



Monitoreo de uniones soldadas de acero estructural utilizando ruido magnético de Barkhausen

Claudia P. Serna-Giraldo

Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. Universidad de Antioquia.
Integrante del grupo LADIN da Escola Politécnica-Universidade de Sao Paulo
Medellín/Antioquia, Calle 67 No 63-108, bloque 18, of 136 Colombia
Teléfono (574) 2105540-(574) 2105543
claserna@udea.edu.co

Linilson Rodrigues Padovese

Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica-Universidade de São Paulo.
São Paulo/S.P, Av. Prof. Mello Moraes, 2231. CEP 05508-900 Brasil.

Resumen

Cuando los materiales ferromagnéticos se someten a campos magnéticos variables, la variación en la inducción se presenta de forma discontinua como una respuesta al movimiento de las paredes de dominios magnéticos. Esos saltos abruptos se conocen como Ruido Magnético de Barkhausen (RMB), y pueden detectarse colocando una bobina en la superficie de la muestra. Se sabe que el RMB es susceptible a la condición microestructural y al estado de tensión del material.

En las uniones soldadas de aceros al carbono se presenta una variación microestructural, como consecuencia de los ciclos térmicos, la cual debe ser controlada para garantizar el desempeño para el que fueron proyectados.

En este trabajo se utiliza el RMB para monitorear uniones soldadas a tope de aceros al carbono. Las microestructuras a través de la unión soldada son caracterizadas por técnicas de microscopía óptica. El equipo para la medición del RMB fue desarrollado por el *Laboratório de Análise Dinâmica e Instrumentação-LADIN* de la Universidad de São Paulo. La medición se realiza sobre la superficie de la unión soldada, en la región estacionaria. Las señales de RMB adquiridas son analizadas con diferentes parámetros en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. Los resultados muestran que todos los parámetros analizados contienen la información de la variación microestructural.

Se comprueba la potencialidad de usar el RMB como una técnica de ensayo no destructivo para la evaluación de uniones soldadas de aceros al carbono.

1. Introducción

Cuando los materiales ferromagnéticos se someten a campos magnéticos variables, el aumento en la inducción se presenta de manera discontinua, como respuesta al

movimiento de las paredes de dominio magnético. Estos aumentos bruscos de inducción se conocen como Ruido Magnético de Barkhausen (RMB). La señal se detecta como un pulso de voltaje eléctrico cuando una bobina se coloca sobre la superficie de la muestra mientras esta ocurriendo el movimiento de las paredes de dominio. El RMB es sensible a las características del material como la microestructura y los esfuerzos mecánicos aplicados. Esto hace que se potencialice como una herramienta de ensayo no destructivo.

En este trabajo se muestra la utilización del RMB en la caracterización de uniones soldadas de acero estructural ASTM A36.

2. Revisión Bibliográfica

En este trabajo, la revisión bibliográfica es dividida en dos partes que son de interés. De un lado se aborda la metalurgia de la soldadura de aceros al carbono. De otro lado se aborda el fenómeno del RMB.

2.2 Metalurgia de la soldadura de aceros al carbono:

En una unión soldada de acero al carbono, existe un gradiente microestructural desde el centro del cordón de soldadura hasta el metal base, como consecuencia de los ciclos térmicos experimentados en función de los parámetros de soldadura empleados ⁽¹⁾. Se pueden identificar la zona de fusión, la zona afectada térmicamente (ZAT) y el metal base no afectado.

En la zona de fusión, ocurren fenómenos de solidificación y enfriamiento desde la temperatura de fusión, generando así microestructuras típicas de solidificación. Adyacente al cordón de soldadura, las temperaturas no alcanzan las de fusión, y por lo tanto en el material suceden transformaciones de fase en estado sólido desde altas temperaturas, como consecuencia de los ciclos de calentamiento y enfriamiento. La microestructura es definida solamente por los ciclos térmicos y así, la temperatura máxima alcanzada en cada punto varía dependiendo de la distancia al centro del cordón. En aceros al carbono, la ZAT se divide en tres regiones: supercrítica, intercrítica y subcrítica. La región supercrítica corresponde a la región de grano grueso, debido a que la temperatura máxima sobrepasó la temperatura de crecimiento de grano austenítico. A medida que se avanza desde el centro del cordón hasta el metal base, tanto las temperaturas máximas, como las velocidades de enfriamiento disminuyen, y por lo tanto hay un gradiente de microestructuras. En la región de grano intermedio, el grano austenítico ya alcanzó un menor tamaño. En la región de grano fino la microestructura es similar a la del metal base pero mucho más fina. En la región intercrítica que es relativamente estrecha, ocurre una transformación parcial y la microestructura consiste de colonias de perlita inmersas en una matriz ferrítica no transformada. En la región subcrítica generalmente no ocurren cambios microestructurales apreciables, tal vez una esferoidización de la perlita, pero esta es difícil de detectar por microscopía óptica. . ⁽²⁾

2.3 El Ruido Magnético de Barkhausen (RMB):

En los materiales ferromagnéticos, las regiones en las cuales los momentos magnéticos están alineados en la dirección de magnetización espontánea, se conocen como

dominios magnéticos. La dirección de alineación de los dominios magnéticos varía de dominio a dominio. La separación entre los dominios magnéticos son capas de transición que se conocen como paredes de dominio o paredes de Bloch. En materiales ferrosos éstas son de 180° o de 90°.

Al aplicar un campo magnético variable a un material ferromagnético, se ha observado que alrededor del campo coercitivo (H_c), el aumento en la inducción (B) como consecuencia del aumento del campo magnético aplicado (H), sucede de manera brusca, como pequeños saltos que se conocen como saltos de Barkhausen, como se muestra en la figura 1a. Esto se explica por la interacción del movimiento de las paredes de dominio y los puntos de anclaje que actúan como barreras al movimiento, los cuales son las imperfecciones del material como dislocaciones, límites de grano, precipitados⁽³⁾.

Las emisiones de Barkhausen generan una señal como la mostrada en la figura 1b, y se pueden detectar como pulsos de voltaje en una bobina colocada en la superficies de la muestra, mientras ocurre el movimiento de las paredes de dominio.

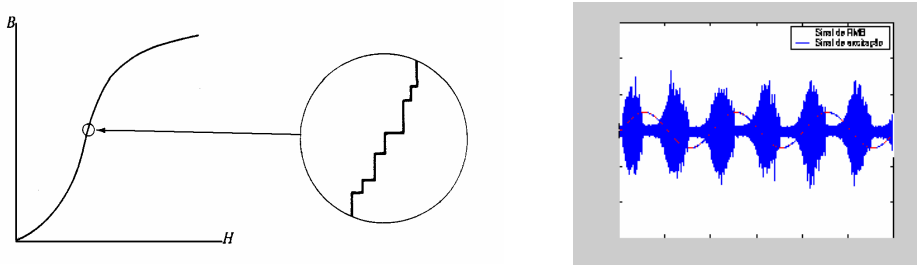


Figura 1. a) curva de magnetización de un material ferromagnético. b) señal de RMB.

El RMB depende de los parámetros empleados para la magnetización, como la frecuencia⁽³⁻⁵⁾ y la intensidad de magnetización^(6,7). Depende también de las características del material como el tamaño de grano⁽⁸⁻¹⁰⁾, el contenido de carbono^(11,12) y el estado de tensiones^(13,14). Una de las potencialidades del RMB es su utilización en el monitoreo de uniones soldadas para identificar las variaciones estructurales, efectos de tratamientos térmicos o la presencia de defectos. Algunos de los trabajos de RMB en soldaduras han sido realizados en microestructuras simuladas con tratamientos térmicos⁽¹⁵⁻¹⁷⁾, y otros han sido realizados en soldaduras reales para evaluar el efecto del tratamiento térmico después de la soldadura⁽¹⁸⁾ o el desempeño de la unión soldada sometida a fatiga⁽¹⁹⁻²⁰⁾. En este trabajo se evalúa la variación microestructural de uniones soldadas de acero al carbono utilizando el RMB.

3. Material y métodos experimentales

El material utilizado es una chapa de acero al carbono A36 comercial, de espesor 6 mm cuya composición química se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química del acero A36 empleado

Fe	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo
98,323	0,111	0,308	0,989	0,032	0,011	0,029	0,098R	0,050

Fueron realizadas uniones soldadas a tope de un pase, con preparación de bisel en V, utilizando el proceso SMAW con electrodo E7018 de 3.2 mm de diámetro. En la tabla 2 se presentan los parámetros de soldadura. El refuerzo del cordón fue retirado mediante rectificad con pasos de 0.03 mm y usando suficiente fluido de refrigeración. A una de las muestras soldadas se le realizó tratamiento térmico a temperatura de 600°C durante 2 horas, con el fin de eliminar los esfuerzos residuales causados por el proceso de soldadura y de rectificad en la superficie. La capa de óxido generada por el tratamiento térmico fue retirada con lija 400.

Tabla 2. Parámetros de soldadura utilizados

Número de pases	Pase No	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad (mm/s)	Energía de entrada (J/mm)	Técnica cordón
1	1	27-32	160-165	2,3	1502-1837	Oscilado

Las microestructuras fueron caracterizadas a través de microscopía óptica, utilizando como ataque químico nital 2 %.

Se levantaron perfiles de microdureza a través de la unión soldada, por medio del método Vickers con carga de 100 g, en una muestra de la sección transversal, con indentaciones separadas a cada 1 mm.

Se midieron los esfuerzos residuales en una línea en la superficie de la muestra, desde el centro del cordón hasta el metal base en puntos separados 2.5 mm, utilizando difracción de rayos-X. Los parámetros empleados se muestran en la tabla 3. Para el cálculo de los esfuerzos residuales se utilizó el método $\text{sen}^2\psi$ evaluando los picos del plano {211} de la ferrita.

Tabla 3. Parámetros empleados para la difracción de rayos-X

Parametro	Característica
Tipo de radiación	Cr K α
Longitud de onda λ	2,29092 Å
Voltaje	40 kV
Corriente	20 mA
Filtro	Vanadio
Ángulo de barrido	-50° hasta 50°
Paso	10°

El RMB fue medido en las superficies de la unión soldada, con un barrido a cada 1 mm a partir del centro del cordón de soldadura y hasta una distancia de 35 mm. Un esquema del sistema de medición empleado para adquirir la señal de RMB se muestra en la figura 2.

La fuente bipolar aplica una corriente variable, controlada por onda sinusoidal, a la bobina del yugo magnético generando un campo magnético variable hasta 12500 A/m, con frecuencia de excitación de 1Hz. En la superficie de la muestra, un sensor inductivo capta los pulsos de voltaje electromagnético, correspondientes a la señal de Barkhausen. Estos pulsos son amplificados y filtrados y después digitalizados por medio de una tarjeta de adquisición de datos analógica/digital de 16 bits, con frecuencia de muestreo de 200 kHz. En cada punto de medición se adquirieron cinco señales.

Estas señales fueron analizadas en el dominio del tiempo por medio del valor máximo y el valor rms (root mean square), y también se analizaron, en el dominio de la frecuencia, el rms de los espectros de potencia en la banda completa y en las bandas de 1-3 kHz, 1-10 kHz, 10-30 kHz, 30-60 kHz, 60-85 kHz y 85-100kHz.

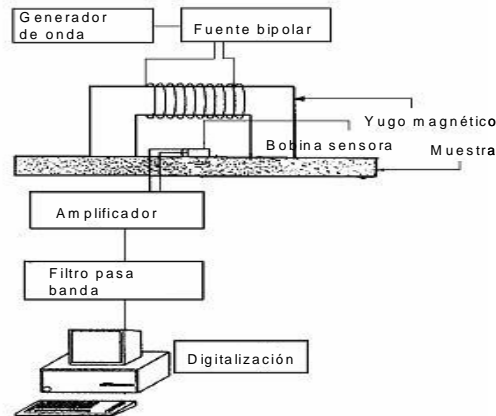


Figura 2. Sistema de medición de RMB

4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización de la microestructura

La microestructura del metal base consiste de ferrita y perlita. La unión soldada esta compuesta por varias regiones: la zona de fusión, la zona afectada térmicamente (ZAT) y el metal base no afectado. En la figura 3 se muestran las macrografías de las muestras en la condición como soldada y con tratamiento de alivio de tensión. El límite de fusión y el fin de la ZAT están localizados a 5 mm y 10 mm del centro del cordón, respectivamente.

La figura 4 muestra las microestructuras de las diferentes regiones. En la zona de fusión, se tiene un microestructura típica de solidificación, con granos columnares de ferrita creciendo en la dirección del centro del cordón y con perlita en el espaciado interdendrítico. En la ZAT cercana al cordón de soldadura se tiene la región de crecimiento de grano, en la cual durante el calentamiento, el grano austenítico creció, retransformando, durante el enfriamiento en ferrita primaria en contorno de grano con placas de Widmanstättén, y perlita en el espacio entre las placas. Conforme se aleja del cordón, la microestructura cambia en morfología, pues la ferrita y la perlita se tornan poligonales, y el tamaño de grano se refina llegando a ser menor que el del metal base. Finalmente se tiene una región de transformación parcial, en la cual la temperatura máxima durante la soldadura alcanzó la zona intercrítica, de tal forma que durante el enfriamiento la austenita se transformó en ferrita y perlita.

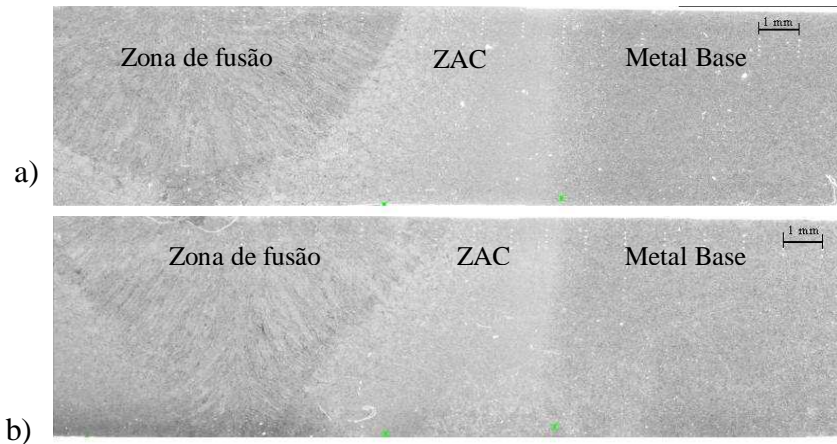


Figura 3. Macrografías de las uniones soldadas, a) como soldada, b) con tratamiento de alivio de tensión

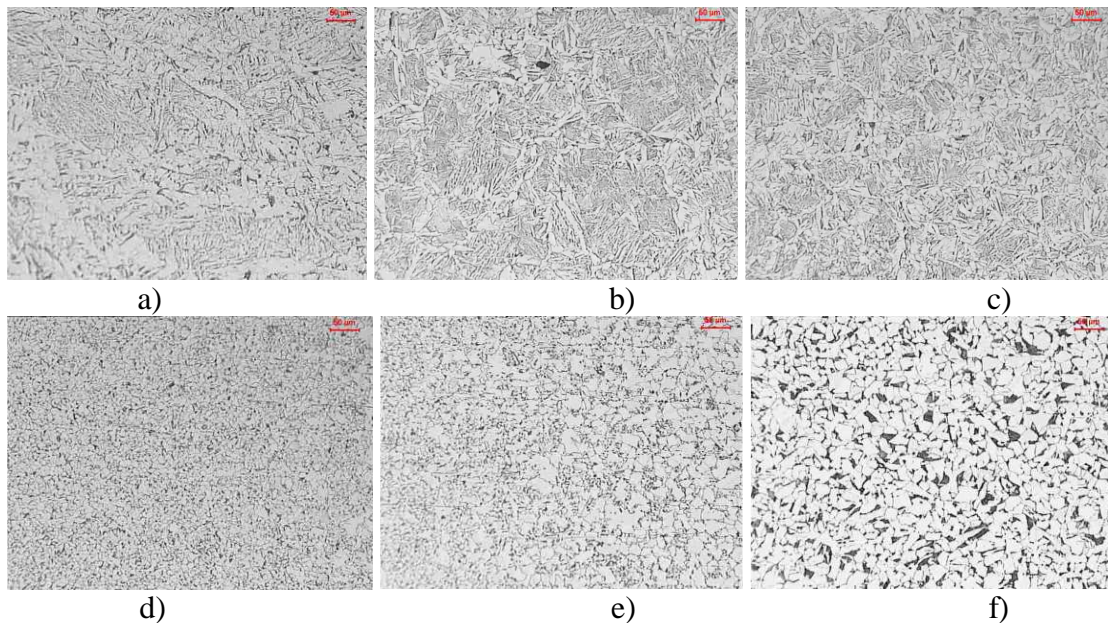


Figura 4. Micrografías de las regiones en la unión soldada, a) zona de fusión, b) zona de grano grueso, c) zona de grano intermedio, d) zona de grano fino, e) zona de transformación parcial, f) metal base

4.2 Caracterización de la microdureza

En la figura 5 se muestran los perfiles de microdurezas de las condiciones como soldada y con alivio de tensión. Se percibe que en la región que corresponde a la zona de fusión, la microdureza es bastante heterogénea, debido a las heterogeneidades en la microestructura. En el límite de fusión, se presenta el mayor valor de dureza debido a la microestructura acicular. Después, la dureza cae hasta el fin de la ZAT, en la que se presenta el menor valor. Luego aumenta un poco y cae nuevamente, hasta que se estabiliza en el metal base.

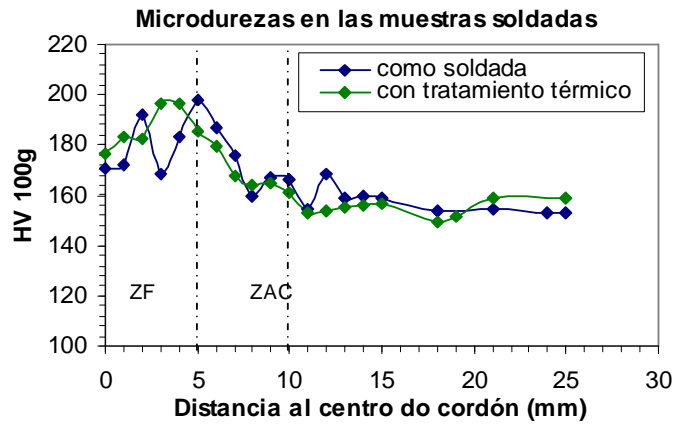


Figura 5. Perfiles de microdurezas en las muestras como soldada y con tratamiento térmico

4.3 Medición de esfuerzos residuales

En la figura 6 se representa la componente transversal de los esfuerzos residuales medida por difracción de rayos-X, a través de una línea desde el centro del cordón. Se observa que los esfuerzos residuales medidos son de compresión, tanto en la condición como soldada así como después del tratamiento térmico. Esos esfuerzos medidos son muy superficiales, del orden de 10 μm y parecen ser los ocasionados por el proceso de rectificado aplicado en la superficie de las muestras. Aun así, se observan tres regiones, las cuales son marcadas con líneas punteadas en la figura 6, que podrían estar relacionadas con las regiones de la soldadura. Se esperaba una disminución de las tensiones residuales con el tratamiento térmico, contrario a que fue medido, pues los esfuerzos residuales son mayores en la muestra con tratamiento térmico que en la muestra como soldada. Se cree que este resultado es consecuencia del proceso de lijado en las muestras tratadas térmicamente, para eliminar la capa de óxido superficial, que ocasionó una variación de los esfuerzos residuales.

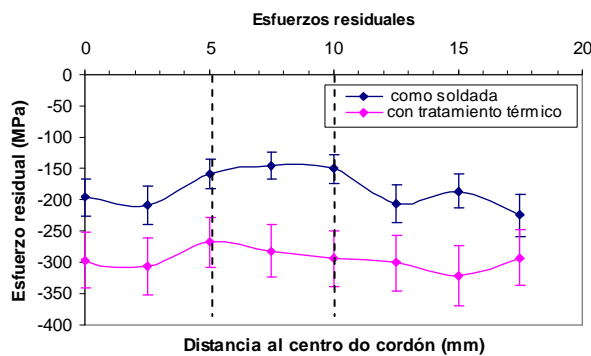


Figura 6. Esfuerzos residuales en la muestra como soldada y con tratamiento térmico

4.4 Medición de RMB

En la figura 7a y 7b se muestran los valores máximo y rms de la muestra como soldada, respectivamente. La figura 7c y 7d muestran los valores máximo y rms de la muestra

con tratamiento térmico, respectivamente. Cada línea representa una medición en la superficie de la muestra transversal al cordón de soldadura, desde el centro del cordón hasta una distancia de 35 mm. Se resalta con la línea punteada la región que corresponde a la soldadura (o sea la zona de fusión y la ZAT). Se observa que el valor rms representa de forma más suave la variación de la microestructura.

Se observa que el valor de RMB disminuye a partir de la línea del centro del cordón hasta un valle ubicado en 5-7 mm, en el cual el valor de RMB es mínimo, y corresponde a la línea de fusión (LF). A partir de este punto, se observa un aumento hasta 10-12 mm que corresponde con el fin de la ZAT. A partir de esta distancia se observa una pequeña disminución en la medida que se aleja del centro del cordón.

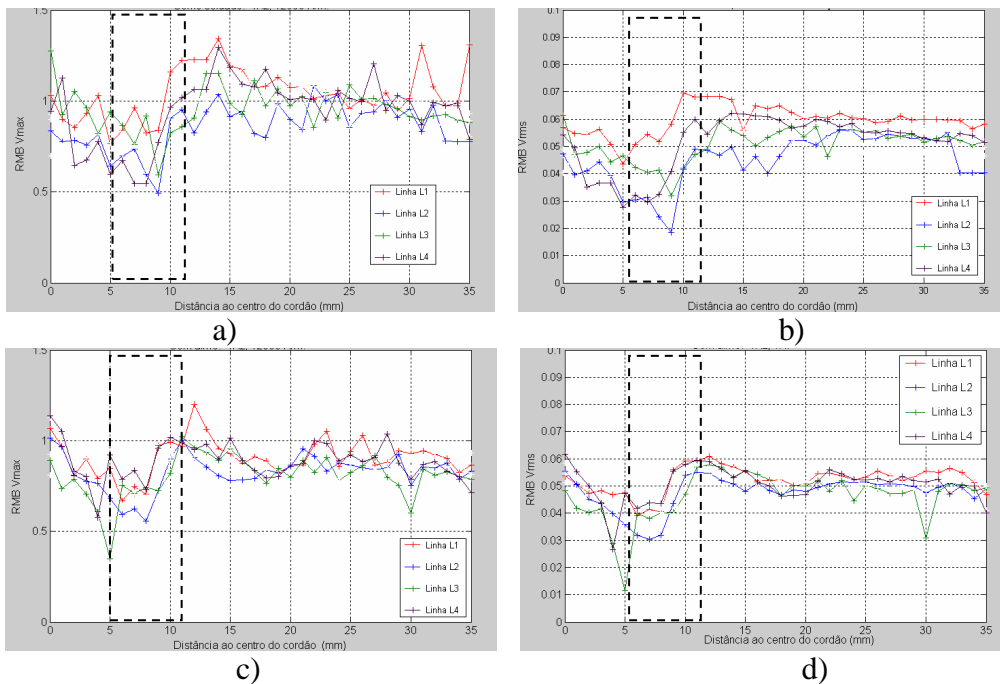


Figura 7 Parámetros calculado en el dominio del tiempo. a) valor máximo de la muestra como soldada, b) valor rms de la muestra como soldada, c) valor máximo de la muestra con tratamiento térmico, d) valor máximo de la muestra con tratamiento térmico

Para los análisis en el dominio de la frecuencia, se levantaron los gráficos de valores rms del espectro de frecuencia en la banda completa y en las bandas de 1-3 kHz, 1-10 kHz, 10-30 kHz, 30-60 kHz, 60-85 kHz e 85-100 kHz.

La profundidad δ aproximada de la cual son emitidas las señales de RMB se muestra en la tabla 4. Estas fueron calculadas a través de la relación que se conoce como “skin depth”⁽³⁾

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{f\sigma\mu_o\mu_r}}$$

la cual es dada en función de las propiedades del material (conductividad eléctrica σ y permeabilidad relativa μ_r) y la banda de frecuencia f analizada.

La figura 8 es un gráfico de la variación en las diferentes bandas. La figura 8a corresponde a la muestra como soldada, y la figura 8b corresponde a la muestra con

alivio de tensión. Las curvas representan la variación del rms del espectro de frecuencias en una línea transversal al cordón, desde el centro hasta una distancia de 35 mm.

Tabla 4 Profundidades de emisión de las señales de RMB de acuerdo a la banda de frecuencia analizada

Banda de frecuencia (Hz)	δ (mm)
1000-3000	6-0,386
1000-10000	6-0,211
10000-30000	0,211-0,122
30000-60000	0,122-0,086
60000-85000	0,086-0,072
85000-100000	0,072-0,067

Se observa que el valor del rms del espectro de RMB es diferente en las diferentes bandas analizadas. Así, los mayores valores se obtienen el análisis del rms del espectro del envelope y en la banda completa de 100 kHz. Todas las bandas analizadas contienen la información de la variación microestructural en la región soldada, pues en ella se identifican el valle de valores mínimo que corresponden a la LF, y el valor máximo que corresponde al fin de ZAT. Se observa que la variación del V_{rms} con respecto al centro del cordón es menos acentuada en las bandas de frecuencia más altas.

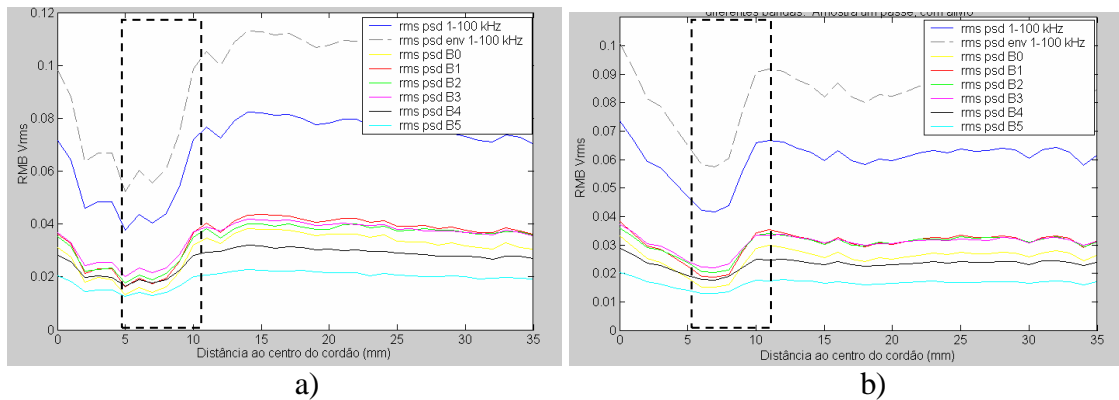


Figura 8. Valores rms de los espectros de frecuencia en las distintas bandas analizadas para una línea de medición sobre la superficie, a) muestra como soldada, b) muestra con tratamiento térmico

En la figura 9 se muestran a manera de ejemplo los valores rms del espectro de frecuencias para las bandas de 10-30 kHz y de 85-100 kHz en las superficies de las muestras como soldadas y con tratamiento térmico.

Se observa de la figura 9 que las curvas son equivalentes a las mostradas en los análisis en el dominio del tiempo.

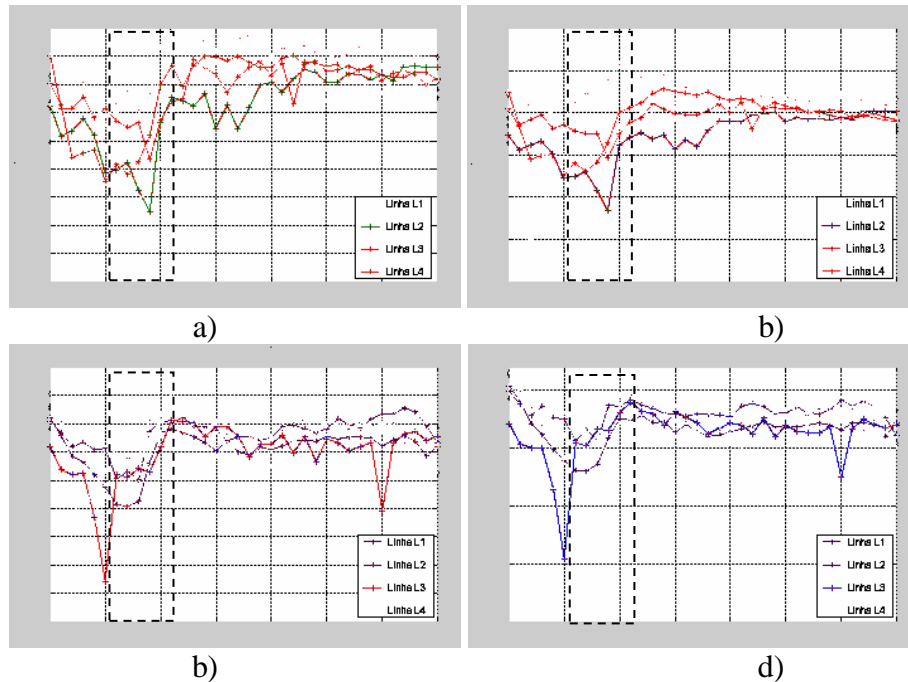


Figura 9. Valores rms de los espectros de frecuencia en diferentes bandas a) muestra como soldada banda 10-30 kHz, b) muestra como soldada banda 85-100kHz. c) muestra con tratamiento térmico banda 10-30 kHz, d) muestra con tratamiento térmico banda 85-100 kHz

4.5 Relación de microestructura, microdureza, esfuerzos residuales y RMB

El RMB se produce por la interacción entre las paredes de dominio magnético, que se mueven durante el proceso de magnetización, y los defectos microestructurales que actúan como barreras al movimiento de las paredes de dominio. Por lo tanto, las señales de RMB son sensibles a los cambios microestructurales en la unión soldada.

En la zona de fusión que va hasta 5 mm, la heterogeneidad de la microestructura se refleja en los valores de dureza y también en los parámetros de RMB medidos. Junto a la línea de fusión, en la región de grano grueso, se obtiene el mayor valor de dureza, como respuesta al microestructura acicular allí presente, y también se tiene el menor valor del parámetro RMB, lo cual está de acuerdo con lo reportado de la relación entre dureza y RMB ⁽⁵⁾. Mas alejado del centro del cordón, hay variación de la morfología de la microestructura, que se vuelve poligonal y también presenta grano mas fino. La dureza disminuye hasta un mínimo. En relación al RMB, se observa que el valor del parámetro aumenta hasta un máximo. Esto se explica por que el grano fino presenta una gran cantidad de paredes de dominio en movimiento, además de que hay menos barreras al movimiento, generando así una mayor emisión de Barkhausen. Al final de la ZAT, en el metal base, el grano es mas grueso, y así se obtiene una disminución en el RMB, debido al menor número de paredes de dominio que se mueven y a las pocas barreras que impiden su movimiento.

Con respecto a los esfuerzos residuales, parece que hay una correlación de las medidas de difracción de rayos-X y las obtenidas por RMB, ya que se pueden apreciar tres regiones localizadas entre 0-5mm que es la zona de fusión, 5-10 mm que es la ZAT y 10-35 mm correspondiente al metal base. Pero esto debe ser estudiado con mas detalle

para clarificar cual es la influencia de la microestructura y cual la influencia de los esfuerzos residuales.

5. Conclusiones

El monitoreo de uniones soldadas de un pase de acero estructural A36 con el RMB permitió llegar a las siguientes conclusiones, que muestran la potencialidad de usar la técnica como método de ensayo no destructivo.

- Las variaciones microestructurales que se presentan en muestras soldadas de acero al carbono son detectadas por el RMB. Así, en la ZAT, los cambios de morfología, tamaño de grano y dureza corresponden con las variaciones de RMB. En la zona de fusión, la microestructura es heterogénea y también se observa heterogeneidad en el RMB. En la línea de fusión se tiene la menor dureza y corresponde con el mayor valor de RMB. Al pasar de la región de grano grueso a la región de grano fino, la dureza disminuye y esta variación corresponde con un aumento en el valor de RMB.
- Los análisis de la señal de RMB a través de parámetros en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia mostraron que la información contenida corresponde a la variación microestructural.
- La relación que existe entre los esfuerzos residuales y las mediciones de RMB en uniones soldadas deben ser mejor estudiadas, ya que el RMB es sensible tanto a la variación microestructural como al estado de esfuerzos residuales presente.

6. Agradecimientos

Los autores agradecemos a CAPES por el apoyo financiero y al profesor Nelson de Lima Batista del IPEN por las mediciones de difracción de rayos-x.

7. Referencias bibliográficas

-
- ¹ H Granjon, Fundamentals of Welding Metallurgy. Abigton Publishing. Cambridge. pp 18-40. 1991
 - ² J.F Lancaster,. Metallurgy of welding. Chapman & Hall. London, p175-198, 1994.
 - ³ D.C Jiles. Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect. Czechoslovak Journal of Physics. V 50, n 8, pp 893-988,2000.
 - ⁴ I Altpeter. Nondestructive evaluation of cementite content in steel and white cast iron using inductive Barkhausen noise. Journal of Nondestructive Evaluation. V15, n2. pp 45-60,1996.
 - ⁵ V Moorthy; B.A Shaw and. J.T Evans. Evaluation of tempering induced changes in the hardness profile of case-carburised EN steel using magnetic Barkhausen noise analysis. NDT&E International. V 36, pp 43-49,,2003.
 - ⁶ A Dhar and. D.L. Atherton. Influence of Magnetizing Parameters on the Magnetic Barkhausen Noise. IEEE Transactions on Magnetics. V28, N 6, pp 3363-3366, 1992.
 - ⁷ L.R. Padovese, J Capó and. J Anglada-Rivera,. Medição da tensão mecânica em aço carbono através da emissão magnética de Barkhausen. . In: XIX Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos. São Paulo, Brasil, agosto 2000.

-
- ⁸ R. Ranjan, D. Jiles,; P.K Rastogi,. Magnetic properties of decarburized steels: an investigation of the effects of grain size and carbon content. IEEE transactions on magnetics. Vol 23. n 3, . pp 1869-76, 1987.
- ⁹ J Capó-Sánchez, L.R. Padovese and C.P Serna-Giraldo,. Utilización del efecto Barkhausen en el análisis estructural de muestras de acero al carbono. **In:** II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. João Pessoa, Brasil, Agosto 2002.
- ¹⁰ J Capó-Sanchez, L.R. Padovese, C.P Serna-Giraldo. Medição do ruído magnético Barkhausen em aços carbono. **In:** 57 congresso anual da ABM Internacional. São Paulo, Brasil, julio de 2002.
- ¹¹ J. Kameda, R Ranjan. Nondestructive evaluation of steels using acoustic and magnetic Barkhausen signals-I. Effect of carbide precipitation and hardness. Acta Metallurgical. V35, n 7. pp 1515-26, 1987.
- ¹² J Capó-Sanchez, J.A. Perez Benitez, L.R Padovese and C.P Serna-Giraldo. Dependence of the Barkhausen Magnetic Emission with carbon content in commercial steel. Journal of Materials Science. V39, pp 1367-1370,2004.
- ¹³ L.B Sipahi,. Overview of applications of micromagnetic Barkhausen emissions as noninvasive material characterization technique. Journal Applied Physics. V70, n 10. pp 6978-80, May 1994.
- ¹⁴ J Anglada-Rivera, L.R. Padovese, J Capó-Sanchez. Magnetic Barkhausen noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: influence of applied tensile stress and grain size. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. V 231,. pp 299-306, 2001.
- ¹⁵ V. Moorthy, S. Vaidyanathan, K. Laha, K. Jayakumar, Bhanu Sankara Rao, K.; Baldev Raj. Evaluation of microstructures in 2,25Cr-1Mo and 9Cr-1Mo steel weldments using magnetic Barkhausen noise. Materials Science and Engineering. A231, . Pp 98-104, 1997
- ¹⁶ Joo-Hag Kim, Duck-Gun Park, Chi-Il Ok, Eui-Pak Yoon, Jun-Hwa Hong. Effect of microstructure on magnetic Barkhausen noise level in the weld HAZ of an RPV steel. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. V 196-197, pp351-353, 1999.
- ¹⁷ Duck Gun-Park, Cheol Gi Kim, Jun-Hwa Hong. Microstructural dependence of Barkhausen noise and magnetic relaxation in the weld HAZ of an RPV steel. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. V 215-216, pp765-768, 2000.
- ¹⁸ V Moorthy, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar; Baldev Raj. Evaluation of post-weld heat treatment in 2,25Cr-1Mo steel tube to tube sheet welded joints using magnetic Barkhausen noise measurement. Materials Science and Technology. V13, n.7. pp 614-617, 1997. .
- ¹⁹ C Lachmann, TH Nitschke-Pagel, H. Wohlfahrt, Characterisation of residual stress Relaxation in Fatigue Loaded Welded Joints by X-Ray Diffraction and Barkhausen Noise Method. Materials Science Forum. V 347-349, .pp 374-379,2000.
- ²⁰ C. Lachmann, TH Nitschke-Pagel and H Wohlfahrt,. Nondestructive characterization of residual stress relaxation and fatigue processes in cyclically loaded welded joints. In: Proceedings of the 6th international conference on residual stress. Oxford.U.K. pp1400-1409, 2000.