

EL RUIDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN: UN MÉTODO DE END PARA MONITOREAR MICROESTRUCTURAS EN UNIONES SOLDADAS

The magnetic Barkhausen noise: A NDT method for microstructural monitoring of welded join.

RESUMEN

Este trabajo presenta una revisión del RMB como técnica no destructiva y su aplicación en el monitoreo de microestructuras en uniones soldadas de aceros al carbono. Se utilizaron muestras de un, dos y tres pases en la condición como soldada. La caracterización de macroestructuras y de microdurezas se relacionaron con medidas de RMB en la superficie de la chapa. Con el RMB se identificaron las regiones de la soldadura, específicamente el límite de fusión y la zona afectada térmicamente.

PALABRAS CLAVES: Ruido Magnético de Barkhausen, Ensayos No Destructivos Magnéticos.

ABSTRACT

This work show the Magnetic Barkhausen Noise (MBN) can be used that non destructive testing in the monitoring of the microstructures of butt welding in structural carbon steel. Welded plates of one, two and three bead were made and monitoring as welded. Microstructures and microhardness characterization were made. MBN measuring at the surface plate were related with microstructural characterization. MBN identified the welded zones, mainly the fusion boundary and the heat affected zone.

KEYWORDS: Magnetic Barkhausen Noise. Magnetic Non-Destructive Testing..

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.

En soldaduras de aceros al carbono, la microestructura y dureza varían desde el centro del cordón hacia el metal base como consecuencia de los ciclos térmicos experimentados por cada punto.

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

CLAUDIA PATRICIA SERNA GIRALDO

Ingeniera Mecánica, PhD
Profesora Auxiliar
Universidad de Antioquia.
Investigadora Universidad de São Paulo
claserna@udea.edu.co

LINILSON RODRIGUES PADOVESE

Ingeniero Mecánico. PhD
Profesor Doctor
Universidad de São Paulo
lrpadove@usp.br

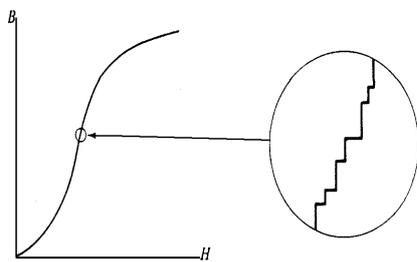
2. EL RUIDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

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°.

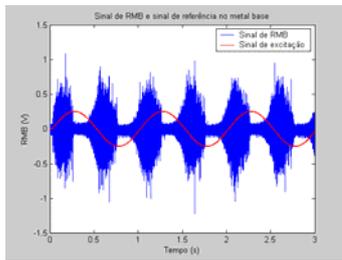
Al aplicar un campo magnético variable a un material ferromagnético, se ha observado que alrededor del campo coercitivo (H_c), el aumento en la inducción (B) como consecuencia del aumento del campo magnético aplicado (H), sucede de manera brusca, como pequeños saltos que se conocen como saltos de Barkhausen, 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 [1].

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.

El RMB depende de los parámetros empleados para la magnetización, como la frecuencia [1-3] y la intensidad de la magnetización [4,5.] Depende también de las características del material como el tamaño de grano [6-8], el contenido de carbono [9,10] y el estado de tensiones [11,12]. 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 [13-15] y otros han sido realizados en soldaduras reales para evaluar el efecto del tratamiento térmico después de la soldadura [16] o el desempeño de la unión soldada sometida a fatiga [17-18].



a)



b)

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

3. MATERIAL Y MÉTODOS

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.

Fe	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo
98,32	0,111	0,308	0,989	0,032	0,011	0,029	0,098R	0,050

Tabla 1. Composición química del acero A36 empleado, (% en masa).

Fueron realizadas uniones soldadas a tope de uno, dos y tres pases, con preparación de bisel en V, utilizando el proceso SMAW con electrodo E7018. En la tabla 2 se presentan los parámetros de soldadura. El refuerzo del cordón fue retirado mediante rectificado con pasos de 0.01 mm y usando suficiente fluido de refrigeración.

Número de pases	Corrente (A)
-----------------	--------------

1	110
2	100
3	115

Tabla 2. Parámetros de soldadura utilizados.

Las microestructuras fueron caracterizadas a través de microscopía óptica, utilizando como ataque químico nital 2 %. Macroscopicamente se midieron los tamaños de la zona de fusión y de la zona afectada térmicamente (ZAT). 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.

El RMB fue medido en las superficies de la unión soldada, con un barrido a cada 1 mm a partir del metal base en la distancia de 40 mm hasta el centro del cordón, como se muestra en la figura 2.

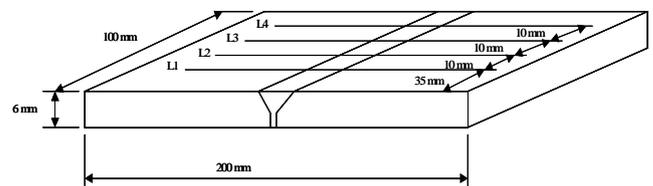


Figura 2. Esquema de mediciones de RMB en la superficie de la muestra.

Un esquema del sistema de medición empleado para adquirir la señal de RMB se muestra en la figura 3.

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 tipo bobina capta los pulsos electromagnéticos, correspondientes a la señal de Barkhausen. Estos pulsos son amplificados y filtrados y después digitalizados por medio de una placa de adquisición de datos analógica/digital de 16 bits, con frecuencia de muestreo de 200 kHz. En cada punto de medición se adquirieron diez señales, de las cuales fueron determinados el promedio del rms (root mean square) y el promedio del valor máximo.

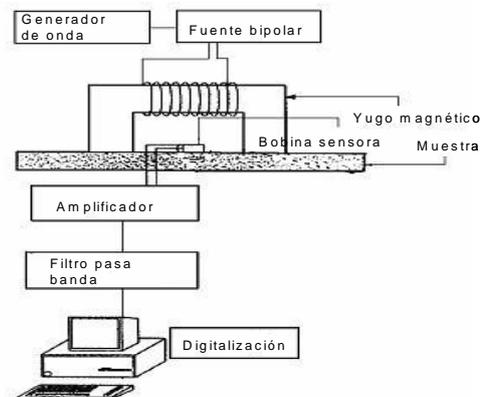


Figura 3. Sistema de medición de RMB.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

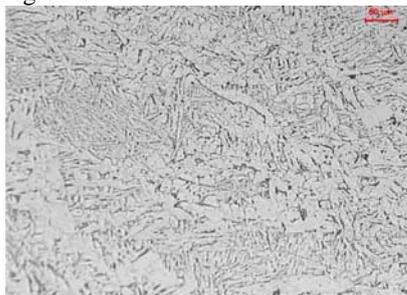
La unión soldada esta compuesta por varias regiones: la zona de fusión, la zona afectada térmicamente (ZAT) y el metal base no afectado. Los tamaños de la zona de fusión a partir del centro del cordón y de la ZAT son mostrados en la tabla 4.

Muestra	Tamaño de la zona de fusión (mm)	Tamaño de la ZAT (mm)
1 pase	5	2,5
2 pases	6	3
3 pases	4	2

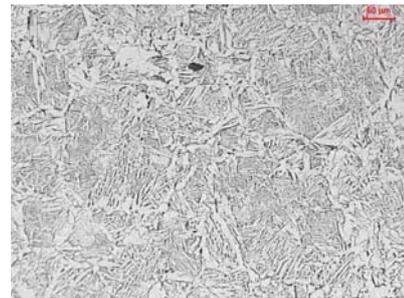
Tabla 4. Tamaños de la zona de fusión y de la ZAT en cada una de las muestras.

De la tabla 4 se puede observar que los tamaños de la zona de fusión y de la ZAT, son diferentes de acuerdo a la cantidad de pases con que se realizó la soldadura. Estas variaciones son consecuencia de los parámetros de soldadura que definen la energía de entrada de la soldadura. De un modo general, la energía de soldadura influye sobre la temperatura máxima alcanzada y las velocidades de enfriamiento. Cuando la energía de soldadura es menor, la temperatura máxima es menor y por lo tanto también disminuye el tamaño de la ZAT. Todos estos gradientes de temperatura y de velocidades de enfriamiento, producen microestructuras variadas en la unión soldada.

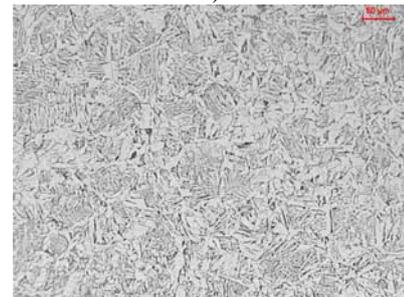
En la zona de fusión, se tiene un microestructura típica de solidificación, con granos columnares de ferrita creciendo en la dirección del centro del cordón y con perlita en el espaciado interdendrítico. En la ZAT cercana al cordón de soldadura se tiene la región de crecimiento de grano, en la cual durante 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. En las figura 4 se muestran las micrografías de todas las regiones.



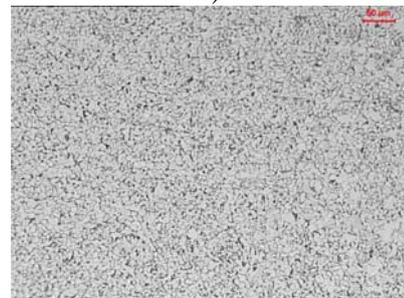
a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 4..Microestructuras en las diferentes regiones de 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.

La variación en microestructuras produce también una variación de microdurezas. Esta variación se representa en la figura 5, la cual muestra las microdurezas medidas en la sección transversal a un milímetro de la superficie. Se resalta en línea punteada la región que corresponde a la ZAT.

Se observa de la figura 5 que en la zona de fusión, la microdureza es heterogénea, como consecuencia de la heterogeneidad de microestructura en esta región. En la ZAT se observa que ocurre una disminución de microdureza desde el límite de fusión hasta el fin de la ZAT.

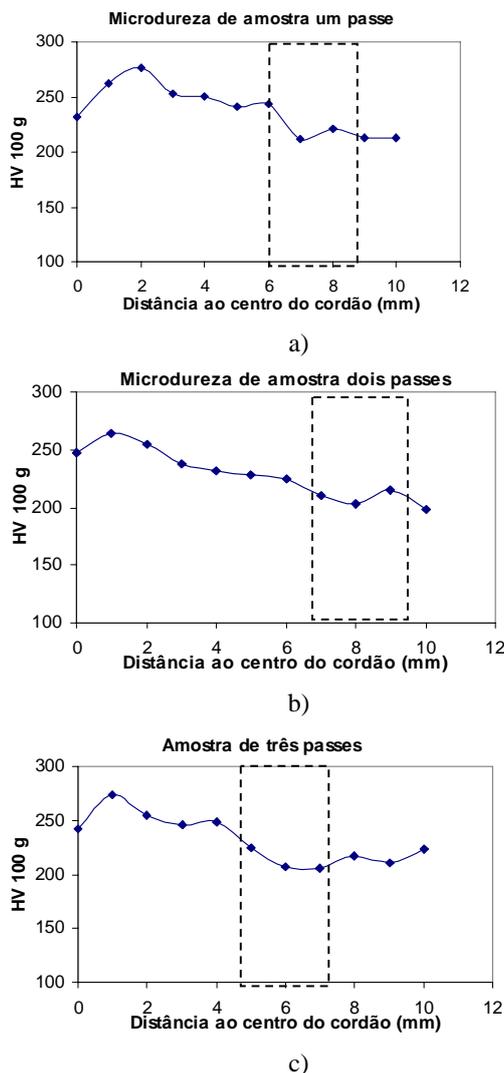


Figura 5. Mediciones de microdureza en las diferentes muestras. a) un pase, b) dos pases, c) tres pases.

Con respecto al RMB, se levantaron mapas superficiales de los valores máximo y rms, con el fin de monitorar las diferentes zonas, estos se muestran en la figura 6 para la muestra de un pase, figura 7 para la muestra de dos pases en la figura 8, para la muestra de tres pases.

De las figura 6, 7 y 8 se puede observar que en los mapas superficiales aparecen claramente la zona de metal base no afectado, la ZAT y la zona de fusión. Se resalta con línea punteada el límite correspondiente a la ZAT y el metal base. En la zona de fusión se presentan los menores valores de RMB, los cuales aumentan hasta que llegan al metal base. Se observa que el análisis con el valor rms presenta con mayor nitidez las diferentes regiones, mientras que con el valor máximo hay mayor variación en la delimitación de las zonas.

En las figuras 6 y 7, para las muestras de un y dos pases, las regiones aparecen mas nítidas con el valor rms. En la figura 8, para la muestra de tres pases, las regiones son mas claramente diferenciadas con el valor máximo.

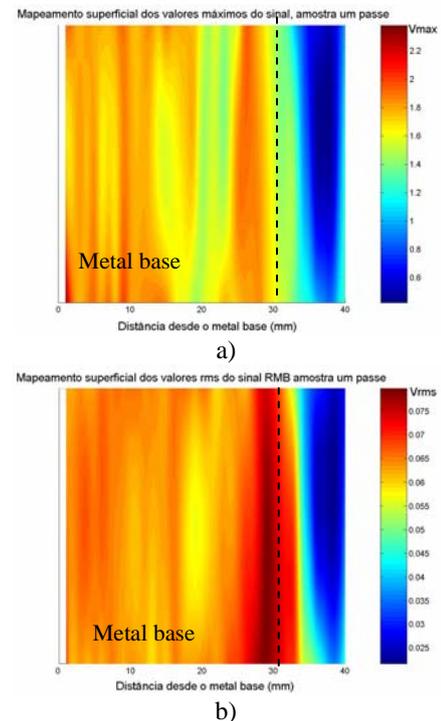


Figura 6. Mapas superficiales de RMB de la muestra de un pase. a) valor máximo, b) valor rms.

Al aplicar un campo magnético a un material ferromagnético, las paredes de dominio se desplazan de manera discontinua como resultado de su interacción con puntos de anclaje que actúan como barreras al movimiento. Se observó que en la unión soldada, la microestructura varía conforme se aumenta la distancia al centro del cordón como consecuencia de los diferentes ciclos térmicos, y por lo tanto las barreras al movimiento de las paredes de dominio tambien pueden variar. Así, la variación microestructural produce un proceso de magnetización diferente en cada región, como consecuencia de diferentes interacciones entre el movimiento de las paredes de dominio y los puntos de anclaje

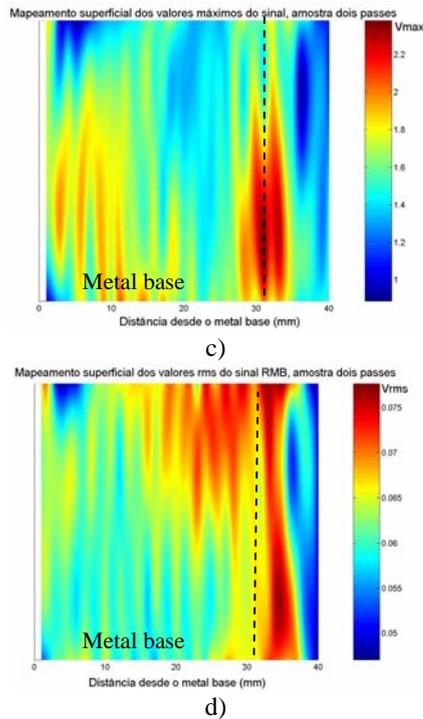


Figura 7. Mapas superficiales de RMB de la muestra de dos pases. a) valor máximo, b) valor rms.

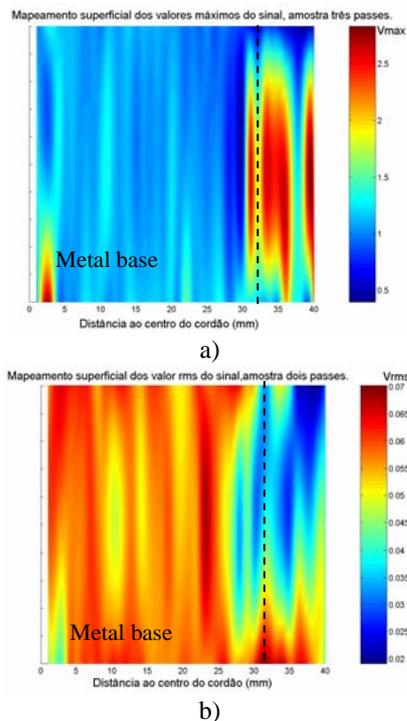


Figura 8 Mapas superficiales de RMB muestra de tres pases. a) valor máximo, b) valor rms.

Al comparar los mapas superficiales del RMB con las mediciones de microdureza, se puede ver de forma general que en la zona de fusión es donde se presentan los mayores valores de microdureza y en esa región se tienen los menores valores de RMB. En la medida que se aleja hasta la ZAT y el metal base, la microdureza disminuye. Al mismo tiempo, el valor de RMB aumenta. Esto está de acuerdo con lo reportado en la literatura [3] de la relación inversa que existe entre la dureza y la actividad de Barkhausen.

5. CONCLUSIONES

El trabajo realizado muestra la variación microestructural en una unión soldada de acero al carbono, y los tamaños de ZAT varían para muestras de uno, dos y tres pases, de acuerdo a los parámetros de soldadura empleados. Se muestra también que es posible monitorear la variación de microestructura y de microdureza en uniones soldadas por medio del RMB. Esas variaciones pueden determinarse por medio de parámetros como el valor máximo y el valor rms de la señal RMB, siendo que el rms mostró una mejor diferenciación de las regiones. Los resultados muestran que el RMB es una herramienta que puede ser utilizada como una técnica de ensayo no destructivo para evaluar el tamaño de la ZAT de juntas soldadas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a la agencia brasileña CAPES por el apoyo financiero y a la Universidad de Antioquia por la comisión de estudios.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D.C Jiles. Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect. Czechoslovak Journal of Physics. V 50, n 8, pp 893-988, 2000.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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
- [14] Joo-Hag Kim, Duck-Gun Park, Chi-II 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.
- [15] 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.
- [16] 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. .
- [17] 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.
- [18] 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.