

CARACTERIZACION DEL COMPORTAMIENTO ELASTOPLASTICO DE ACEROS ESTRUCTURALES CON DIFERENTE CONTENIDO DE CARBONO

Characterization of the elastic-plastic behavior of structural steels with different carbon content.

RESUMEN

En este trabajo se estudió el comportamiento elastoplástico de aceros estructurales con diferentes contenidos de carbono, a través del Ruido Magnético de Barkhausen (MBN). Se encontró que la envolvente de la energía de MBN (MBN_{energy}) sin esfuerzo, es directamente influenciada por el contenido de carbono. Además se demostró que existe una fuerte correlación entre el coeficiente de anisotropía magnética (k) y la curva de ensayo mecánico de tracción. Estos efectos se explicaron teniendo en cuenta la dinámica del movimiento de paredes de dominios combinados con los efectos del contenido de carbono y la tracción mecánica sobre la densidad de dislocaciones en el material. Estos resultados demuestran la aplicabilidad del MBN como ensayo no destructivo.

PALABRAS CLAVES: Aceros, Comportamiento Elastoplástico, Ensayo no Destructivos, Ruido Barkhausen,.

ABSTRACT

The elastic-plastic behavior of structural steels with different content of carbon was studied with the Magnetic Barkhausen Noise method. The envelope of the MBN_{energy} was directly affected by the carbon content in the free-stress case. A strong correlation between the magnetic anisotropy coefficient and the stress-strain testing curve was found. Those behaviors are explained regarding the domain wall dynamics by the combined effects carbon content and stress on the dislocations density in the material. The results shown that MBN can be used as non destructive testing method.

KEYWORDS: Elastic-plastic behavior, Magnetic Barkhausen Noise, Non destructive Testing, , steels

MANUEL ALBERTERIS

Licenciado en Física, M. Sc.

Doctorando

Universidad de São Paulo, Brasil

alberteris@yahoo.com

JULIO CAPO

Licenciado en Física, Ph.D.

Profesor Titular

Universidad de Oriente, Cuba

LINILSON PADOVESE

Ingeniero Mecánico, Ph.D.

Profesor Asociado.

Universidad de São Paulo, Brasil

1. INTRODUCCIÓN

El Ruido Magnético de Barkhausen (MBN) surge cuando un material ferromagnético como el acero es sometido a un campo magnético variable, produciéndose el movimiento discreto de las paredes de los dominios magnéticos [1]. Cambios producidos en la micro estructura, como la variación del contenido de carbono y deformaciones elásticas y plásticas, afectan considerablemente el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos, y consecuentemente las características del MBN [2].

Para la industria es muy importante conocer como será la respuesta de un acero después de ser llevado a algún tipo de deformación elastoplástica. Y si de hecho aparecerá algún fenómeno no deseado, como lo son las bandas de Lüder [3].

Utilizando estas premisas para aplicar el Ruido de Barkhausen como ensayo no destructivo, se llevo a cabo el estudio de la evolución elastoplástica de chapas de acero estructural tal y como salen del proceso de producción, para 3 contenidos de carbono diferentes, 1006, 1050 y 1070.

Fecha de Recepción: 23 Mayo de 2007

Fecha de Aceptación: 3 Agosto de 2007

2. MATERIALES Y METODOS

Fueron seleccionadas muestras en forma de chapa rectangular de aceros ANSI 1006, 1050 y 1070. Su composición química aparece en la Tabla 1.

	1006	1050	1070
C	459	517	711
Mn	259	686	966
P	10,5	15,7	18
S	9	4	2,3
Si	4,8	195	321
Al	34	42,2	38
Cu	1,5	13	6,6
Cr	9	15,1	182
Ni	6,5	8,7	36,9
Mo	1,8	1,3	2,2
Ti	0,9	1,8	3,7
Nb	1,8	1,9	2

Tabla 1. Composición (wt. 10^{-3} %)

Las chapas se cortaron en dos direcciones, dirección de laminación RD y transversal a esta TD, con dimensiones (25 mm x 250 mm x 0.97 mm).

Esas muestras fueron sometidas a tensiones uniaxiales, a una razón de deformación de aproximadamente 0.5 mm/min. Estas se midieron libre de esfuerzo (0 MPa) y sometidas a cargas de tracción, realizadas en una máquina de ensayo mecánico KRATOS.

La estación con la que se realizaron las mediciones, se muestra esquemáticamente en la Fig. 1. Un ordenador personal (PC) con un dispositivo de adquisición de datos (con canales de D/A y de A/D) provee una onda sinusoidal de 10 hertzios, a una fuente bipolar Kepco BOP20-20D que a su vez alimenta el circuito magnético formado por el excitador y la muestra con un campo magnético de 1.4×10^4 A/m, suficiente para alcanzar la saturación. La señal del sensor de MBN es amplificada y filtrada por un filtro pasabanda de 1KHz hasta 100 KHz. Las señales son visualizadas en un osciloscopio digital y el dispositivo de adquisición adquiere los datos con una frecuencia de muestreo de 200KHz.

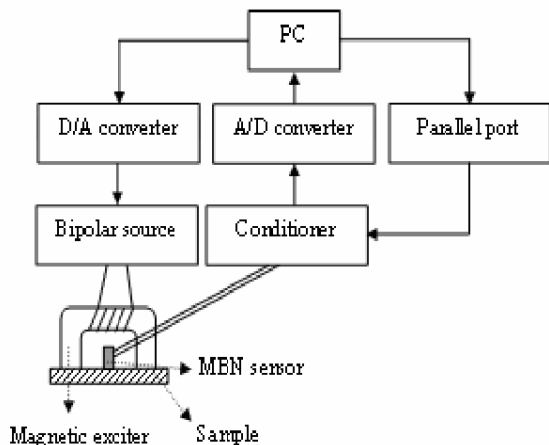


Fig. 1 Esquema de la estación de medición utilizada

De los parámetros que se utilizaron para la caracterización del material. El primero, la energía del MBN (MBN_{energy}), resultado de la integral del cuadrado del voltaje de todos los acontecimientos (avalanchas) de MBN. Esta magnitud primero se calcula para las 3 medidas del MBN de cada punto de la muestra y luego se promedia. Usando un nivel de voltaje umbral, como se puede ver en la Fig. 2. Un segundo parámetro es el área bajo la curva de la distribución de las amplitudes de las avalanchas (A_{dist}) en su intervalo óptimo. Este intervalo fue escogido siguiendo el ajuste de los valores de la MBN_{energy} con la ecuación [4].

$$MBN_{energy} = \alpha \cos^2(\theta - \phi) + \beta \quad (1)$$

donde θ es el ángulo entre el campo magnético aplicado y la dirección en la que es aplicado el esfuerzo mecánico y α , ϕ y β parámetros de ajuste. El parámetro α representa la componente anisotrópica de la MBN_{energy} , la cual es producida por la fracción de las paredes de dominios de

180° que contribuyen al ángulo de la dirección de fácil magnetización. Este parámetro responde al comportamiento anisotrópico de la energía del MBN. El parámetro β representa la componente isotrópica de la MBN_{energy} . Los datos fueron medidos con un sistema de sensor-excitación rotatorio.

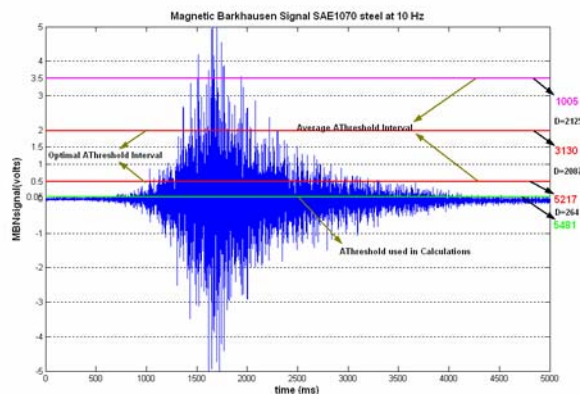
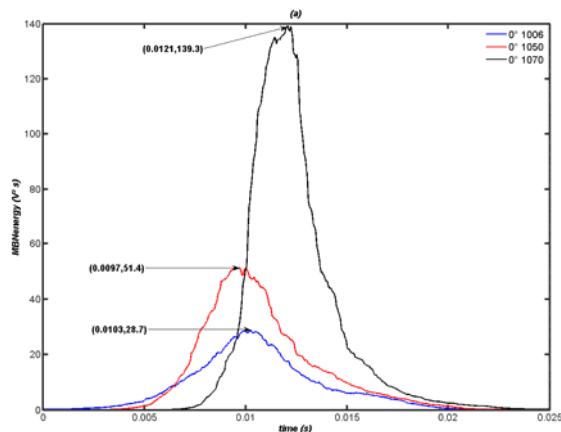


Fig. 2 Señal del MBN

3. RESULTADOS

Los aceros al carbono presentan de forma general una microestructura compuesta de ferrita más perlita. En estado normal tal y cual salen de la fábrica, los granos del material están orientados en la dirección de laminación. Dentro de estos granos predomina una distribución de dislocaciones en forma plana. Estas dislocaciones crecen con el aumento del contenido de carbono haciendo que la energía de las avalanchas del MBN crezca [5].



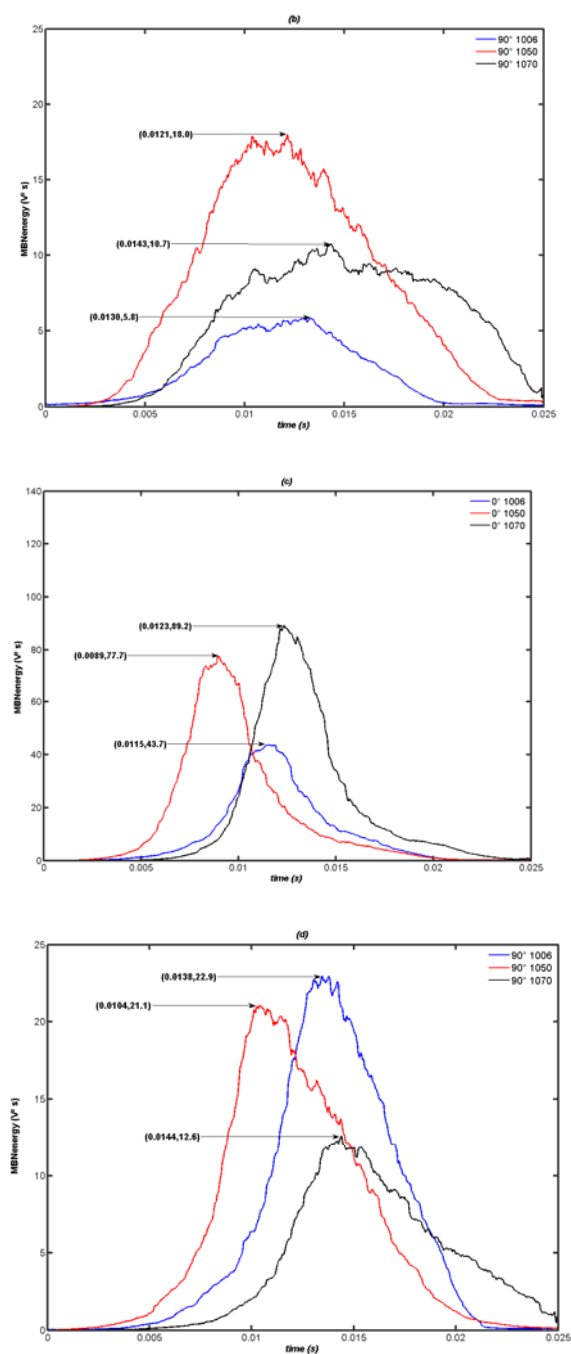


Fig. 3 Envolvente de la MBN_{energy} para: (a) 0 MPa y 0° , (b) 0 MPa y 90° , (c) 314 MPa y 0° y (d) 314 MPa y 90° .

En la Fig. 3 se observa que para 0 MPa en la dirección 0° , la MBN_{energy} es mayor para el 1070 que para 1006 y 1050, esto es debido a que la densidad de dislocaciones es mayor en el primero (debido al contenido de carbono), proporcionándose un medio favorable a la ocurrencia de avalanchas. El hecho de que el pico este más atrasado implica que se ha tenido que emplear más energía en franquear estas barreras [1]. Ya para la dirección 90° la

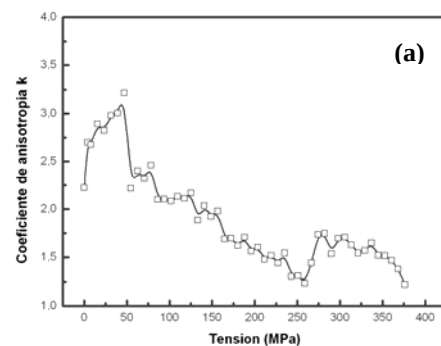
energía en 1050 es mayor pues al ser el más duro de los tres, es menor el por ciento de granos que se orientan con la laminación. Para el caso de 314 MPa (punto donde aproximadamente los tres materiales comienzan a deformarse plásticamente) las curvas del 1006 y el 1070 están más próximas en posición, ya que al ser más blandos, la densidad de dislocaciones que aumenta en ellos se hace de forma más rápida [6]. Sin embargo, el valor del pico en 1006 es mayor para 90° debido a que las tensiones en el material estimulan los procesos de nucleación de dominios, tanto en 0° como en 90° , pero para el 1050 y el 1070 la densidad de dislocaciones es tan alta que la actividad de avalanchas disminuye mas en la dirección de difícil magnetización [7].

Las deformaciones mecánicas fuerzan los granos de un material en una dirección preferencial y esto induce una anisotropía en las propiedades magnéticas del mismo. En la superficie donde la laminación es con mayor intensidad la anisotropía es mucho mayor y por ello la MBN_{energy} aumenta, pues la cantidad de dominios orientados en esa dirección es mayor y la cantidad de eventos Barkhausen y su amplitud también.

Para analizar la evolución del material en la zona elastoplástica usamos el coeficiente de anisotropía magnética. Este parámetro relaciona, las contribuciones de los dominios en las direcciones longitudinal y transversal de la muestra [8].

$$k = \frac{MBN_{energy}(0^\circ)}{MBN_{energy}(90^\circ)} \quad (2)$$

donde $MBN_{energy}(0^\circ)$ es la energía MBN en la longitudinal de la muestra, máxima en el caso de coincidir con el eje de fácil magnetización y $MBN_{energy}(90^\circ)$ es en la transversal.



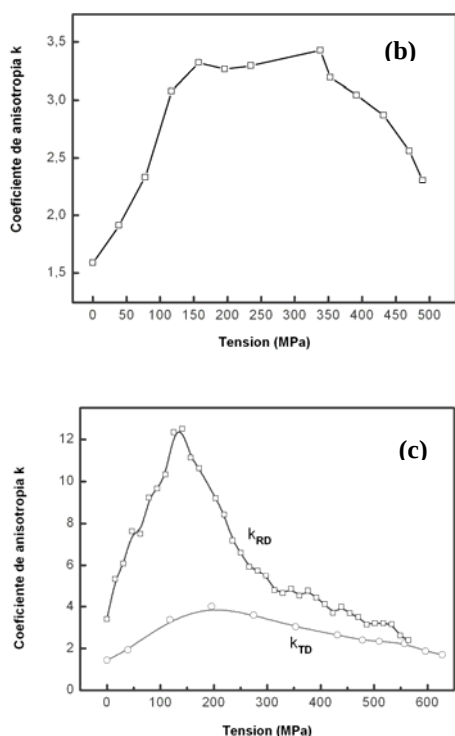


Fig. 4 Evolución del coeficiente k para: (a) RD1006, (b) RD1050 y (c) RD1070 y TD1070.

En la Fig. 4 se observa como varía el comportamiento elastoplástico con el contenido de carbono. En la Fig. 4a, el material presenta un comportamiento dúctil, típico para aceros de bajo contenido de carbono, con una pequeña región elástica y una gran zona de deformación plástica. Ya en la Fig. 4b la región elástica es mayor, observándose además una zona donde el coeficiente k no cambia con la tensión, relacionado con la aparición de bandas de Lüder [9]. Más allá de los 314 MPa el material comienza a deformarse plásticamente y los procesos de aniquilación de dominios predominan sobre los de nucleación, disminuyendo así, la amplitud y cantidad de avalanchas. Es importante señalar que a pesar de las marcadas diferencias entre ambas curvas las proporciones en las que varía la $MBN_{energy}(0^\circ)$ en el 1006 y el 1050 son similares (ver Fig.3) alcanzando valores muy parecidos de k . Para el 1070 (Fig.4c) se muestran dos curvas, una en la RD y otra en la TD, en ellas se destacan aspectos típicos del comportamiento mecánico de un acero de alto contenido de carbono. Una región elástica lineal mayor que las presentadas en el 1006 y el 1050, y una región plástica bien definida para el caso de la RD, antecedida por una región elástica no lineal. Al comparar ambas curvas es fácil ver que la región elástica de la TD termina para mayores tensiones que en la RD y el límite de resistencia del material en la TD es mayor. Al igual que en el 1050, para aproximadamente, valores de tensión mayores que 314 MPa comienzan a predominar los mecanismos de aniquilación de dominios por un aumento

en la densidad de dislocaciones, haciéndose los valores de la RD y la TD prácticamente iguales.

Aunque los puntos límites mecánicos, como el de transición elástica lineal al no lineal y el de resistencia son claramente apreciables, no ocurre así con el punto de transición entre el elástico no lineal y el plástico, de una gran importancia en la industria.

Con este propósito, en lugar del coeficiente k usamos el área bajo la curva de la distribución de los picos de amplitud media [10] resultando que el valor máximo de ésta coincide con la parte de la curva del ensayo de tracción donde el material deja de comportarse elásticamente (ver Fig. 5) y pasa a deformarse plásticamente. Esto se explica por el hecho de que la distribución de los pulsos en su parte media responde con mayor intensidad al comportamiento anisotrópico del material y hasta la parte elástica no lineal, la nucleación de dominios en la dirección de la tensión aplicada es predominante [11].

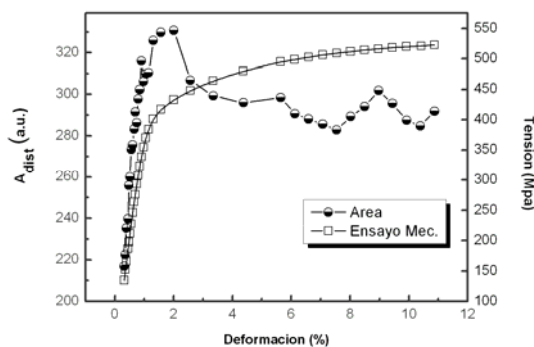


Fig. 5 A_{dist} vs. Ensayo Mecánico en RD1070.

4. CONCLUSIONES

La forma de la envolvente de la MBN_{energy} y la evolución del coeficiente de anisotropía magnética, calculados a partir del MBN, demuestran estar en correspondencia con la influencia que ejerce el contenido de carbono en el comportamiento elastoplástico de aceros estructurales. En muestras sin esfuerzo aplicado es más directa la correspondencia entre estos parámetros y el contenido de carbono. Al mismo tiempo, la MBN_{energy} y k demostraron tener un comportamiento más anisotrópico en el 1070 que para el 1006 y el 1050. Todos estos aspectos son explicados por su influencia directa en la densidad de dislocaciones del material, la cual unas veces favorece la ocurrencia de avalanchas o eventos de Barkhausen y otras los obstaculiza. Estos resultados hacen del MBN una buena herramienta para el análisis y evaluación no destructiva de materiales ferromagnéticos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la agencia Brasileira CAPES (Proceso No. 084-15/06) por el apoyo económico.

tensile loading. 9th European Conference on NDT. Berlin. 2006.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias de publicaciones periódicas:

- [1] D. C. Jiles, "Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect," *Czechoslovak Journal of Physics*, vol. 50, pp. 893-988, Apr. 2000
- [2] J. Anglada-Rivera, L. R. Padovese, J. Capó-Sánchez, "Magnetic Barkhausen Noise and Hysteresis loop in commercial carbon steel: influence of applied stress and grain size," *J. Magn. Magn. Mater.* 231, pp 299-306, 2001.
- [3] A. Dhar, L. Clapham, D.L. Atherton, "Influence of Lüder bands on Magnetic Barkhausen Noise and Magnetic Flux Leakage signals", *J. Magn. Magn. Mater.* 37, pp 2441-2446, 2002.
- [4] Thomas W. Krause, L. Clapham, and David L. Atherton, "Characterization of the magnetic easy axis in pipeline steel using magnetic Barkhausen noise", *J. Appl. Phys.* Vol. 75(12), pp 7983-7988, 1994.
- [5] J.A. Pérez-Benitez, J. Capó-Sánchez, J. Anglada-Rivera, L.R. Padovese, "A model for the influence of microstructural defects on magnetic Barkhausen noise in plain steels", *J. Magn. Magn. Mater.* 288, pp 433-442, 2005.
- [6] V. Moorthy, B. A. Shaw, J. T. Evans, "Evaluation of tempering induced changes in the hardness profile of case-carburized EN36 steel using magnetic Barkhausen noise analysis", *NDT&E International*, Vol.36, pp 43-49, 2003.
- [7] D. O'Sullivan, M. Cotterell, D. A. Tanner, I. Mészáros, "Characterization of ferritic stainless steel by Barkhausen techniques", *NDT&E International*, Vol.37, pp 489-496, 2004.
- [8] L. Clapham, C. Heald, T. Krause, D.L. Atherton and P. Clark, "Origin of the magnetic easy axis in pipeline steel", *J. Appl. Phys.*, Vol.86, No.3, pp 1574, Aug 1999.
- [9] J. Capó-Sánchez, M. Alberteris Campos, L. R. Padovese, "Magnetic Barkhausen measurements for evaluating the formation of Lüder bands in carbon steel", *NDT&E International*, Vol.40, pp 520-524, 2007.
- [10] J. A. Perez-Benitez, J. Capó-Sánchez, J. Anglada-Rivera, L. R. Padovese, "Characterization of angular dependence of macroscopic magnetic properties in ASTM 36 steel using magnetic Barkhausen noise", *NDT&E International*, Vol.40, pp 284-288, 2007.
- [11] A. Mitra, J. N. Mohapatra, A. K. Panda, A. Das, N. Narasaiah, D. C. Jiles, "Effect of plastic deformation on the magnetic properties 304 stainless steel during