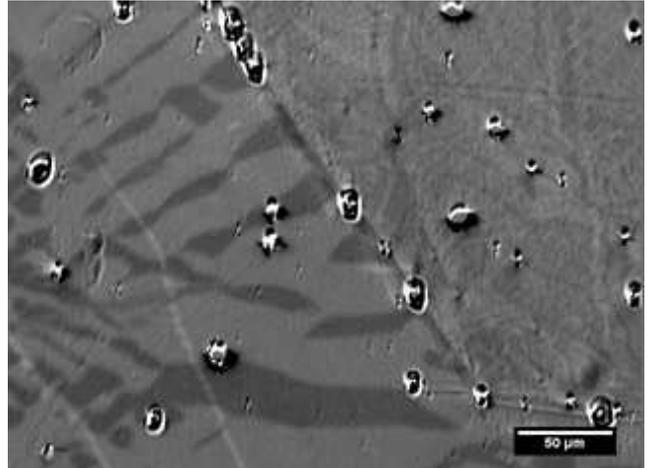


Figura 1 – Estrutura de domínios magnéticos visualizados por efeito Kerr. O contraste é dado ao longo da direção vertical (diferenças de orientação da magnetização ao longo da direção horizontal e normal ao plano de folha não são reveladas). As fotos foram capturadas de acordo com uma histerese magnética. A primeira foto apresenta domínios residuais às proximidades da saturação magnética; a segunda mostra o seu crescimento à medida que o campo externo decresce; a terceira mostra a estrutura estável quando o campo é quase nulo; e por fim, nas fotos seguintes, torna-se a aumentá-lo, porém no sentido contrário ao inicial. Notam-se as estruturas de domínios conjugados – domínios de mesmo tamanho e orientação em grãos vizinhos, cujo crescimento ocorre simultaneamente.

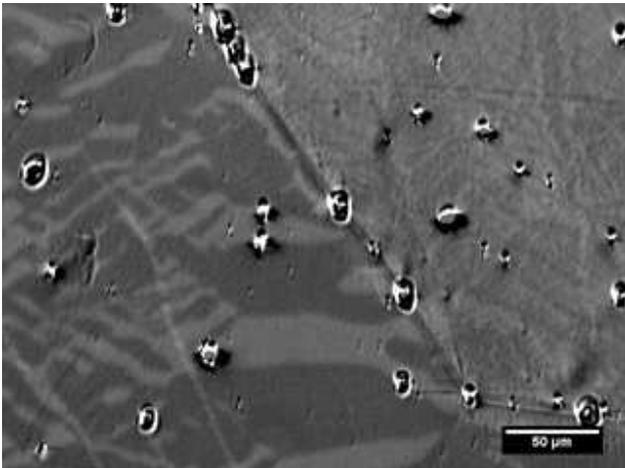
1



2



3



4

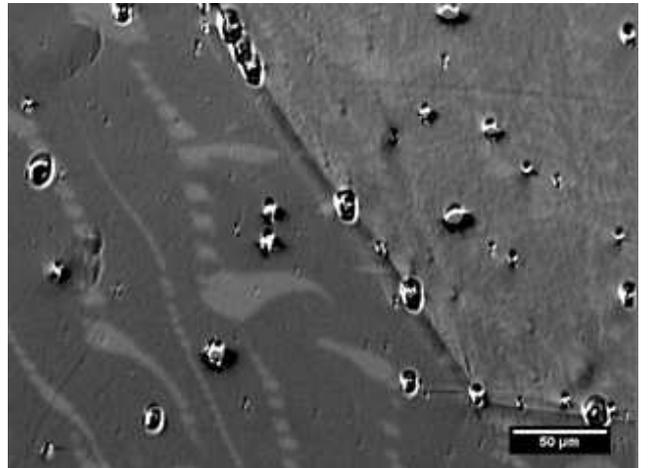


Figura 2 Segunda sequência – Devido à presença de inclusões, diferenças pronunciadas de orientação entre grãos e tensões residuais, a estrutura não é tão regular como na primeira sequência.

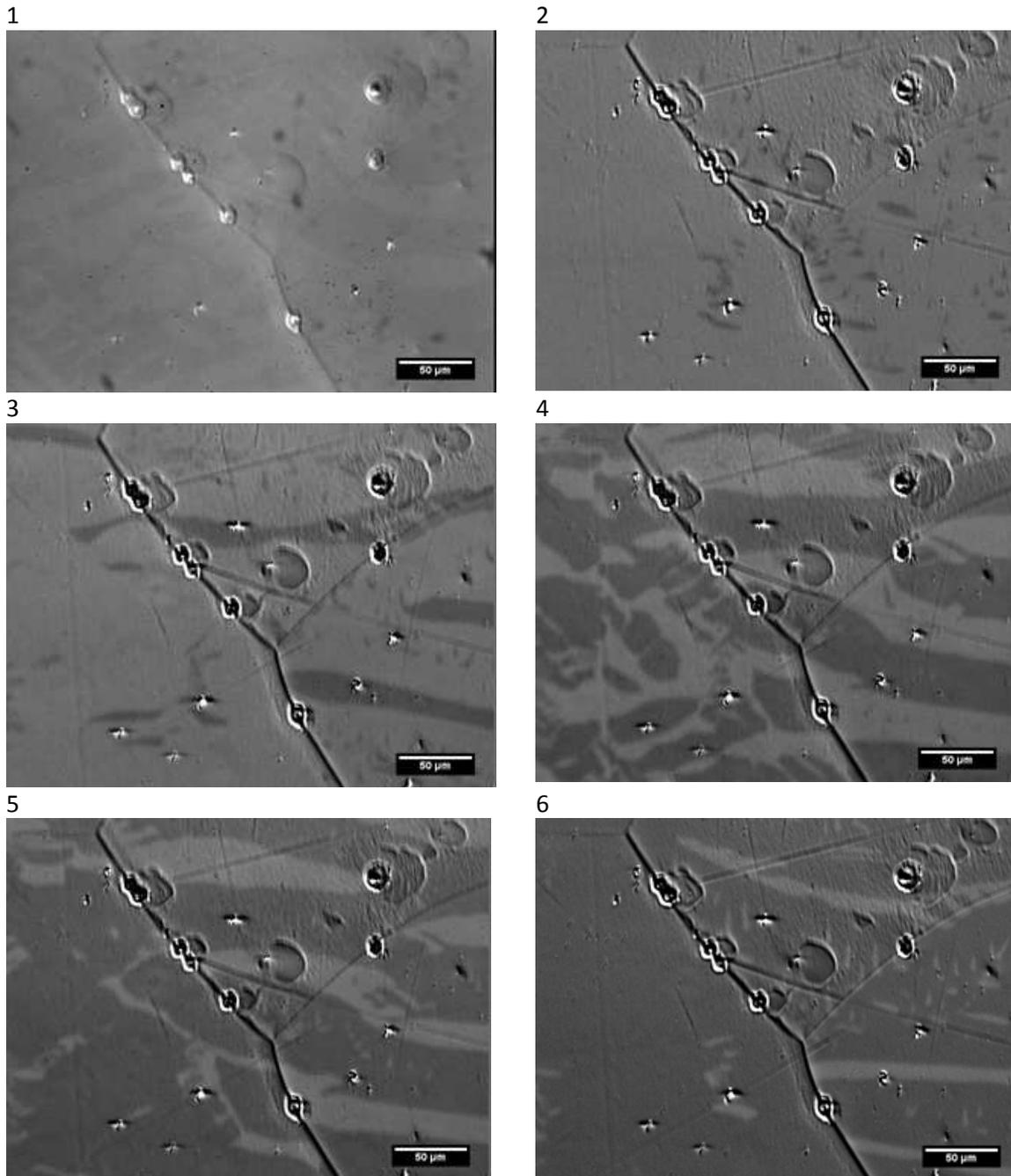


Figura 3 Terceira seqüência – Outro ponto triplo, apresentando estrutura complexa à esquerda e domínios conjugados na horizontal à direita (vide imagem 4).

4 DISCUSSÃO

Pelo que podemos notar claramente nas imagens, há um caráter diferenciado entre as paredes separando os grãos, como observado na primeira e visível em parte na terceira seqüência em um caso a parede influencia pouco e os domínios magnéticos aparecem contínuos, como se os dois grãos na verdade fossem apenas um, isso se dá ao fato dos grãos estarem acoplados. Grãos aparecem acoplados graças ao fato de apresentarem diferença mínima entre as suas ordenações cúbicas o que gera essa configuração de domínios magnéticos. O outro caráter, presente na segunda seqüência e também visto em parte na terceira é uma quebra na continuidade dos domínios magnéticos quando frente a um contorno de grão, essa



quebra é comum quando um grão apresenta uma diferença significativa entre os ângulos das ordenações atômicas cúbicas em relação ao grão do outro lado da parede .

Outro detalhe mais importante a ser considerado é o fato de que os domínios magnéticos estarem se desenvolvendo na direção perpendicular a direção do campo externo, fato extremamente inesperado que contraria o que a teoria afirma.⁽³⁾ Isso dá possivelmente ao fato de que a amostra apresente uma tensão residual que se originou em alguma etapa do processo, como a laminação ou o embutimento. Como sabemos de estudos anteriores, aços de grão orientado são extremamente suscetíveis a deformações o que pode resultar em alterações significativas em suas propriedades magnéticas.⁽⁴⁾

Essa tensão residual pode ter sido a causa da inconsistência observada, tendo alterado a direção fácil de crescimento dos domínios magnéticos, o que causaria os domínios magnéticos de se desenvolverem na mesma direção do campo externo. No entanto não podemos ter certeza de que a tensão residual foi a causa, é necessário um aprofundamento melhor nesse assunto para podermos concluirmos com absoluta certeza a razão da anormalidade observada.

5 CONCLUSÃO

A partir do trabalho podemos concluir que as amostras fornecidas apresentaram caráter estranho quanto ao crescimento de domínios magnéticos, apresentando crescimento perpendicular ao campo externo aplicado. Uma das possíveis causas é o fato da amostra possuir tensão residual, possibilitando que os domínios se desenvolvam desse modo anormal. Contudo como foi discutido acima não há como ter certeza de que isso foi a causa e portanto esse assunto merece um estudo mais aprofundado.

Agradecimentos

Instituto de Física da Universidade São Paulo – USP
Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro – Inmetro.

Referências

- 1 CHIAVERINI, V.: “Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos e principais tipos”, ABM – Associação brasileira de metalurgia e materiais, 7ª edição , São Paulo – 2005.
- 2 HUMBERT, A, SCHÄFER, R., “Magnetic Domains, The Analysis of Magnetic Microstructure”, Editora Springer, 1998, página 29.
- 3 HUMBERT, A, SCHÄFER, R., “Magnetic Domains, The Analysis of Magnetic Microstructure”, Editora Springer, 1998, página 414.
- 4 LANDGRAF, F. J. G , CASTRO, N. A. , CAMPOS, M. F. de , “Effect of deformation and annealing on the microstructure and magnetic properties of grain-oriented electrical steels”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 304, 2006, e617–e6