

## RUIDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN: ENSAYO NO DESTRUCTIVO PARA LA EVALUACIÓN DE GRADOS DE DUREZA EN ACEROS.

### RESUMEN

En el presente trabajo es presentada la aplicación de la técnica de medición del Ruido Magnético de Barkhausen (RMB) en la caracterización del perfil de dureza producido en un ensayo Jominy. Los efectos de las alteraciones en el material (AISI 4140 y AISI 5160), producidos por este ensayo han sido observados en las mediciones de RMB, encontrándose una buena correlación entre el valor inverso del parámetro  $RMB_{rms}$  y las medidas de dureza Vickers realizadas. Los resultados presentados evidencian la viabilidad de la utilización de la técnica de medición del RMB como ensayo no destructivo en la identificación de diferentes niveles de dureza de materiales ferromagnéticos.

**PALABRAS CLAVES:** Dureza, Ensayo no destructivo, Ruido Barkhausen.

### ABSTRACT

*In the present work the application of the technique of measurement of the Magnetic Barkhausen Noise (RMB) in the characterization of the profile of hardness produced in a Jominy test is presented. The effects of the alterations in the material (AISI 4140 and AISI 5160), produced by this test have been observed with RMB measurement. A good correlation between the inverse value of the  $RMB_{rms}$  parameter and the hardness Vickers measures was found. These results demonstrate the viability of the use of the RMB technique as a non-destructive testing in the identification of different levels of hardness in ferromagnetic materials.*

**KEYWORDS:** Barkhausen Noise, Hardness, Nondestructive testing.

### 1. INTRODUCCIÓN

La industria en general, esta cada vez más interesada en obtener máxima confiabilidad y disponibilidad de sus equipos, como también controlar la calidad de sus productos. En este aspecto, las técnicas de ensayos no destructivos por su naturaleza no invasiva, son las que brinda las soluciones más adecuadas. Entre estas se encuentran las técnicas que miden las propiedades magnéticas de materiales ferromagnéticos. Así por ejemplo, en los aceros, estas propiedades son sensibles a los cambios en el material tales como la microestructura y la presencia de esfuerzos residuales. Esta sensibilidad proviene del hecho de que el proceso de magnetización en estos materiales es altamente dominado por el movimiento de las paredes de los dominios.

El ruido magnético de Barkhausen (RMB) surge cuando un material ferromagnético como el acero es sometido a un campo magnético variable. Este ruido es producido por el movimiento discreto de las paredes de los dominios magnético. Estos movimientos discretos o saltos generan pulsos magnéticos que pueden ser monitoreados por una bobina lectora colocada en la superficie del material. Cambios producidos en la microestructura afectan considerablemente el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos, y

consecuentemente las características del RMB. Irregularidades presentes en la red cristalina actúan como barreras o puntos de anclaje al movimiento de las paredes de los dominios. Los puntos de anclaje son atribuidos a diferentes parámetros físicos como, contornos de grano, vacancias, inclusiones y dislocaciones [1]. Por esta razón la técnica basada en la medición de RMB se ha venido usando como ensayo no destructivo, en la evaluación de cambios microestructurales generados en materiales ferromagnéticos.

Estudios previos realizados en aceros han demostrado que la amplitud de las emisiones de RMB aumentan con la reducción del tamaño de grano [2,3,4]. Comparaciones entre mediciones de RMB y dureza producidas por deformaciones plásticas han verificado la pertinencia de la técnica para evaluar cambios microestructurales producidas por trabajo en frío [5]. Evaluación de dureza de resortes utilizando el RMB han sido realizadas obteniéndose buenos resultados [6]. La relación entre propiedades magnéticas y microestructura en superficies endurecidas de acero han sido investigadas a través de mediciones de RMB y simulación [7]. Observando los diferentes estudios que se han realizado respecto a la utilización de la técnica de medición de RMB para evaluar estados de dureza producidos por diferentes efectos, se ve la posibilidad de su aplicación para evaluar

### FREDDY A. FRANCO G.

Ingeniero Mecánico.  
Profesor Auxiliar  
Universidad de Ibagué. Colombia.  
Estudiante de doctorado, Escuela  
Politécnica. Universidad de Sao  
Paulo. Brasil.  
freffranco@gmail.com

### LINILSON R. PADOVESE

Ingeniero Mecánico, Ph.D.  
Profesor Asociado.  
Escuela Politécnica. Universidad de  
Sao Paulo. Brasil.  
lrpadove@usp.br

gradientes de dureza producidos por tratamiento de temple. Por tal motivo el presente trabajo tiene como objetivo analizar mediciones de RMB realizadas en una probeta tipo Jominy, y realizar su correspondencia con mediadas estándares de dureza.

## 2. METODOLOGÍA.

Para la realización de los ensayos se utilizaron dos tipos de materiales, AISI 4140 y AISI 5160. De cada material fue maquinada una probeta para ensayo Jominy de 25.4mm diámetro y 101.6mm de longitud según la geometría especificada en la norma ASTM225 [8]. El procedimiento de temple fue desarrollado siguiendo las recomendaciones citadas en dicha norma. Seguidamente, cada una de las probetas fue cortada a la mitad en forma longitudinal. Esta operación fue realizada en una maquina de corte de disco abrasivo, en forma lenta, procurando afectar lo menos posible la variación microestructural obtenida por el proceso de temple. Este corte se hizo con el objetivo de conseguir dos superficies planas de cada uno de los materiales en estudio, y con características microestructurales similares. Así, en una de las superficies fueron realizadas las medidas de dureza, y en la otra las mediciones de RMB.

Fueron realizadas medidas de dureza Vickers utilizando un durómetro digital "BUEHLER", y aplicando una carga de 30Kgf. Fueron tomadas medidas a cada 1/16" de la superficie templada de la probeta Jominy. Para cada nivel de dureza (a cada 1/16") se midieron tres puntos separados uno de otro 2,5mm. La figura 1 ilustra esquemáticamente la posición de las indentaciones realizadas. De esta forma se determinó el valor medio y desviación estándar para cada nivel de dureza utilizando formulas convencionales. Este procedimiento fue realizado en los dos materiales estudiados.

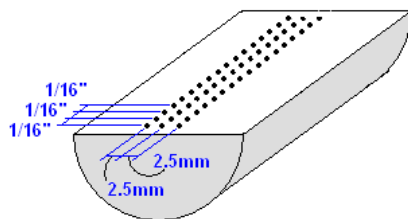


Figura 1. Posición de los puntos de medida de dureza en cada una de las probetas.

Para la medición de RMB fue utilizado el equipo "Barktech" desarrollado totalmente en el laboratorio LADIN de la universidad de Sao Paulo. Con este equipo se generó una corriente en forma sinusoidal a una frecuencia de 10 Hz y con una amplitud de corriente de 0.9 A, la cual fue aplicada a la sonda de RMB. La sonda de RMB utilizada es compuesta por un núcleo de ferrita en forma de "U" (Yoke), en el cual se encuentra

enrollada una bobina que genera inducción magnética en la probeta de ensayo. Entre los polos del Yoke esta ubicada una bobina lectora de alta sensibilidad con un núcleo cilíndrico de ferrita. La salida de voltaje de la bobina lectora va conectada a un pre-amplificador y filtro pasabanda de 1 -100 kHz (equipo Barktech).

El sistema de adquisición es compuesto por una placa analógica/digital con tasa de muestreo máxima de 1.2 MHz y un computador. Con ayuda del programa Labview se visualizaron y se gravaron las señales adquiridas. La figura 2 muestra el diagrama de bloques del sistema experimental utilizado para generar y detectar el ruido magnético de Barkhausen. Ya en la figura 3 se presenta una fotografía de la estación experimental.

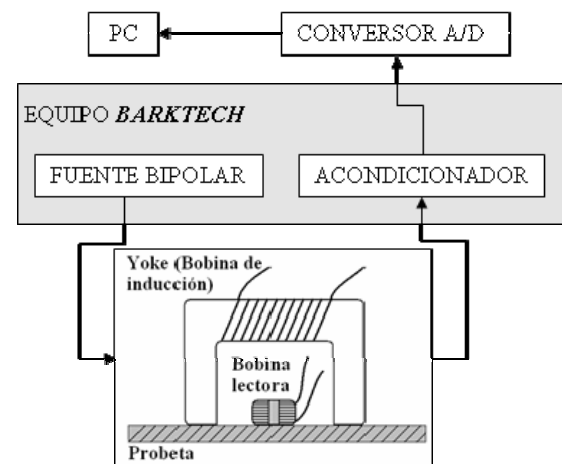


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de medición de RMB.

Fueron realizadas mediciones de RMB en puntos medios de las superficies planas de las probetas, y a cada 1/16" de la superficie templada. En cada punto de medida fueron realizadas 3 repeticiones, y en cada medición fueron adquiridas 4 señales de barkhausen. A partir de esas señales fue calculado el valor medio y desviación estándar del parámetro rms de RMB. En todas las mediciones realizadas, la señal de RMB fue adquirida a una tasa de muestreo de 200kHz.

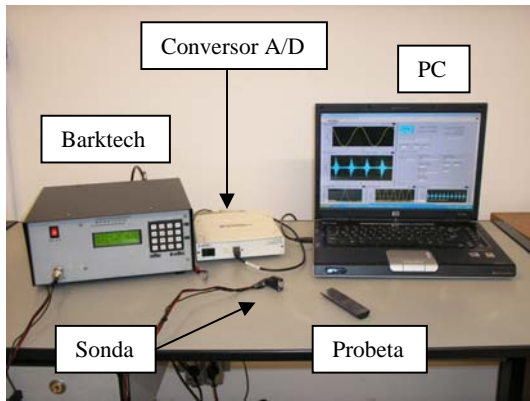
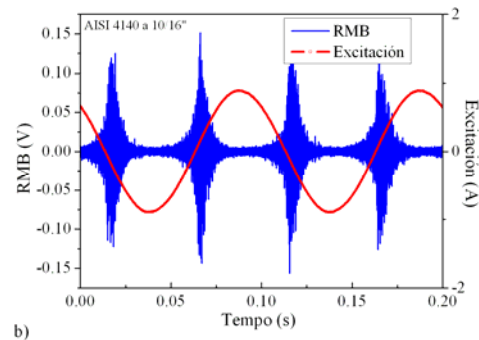


Figura 3. Fotografía de la estación experimental de medición de Ruido Magnético de Barkhausen.

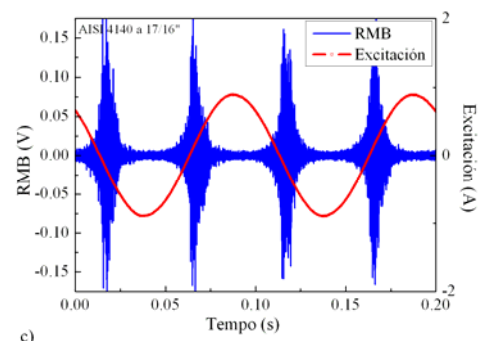
### 3. RESULTADOS

En el ensayo Jominy es obtenida una variación microestructural gradual a lo largo la probeta ensayada, de tal forma que la superficie que entra en contacto directo con el agua en el proceso de enfriamiento, es caracterizada por una microestructura de grano fino, alta densidad de dislocaciones y alto porcentaje de martensita. En las secciones ubicadas próximas a la posición media de la probeta, es obtenida una mezcla de martensita, ferrita y perlita, tamaño de grano un poco mayor y la densidad presente de dislocaciones se reduce. De esta forma el porcentaje de martensita y la densidad de dislocaciones gradualmente se siguen reduciendo a lo largo de la probeta, mientras que el tamaño de grano aumenta. Finalmente en el extremo opuesto de la superficie templada, el tamaño de grano es grueso y se obtienen altos porcentajes de estructura ferrítico-perlítica con una baja o no existente presencia de martensita.

Las figuras 4(a), (b), (c) y 5(a), (b), (c) muestran las diferencias en el RMB medido en tres puntos diferentes a lo largo de la probetas de material AISI 4140 y AISI 5160 respectivamente.



b)

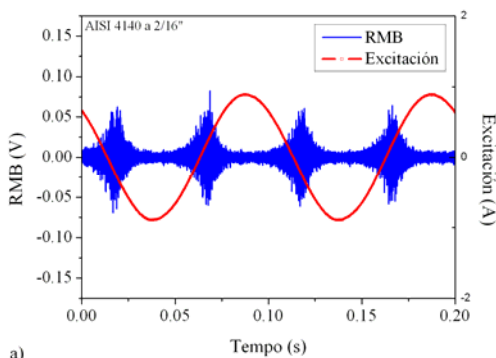


c)

Figura 4. Variación de la señal de RMB medida en probeta de acero AISI 4140 en los puntos correspondientes a a)2/16" , b) 10/16" y c)17/16" de la parte mas dura.

En ellas se observa como la amplitud de las señale de RMB en cada una de las muestras aumenta a medida que los puntos se alejan de la región templada, mientras que el ancho de cada una de ellas se reduce. La justificación de este comportamiento se explica a continuación:

- Los contornos de grano son sitios preferidos para la nucleación de dominios y para el anclaje del movimiento de paredes de dominio. Por tanto el número de saltos barkhausen incrementan con la reducción del tamaño de grano [9]. Además el número de dominios que existe en un grano es proporcional a la raíz cuadrada del diámetro del grano. Así, en regiones de granos finos el numero de paredes de domino que se pueden mover es mayor que en regiones de grano grueso [2]. Ahora bien, la presencia de una alta densidad de dislocaciones, ocasiona que aquellos saltos de Barkhausen sean cortos y consecuentemente de baja amplitud. Este comportamiento se ve reflejado en las señales de las figuras 3a y 4ª observándose que cada una de las emisiones de RMB contiene un gran número de saltos (señal ancha) pero de baja amplitud.
- Ahora bien, en regiones del material con tamaño de grano grueso y densidad de discordancias



a)

relativamente baja, obtenemos menor número de paredes de dominio moviéndose. También el aumento entre la distancia de dislocaciones y contornos de grano reduce las emisiones Barkhausen pero aumenta sus amplitudes [3]. Las señales de las figuras 3c y 4c muestran este tipo de comportamiento. En ellas encontramos señales con una cantidad menor de emisiones barkhausen (señales más delgadas) pero de mayor amplitud.

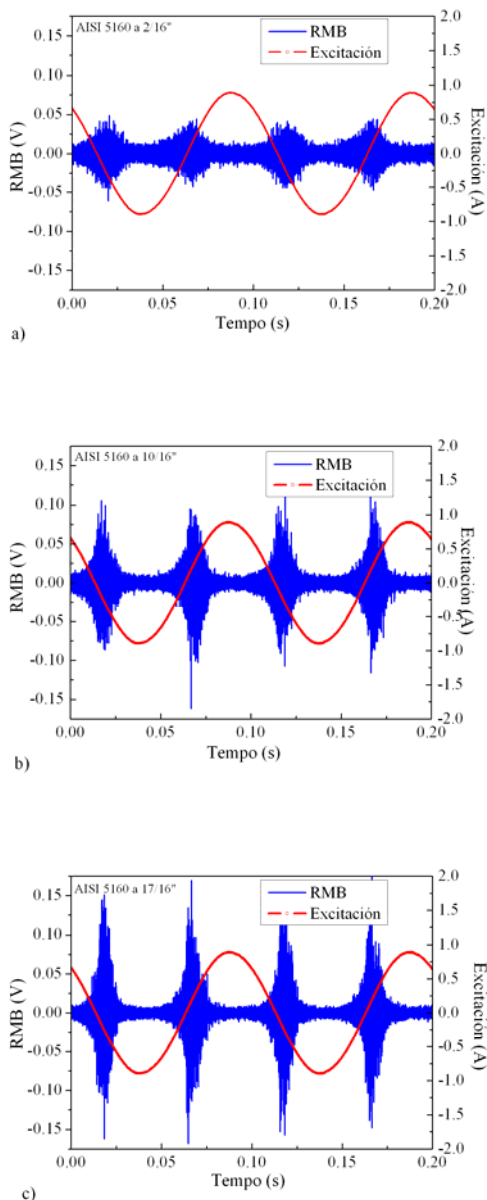


Figura 5. Variación de la señal de RMB medida en probeta de acero AISI 5160 en los puntos correspondientes a a)2/16" , b) 10/16" y c)17/16" de la parte mas dura.

La dependencia do parámetro  $RMB_{rms}$  y dureza Vickers (HV) respecto a los puntos de medición en los materiales

ensayados se ilustran en las figuras 6 y 7. Se puede observar claramente como la dureza disminuye a medida que nos alejamos de la superficie templada debido al incremento en el tamaño de grano y la disminución de la densidad de discordancias. Tendencia opuesta presenta el parámetro  $RMB_{rms}$ , el cual aumenta a medida que la densidad de defectos microestructurales (dislocaciones y contornos e grano) disminuye. Un aumento en la dureza por tanto disminuye la actividad barkhausen.

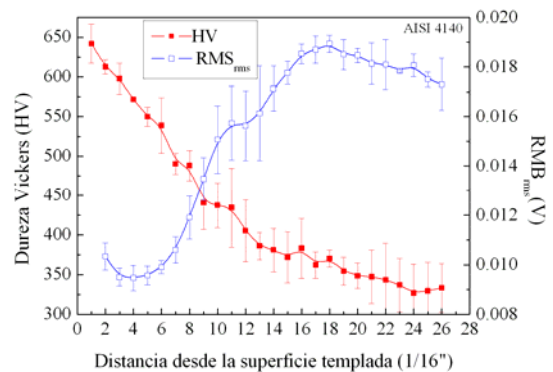


Figura 6. Variación del parámetro  $RMB_{rms}$  y dureza Vickers (HV) respecto a la variación microestructural producida en una probeta ensayada de tipo Jominy de acero AISI4140.

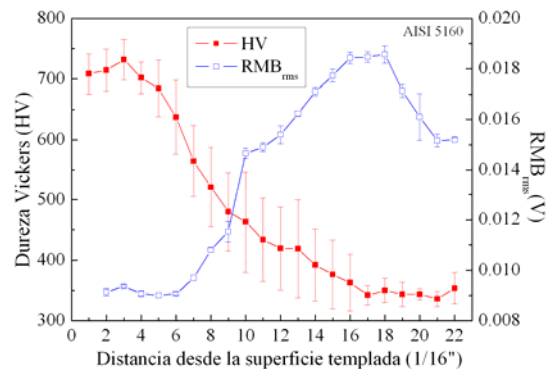


Figura 7. Variación del parámetro  $RMB_{rms}$  y dureza Vickers (HV) respecto a la variación microestructural producida en una probeta ensayada de tipo Jominy de acero AISI5160.

Las figuras 8 y 9 muestran la correspondencia entre el valor inverso del parámetro  $RMB_{rms}$  y la dureza Vickers (HV). Se nota como el valor  $1/RMB_{rms}$  crece linealmente (con un coeficiente de correlación de  $R^2=0,9222$  para el AISI4140 y  $R^2=0,9222$  para el AISI5160) con respecto a las mediciones de dureza en los dos materiales estudiados.

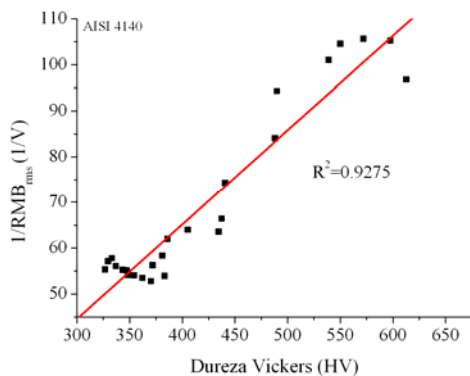


Figura 8. Correspondencia entre el valor inverso del parámetro  $RMB_{rms}$  y la dureza Vickers medidos en el acero AISI4140.

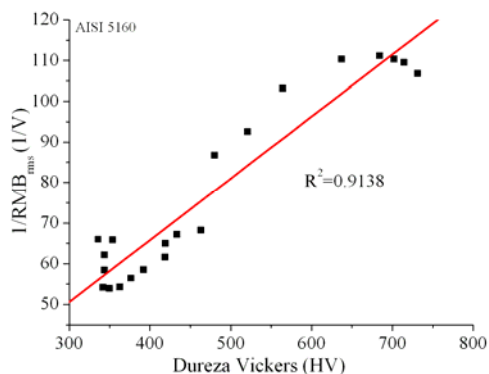


Figura 9. Correspondencia entre el valor inverso del parámetro  $RMB_{rms}$  y la dureza Vickers medidos en el acero AISI5160.

#### 4. CONCLUSIONES

Fueron realizadas y comparadas mediciones de RMB e Dureza Vicker en probetas Jominy de acero AISI4140 y AISI5160. Las emisiones barkhausen fueron altamente sensibles a los cambios microestructurales del material. Un aumento en la dureza disminuyo la emisión Barkhausen debido a el aumento producido en el densidad de dislocaciones y contornos de grano. Mediciones de RMB en zonas de material con dureza relativamente baja, muestran un aumento en la emisión de barkhausen.

El valor inverso del parámetro  $RMB_{rms}$  ha demostrado ser linealmente proporcionales, con un coeficiente de correlación de  $R^2=0,9222$  para el acero AISI4140 y  $R^2=0,9222$  para el acero AISI5160, a las medidas de dureza Vickers. Los resultados obtenidos son novedosos y evidencian la viabilidad de la utilización de la técnica de medición del RMB como ensayo no destructivo, en la identificación de diferentes niveles de dureza correspondientes de un ensayo de templabilidad en materiales ferromagnéticos.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la agencia Brasileira FAPESP (Proceso No. 05/57146-0) por el apoyo económico.

#### N. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. O'Sullivan, M. Cotterell, D.A. Tanner, I. Mészáros, "Characterisation of ferritic stainless steel by Barkhausen techniques", *NDT&E International* 37 (2004) 489–496.
- [2] J. Anglada-Rivera, L.R. Padoveseb, J. Capó Sánchez, "Magnetic Barkhausen Noise and hysteresis loopin commercial carbon steel: influence of applied tensile stress and grain size," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 231 (2001) 299–306.
- [3] D.C. Jiles, "Dynamics of domain magnetization and the barkhausen effect", *Czechoslovak journal of physics*, Volume 50, Number 8 pp. 893-988, 2000.
- [4] A. P. Parakka and D. C. Jiles, "Barkhausen effect in steels and its dependence on surface condition", *J. Appl. Phys.*, Vol. 81, No. 8, 15 April 1997.
- [5] István Mészáros, "Complex magnetic investigation of ferritic stainless steel", *Materials Science Forum* Vols. 473-474 pp. 231-236. 2005.
- [6] V. N. Bus'ko and V. L. Vengrinovich, "Feasibility of spring hardness evaluation using barkhausen noise", *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 37, No. 1, pp. 20-23, 2001.
- [7] E. R. Kinser, Member, IEEE, C. C. H. Lo, A. J. Barsic, and D. C. Jiles, Fellow, IEEE, "Modeling microstructural effects on barkhausen emission in surface-modified magnetic materials", *IEEE Transactions On Magnetics*, vol. 41, no. 10, October 2005.
- [8] ASTM-A225 Standar Test Methods for Determining Hardenability of Steel. June 1999.
- [9] S. Yamaura, Y. Furuya, T. Watanabe, "The effect of grain boundary microstructure on barkhausen noise in ferromagnetic materials," *Acta mater.* 49 3019–3027 ,2001.