

# CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE AÇOS COM CARBONETO ESFEROIDIZADO USANDO RÚIDO MAGNÉTICO BARKHAUSEN<sup>1</sup>

Eduardo Franco de Monlevade<sup>2</sup>  
Marcos Flávio de Campos<sup>3</sup>  
Julio Capo<sup>5</sup>  
Linilson Rodrigues Padovese<sup>4</sup>

## Resumo

Quando aço perlítico é tratado termicamente em temperaturas em torno de 700°C, o carboneto cementita ( $Fe_3C$ ) assume formato esférico. Neste estudo, um aço alto carbono (0.729%C) foi tratado nas temperaturas de 700°C, 720°C e 740°C durante 12 horas, gerando microestruturas com diferentes tamanhos de carboneto esferoidizado. A amostra foi caracterizada com Ruído Magnético Barkhausen. Os resultados mostram que as diferentes microestruturas geram diferentes efeitos de "pinning" (ancoramento de paredes de dominios). A análise do envelope obtido a partir do ruído magnético Barkhausen aponta que o carbonetos da amostra tratada a 740°C geram menos efeito de ancoramento. A amostra tratada a 740°C apresenta menor número de inclusões, portanto o efeito de ancoramento é menos intenso.

**Palavras-chave:** Ruído Magnético Barkhausen; Inclusões; Ensaio não destrutivo; ancoramento.

## MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF STEELS WITH SPHEROIDIZED CARBIDE USING MAGNETIC BARKHAUSEN NOISE

### Abstract

When a pearlitic steel is treated at temperatures close to 700°C, cementite ( $Fe_3C$ ) acquires a spheroidal shape. In the present study, a high-carbon steel high carbon steel (0.729%C) was annealed at 700°C, 720°C and 740°C during 12 hours, generating different carbide particle sizes. The sample was characterized using Magnetic Barkhausen Noise. The results show that different microstructures cause different pinning effects on the magnetic domain walls. The analysis of the signal envelop obtained from Magnetic Barkhausen noise indicates that carbides in the sample treated at 740°C cause less pinning effect. The sample treated at 740°C has a smaller quantity of inclusions, so the pinning effect is less intense.

**Key words:** Magnetic Barkhausen noise; Inclusions; Non-destructive testing; pinning.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Mangels Industrial S/A, Divisão Aços, São Paulo, Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil.

<sup>4</sup> Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

<sup>5</sup> Professor. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

## 1 INTRODUÇÃO

O Ruído Magnético Barkhausen (RMB, ou Magnetic Barkhausen Noise - MBN) é uma ferramenta bastante adequada para a caracterização microestrutural de materiais magneticamente moles.<sup>(1-3)</sup> No entanto, o efeito de cada parâmetro microestrutural diferente no RMB ainda precisa ser melhor compreendido. Foi encontrado um forte efeito da geometria da amostra no sinal de RMB.<sup>(4)</sup> Os dados obtidos nas análises de RMB só são comparáveis se as amostras tiverem exatamente o mesmo volume, e mesmo variações muito pequenas de espessura podem produzir ambiguidades. O sinal de RMB apresenta grande sensibilidade tanto à geometria da amostra quanto aos aspectos microestruturais, e investigações do efeito da microestrutura sempre devem ser feitas tomando-se cuidado para que não haja variações dimensionais entre as amostras.<sup>(5)</sup>

Neste trabalho, o efeito de inclusões de carbonetos no Ruído Magnético Barkhausen é estudado. Amostras de um aço com alto teor de carbono (0,729%C) de composição próxima à eutetóide, todas com a mesma espessura, foram submetidas a tratamento térmico em altas temperaturas durante 12 horas, gerando uma dispersão de carboneto de ferro ( $Fe_3C$ ) com diferentes tamanhos médios de partícula.

Aços alto carbono, quando submetidos a tratamentos térmicos em altas temperaturas durante tempo suficiente, próximo à temperatura da transformação de CCC para CFC, adquirem uma estrutura de carbonetos esferoidizados (isso ocorre mesmo que a estrutura de partida seja perlítica).

O efeito das partículas de segunda fases nas propriedades magnéticas depende fortemente do tamanho de partícula.<sup>(6,7)</sup> Segundo Dijkstra e Wert,<sup>(6)</sup> o efeito de ancoramento por partículas de carbonetos é máximo para partículas cuja dimensão é da mesma magnitude da espessura da parede de domínio magnético (1.000 – 2.000 ângstrons). Porém, Michal e Slane<sup>(9)</sup> sugerem que o efeito máximo de ancoramento ocorre para precipitados da ordem de 1  $\mu m$ .

O experimento de esferoidização em aços ajuda a esclarecer essa questão. Quando o aço carbono é aquecido a aproximadamente 700°C por várias horas, a cementita assume a forma esferoidal. Partículas de carboneto com forma esférica são ideais para testar as teorias de Dijkstra e Wert, uma vez que essas teorias utilizam a hipótese de partículas de segunda fase esféricas.

## 2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A liga utilizada neste estudo foi um aço comercial DIN-C75S. A composição química do aço usado é dada na Tabela 1. Para a obtenção das estruturas esferoidizadas, amostras temperadas e revenidas foram extraídas de uma linha de têmpera contínua e submetidas a ciclos de recozimento em fornos industriais de alta convecção do tipo caixa. As amostras foram amarradas a bobinas de aço e colocadas à meia-altura do forno. Os tratamentos térmicos foram realizados sob atmosfera de hidrogênio para evitar descarbonetação e aumentar a troca de calor dentro do forno. Três ciclos diferentes foram usados, sendo todos compostos de um patamar isotérmico de 12 horas seguido de resfriamento lento. As temperaturas de recozimento são dadas na Tabela 2.

**Tabela 1.** Composição química da liga usada neste estudo

%C	%Mn	%Si	%Al
0.729	0.610	0.230	0.054
%P	%S	%Cr	%Mo
0.011	0.001	0.32	0.004

**Tabela 2.** Temperaturas de recozimento às quais cada amostra foi submetida

Sample	Temperature (°C)
1 (J)	700
2 (D)	720
3 (N)	740

As amostras foram lixadas até a grana 600, e polidas em suspensão de alumina de 1,0 e 0,05  $\mu\text{m}$ . A observação metalográfica foi feita em um microscópio óptico Zeiss Observer Z1m.

As medidas de sinal de RMB foram feitas utilizando-se um equipamento portátil chamado “BarkTech”, construído para o projeto do qual este estudo faz parte.

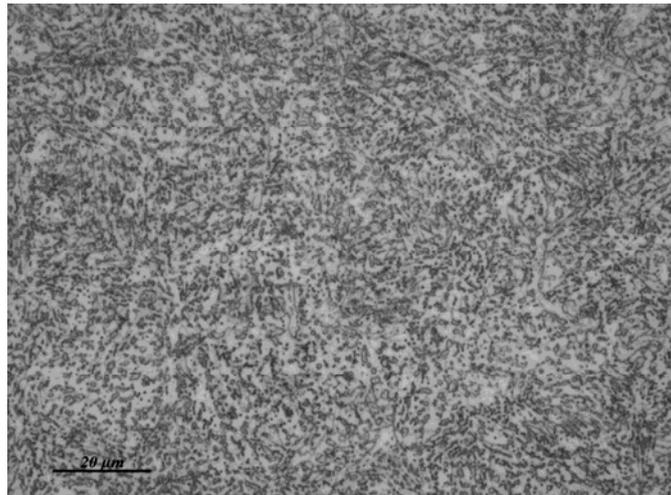
Os dados foram obtidos usando uma onda magnética senoidal de 10 Hz e um campo magnético de  $1.2 \cdot 10^4$  A/m. O sinal de RMB foi detectado usando uma bobina de aquisição. A saída do sensor de RMB foi amplificada e filtrada em um filtro de banda (1-150 kHz). O “yoke” de magnetização, bobina de aquisição e as amostras foram colocadas em uma caixa de aço aterrada para redução do ruído ambiental.

A bobina de aquisição, usada para medir a componente normal do sinal RMB, foi construída enrolando-se um fio condutor em volta de um pequeno eixo central feito de plástico. Foi dada atenção especial à capacitância parasita do condutor, para manter essa característica constante ao longo de todo o enrolamento da bobina.

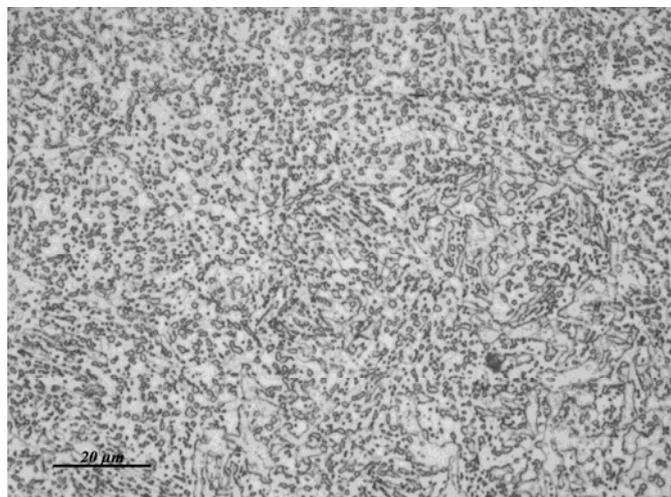
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como se pode observar a partir das microestruturas (Figuras 1, 2 e 3), o experiment foi bem sucedido ao isolar o tamanho de partícula como a variável mais relevante estudada. Uma outra variável possível é o tamanho de grão, mas o efeito dominante aqui observado é devido às partículas de segunda fase.

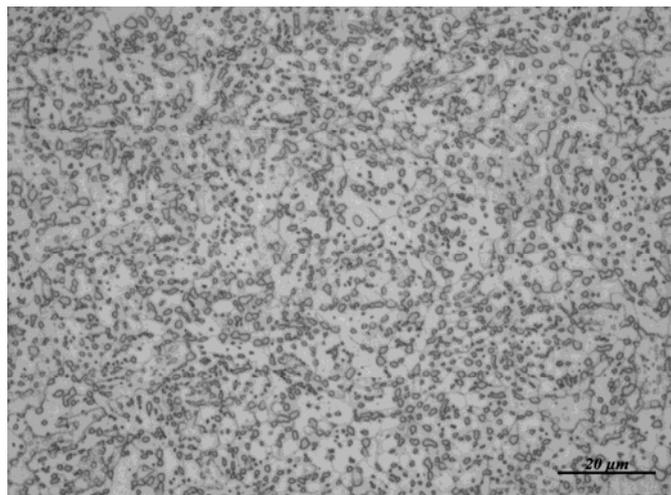
Quando a temperatura de tratamento é aumentadas, a quantidade de partículas diminui, e seu tamanho aumenta (fenômeno conhecido como “Ostwald Ripening”). O tamanho de grão também aumenta com a temperatura de tratamento. Como conseqüência, a quantidade de sítios de ancoramento é mais alta para a amostra J, tratada à temperatura mais baixa, e o valor de  $\text{MBN}_{\text{rms}}$  (esta grandeza está com a sigla em inglês no gráfico devido ao fato de o programa de análise de dados estar em inglês) também é mais alto para essa amostra, conforme pode ser visto nas Figuras 4, 5 e 6. Uma menor intensidade de sinal  $\text{MBN}_{\text{rms}}$  é interpretada como um efeito de ancoramento de paredes de domínio magnético menos intenso.<sup>(10)</sup>



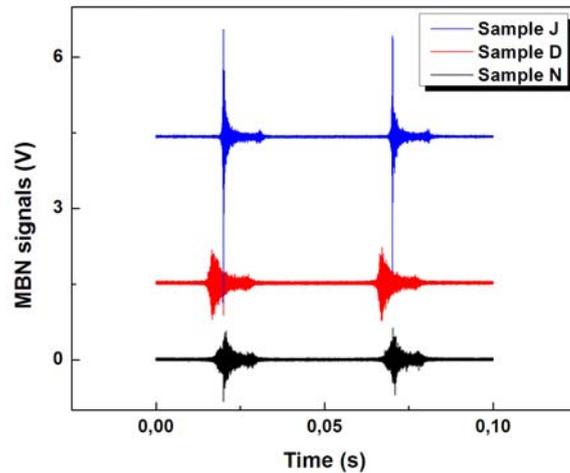
**Figura 1.** Microestrutura da amostra J (tratada a 700°C).



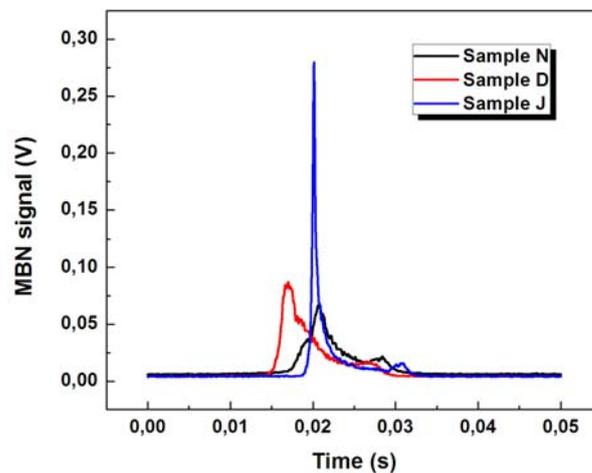
**Figura 2.** Microestrutura da amostra D (tratada a 720°C).



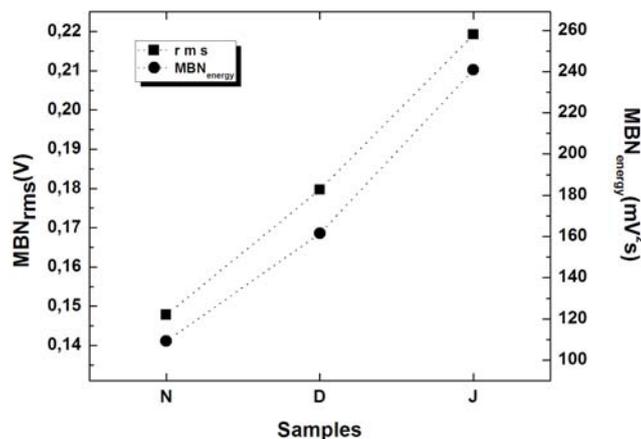
**Figura 3.** Microestrutura da amostra N (tratada a 740°C).



**Figura 4.** Sinal RMB (em inglês, MBN, medido em Volts) em função do tempo (s). Temperaturas: N(T=740°C), D(T=720°C), J (700°C). Condições de medida:  $f=10\text{Hz}$ ,  $I=1.6\text{A}$ .



**Figura 5.** Envelope do sinal RMB. Temperaturas: N(T=740°C), D(T=720°C), J (700°C). Condições de medida:  $f=10\text{Hz}$ ,  $I=1.6\text{A}$ .



**Figura 6.** MBN<sub>rms</sub> para as amostras N, D e J. Todas as amostras foram tratadas por 12 horas. Temperaturas: N(T=740°C), D(T=720°C), J (700°C). Condições de medida:  $f=10\text{Hz}$ ,  $I=1.6\text{A}$ .

Os resultados mostrados nas Figuras 4, 5 e 6 refletem diretamente os efeitos do tamanho de partículas de segunda fase. Com o aumento da temperatura de

tratamento, ocorre um aumento do tamanho médio de partículas, diminuindo assim a quantidade de sítios de ancoramento.

As microestruturas das amostras são mostradas nas Figuras 1, 2 e 3. A amostra N (Figura 3) apresenta um grande tamanho médio de partículas de carboneto, da ordem de micrometros, ao passo que a amostra J (Figura 4) apresenta o menor tamanho médio de partículas. Uma vez que a amostra N não é a amostra com maior efeito de ancoramento, os dados parecem suportar a teoria de Dijkstra e Wert<sup>(6)</sup> (que postulam que o ancoramento máximo ocorre para precipitados de aproximadamente 1.000 a 2.000 angstroms), em detrimento da teoria de Michal e Slane,<sup>(9)</sup> segundo a qual o ancoramento máximo ocorre com precipitados da ordem de micrometros.

A teoria do ancoramento<sup>(7,11)</sup> prevê que a força coercitiva é proporcional à fração volumétrica das partículas de segunda fase. Todas as amostras estudadas têm frações volumétricas iguais de carbonetos, pois são todas do mesmo aço, com o mesmo teor de carbono. A diferença nas características magnéticas (RMB), observadas nas Figuras 4-6, deve então ser atribuída ao tamanho de partícula da segunda fase (e, em menor escala, ao tamanho de grão da matriz ferrítica).

#### 4 CONCLUSÕES

Utilizando o Ruído Magnético Barkhausen, foi possível detectar diferenças microestruturais no mesmo aço (0,729%C), recozido pelo mesmo tempo (12 horas), em diferentes temperaturas (700, 720 e 740°C).

Os dados obtidos parecem estar em concordância com a teoria de Dijkstra e Wert,<sup>(6)</sup> que prevê uma força coercitiva maior para partículas de segunda fase com dimensão da mesma magnitude da espessura das paredes de domínio magnético.

#### Agradecimentos

MF de Campos agradece ao CNPq e à FAPERJ. LR Padovese agradece ao CNPq.

#### REFERÊNCIAS

- 1 D.C. Jiles. Czechoslovak Journal of Physics Volume 50 (2000), 893-924,
- 2 Ranjan R, Jiles D C, Rastogi P K 1987 *IEEE Trans. Magn.* **Mag-23** 1869.
- 3 J. Anglada-Rivera, L.R. Padovese and J. Capó-Sánchez. *J. Magn. Magn. Mater.* **231** (2001), p. 299.
- 4 M F de Campos, F A Franco, R Santos, F S da Silva, S B Ribeiro, J F C Lins, L R Padovese. Magnetic Barkhausen Noise in quenched carburized steels *Journal of Physics: Conference Series* **303** (2011) 012030.
- 5 M F de Campos, M A Campos, F J G Landgraf, L R Padovese. Anisotropy study of grain oriented steels with Magnetic Barkhausen Noise. *Journal of Physics: Conference Series* **303** (2011) 012020.
- 6 L.J. Dijkstra, C. Wert, *Phys. Rev.* 79 (1950) 979
- 7 M. F. de Campos, M. Emura, F. J. G. Landgraf. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 304 (2006) e593–e595
- 8 B.A. Lilley, *Philos. Mag.* 41 (1950) 792.
- 9 G.M. Michal, J.A. Slane, *Met. Trans. A* 17A (1986) 1287
- 10 Perez-Benitez, J.A., Capó-Sánchez, J., Anglada-Rivera, J., Padovese, L.R. *J. Magn. Magn. Mater.* 288 (2005) 433 – 442.
- 11 L. Neel, *Physica* 15 (1–2) (1949) 225.