

Ruido Barkhausen y emisión magneto acústica para la caracterización de materiales ferromagnéticos

RUIZ, D.H. ^I; PIOTRKOWSKI, R. ^{II}; LOPEZ PUMAREGA, M.I. ^I; RUZZANTE, J. ^{III}

^ICNEA, Av. Gral. Paz 1499, (1650) Pcia. de Buenos Aires, Argentina.

e-mail: diheruiz@cnea.gov.ar, lopezpum@cnea.gov.ar

^{II}ECyT, Universidad Nacional de General San Martín UNSAM, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

e-mail: piotrkow@mail.retina.ar

^{III}Universidad Tecnológica Nacional UTN, Regional Delta, Buenos Aires, Argentina.

e-mail: ruzzante@cnea.gov.ar

RESUMEN

Se aplicaron las técnicas del Ruido Barkhausen (RB) y la Emisión Magneto-Acústica (EMA) a un material ferromagnético con el objetivo de correlacionar las señales obtenidas con los cambios microestructurales. En la primera etapa del trabajo se desarrolló un Sistema Integral de Medición (SIM) para las señales de RB y EMA. Se construyeron diferentes dispositivos tales como un yugo magnético, una fuente de corriente de baja frecuencia, un amplificador y filtro de frecuencias y varios sensores de RB, a efectos de aplicar un campo magnético controlado y medir las señales de RB y EMA. Las primeras mediciones se realizaron sobre muestras de acero AISI 1020 con bajo contenido en carbono, inicialmente idénticas, que se habían preparado previamente mediante diferentes tratamientos termomecánicos. Una de las muestras se reservó como patrón; las otras fueron sometidas respectivamente a decarburización superficial, crecimiento de grano y deformación plástica. Se estudió también el efecto de los cambios microestructurales debidos al daño por radiación sobre las señales de RB y EMA. Para ellos se prepararon otras dos muestras de menor tamaño que las anteriores, a fin de que pudieran ser insertadas en el dispositivo de irradiación. La muestra irradiada fue sometida a un flujo de baja dosis de neutrones rápidos ($3.6 \cdot 10^{15}$ n/cm²) y la otra se conservó como patrón. Los resultados fueron relevantes en todos los casos. En particular, el valor cuadrático medio (RMS) de las señales RB y EMA, resultó ser un parámetro cuya variación siguió adecuadamente los cambios microestructurales. Los cambios en las señales magnéticas y la aparición de picos en las mismas se deben a diferentes mecanismos de anclaje de las paredes de los dominios magnéticos. El presente artículo conduce a recomendar el SIM desarrollado, como una valiosa herramienta de Ensayos No Destructivos (END) para materiales ferromagnéticos, siempre que el sistema se calibren previamente con una muestra patrón.

Palabras clave: Ruido Barkhausen; emisión magneto acústica; tratamientos termo-mecánicos; daño por radiación; tensiones internas; ensayos no destructivos.

Barkhausen noise and magneto acoustic emission in ferromagnetic materials

ABSTRACT

The techniques of Barkhausen Noise (BN) and Magneto Acoustic Emission (MAE) were applied to a ferromagnetic material with the objective of correlating the obtained signals with the micro structural changes. The first step was the development of an Integral Measurement System (IMS) for the BN and MAE signals. Different devices as magnetic yoke, current source, amplifiers, frequency filters and different magnetic sensors were constructed. The first measurements were developed on an AISI 1020 steel, with low carbon content, submitted to different thermo mechanical treatments. One of the test probe was used as standard, the others were subjected to surface decarburation, grain growth and plastic deformation. The effects of radiation damage were also studied with BN and MAE. Other two smaller test pieces were prepared. The irradiated specimen was subject to a low flow of fast neutrons ($3.6 \cdot 10^{15}$ n/cm²) and the other, was used as standard. In all cases the result were relevant. In particular, the RMS value of the BN and MAE signals resulted as an appropriated parameter whose variation followed adequately the microstructural changes. The changes and the peaks in the signals are owed to the anchors of the magnetic domain walls. The

present paper lead to recommend this IMS as a valuable tool in No Destructive Testting (NDT) for ferromagnetic materials, all times the system be previously calibrated with a standard probe.

Key words: Barkhausen Noise, Magneto acoustic Emission, Thermo-mechanical Treatments, Irradiation Damage, Internal Stresses, Nondestructive Testing (NDT)

1 INTRODUCCIÓN

El Grupo Ondas Elásticas de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), se dedica a la investigación y desarrollo en el área de las ondas elásticas. Con el objeto de desarrollar un equipo capaz de inspeccionar los recipientes de presión de centrales nucleares, se comenzó a trabajar hace unos años en un Sistema Integral de Medición (SIM) destinado a medir el Ruido Barkhausen (RB) y la Emisión Magneto Acústica (EMA). Los objetivos del presente artículo son describir el desarrollo del sistema, y presentar los resultados más importantes de las primeras mediciones, realizadas sobre un material ferro-magnético sometido a diferentes tratamientos termo-mecánicos y a daño por radiación [1, 2].

El RB ha sido estudiado por décadas en una variedad de materiales magnéticos y en diferentes situaciones. Sin embargo, sólo recientemente y debido a los importantes avances técnicos y teóricos, fue posible comenzar un estudio sistemático que lo relacionara con cambios en las propiedades de los materiales. Esto indujo el desarrollo del método de medición del RB como una técnica de END en materiales ferromagnéticos.

En un material ferromagnético los átomos se agrupan en zonas denominadas “dominios magnéticos”. En cada uno de estos dominios (con dimensiones del orden de los μm) se tiene un determinado sentido de magnetización neta. La superficie que encierra esta zona se denomina “pared del dominio magnético”.

Si pudiera “verse” con gran aumento la curva del lazo de histéresis para un material ferromagnético, se comprobaría que lo que aparece como una línea continua, en realidad está compuesta de pequeños incrementos discretos; éstos corresponden al movimiento repentino de las paredes de los dominios magnéticos. Al magnetizar un material ferromagnético, se logra una determinada dirección de magnetización privilegiada, haciendo que el dominio magnético apropiado sea cada vez más grande, moviéndose sus paredes. Como consecuencia, también se producen cambios en el volumen de los dominios magnéticos (magnetostricción), lo que produce súbitas ondas elásticas (EMA) que se propagan en el material. Con sensores de Emisión Acústica (EA) colocados sobre la superficie de la muestra, se detectan estas ondas.

El movimiento de las paredes de los dominios magnéticos, está fuertemente influenciado por la microestructura del material: borde de grano, inclusiones, precipitados, dislocaciones, etc, haciendo que frente a alguno de ellos se produzca un freno al movimiento de las paredes. Por lo dicho queda claro que la respuesta de un material ferromagnético a un campo magnético es en el nivel atómico y depende de sus características microestructurales. En presencia de un campo magnético que aumenta lentamente, el movimiento de las paredes de los dominios, puede ser monitoreado adecuadamente con métodos inductivos, ópticos o acústicos, detectándose así los saltos discretos. En el presente trabajo sólo se consideran los métodos inductivos y acústicos (RB y EMA). Actualmente existen numerosas referencias sobre el tema, algunas de ellas están citadas en el presente trabajo [3-19].

Se deduce que la EMA y el RB son tanto técnicas de END alternativas, como complementarias para detectar cambios de tensión y deformación en materiales ferromagnéticos. Una de las formas más comunes de medir el RB y la EMA es por medio de sus valores cuadráticos medios (valor RMS). A modo de ejemplo, en la Figura 1 se puede ver el lazo de histéresis, la fuerza magnética generada sobre el material y las consecuentes señales de RB y EMA obtenidas. Estos procesos sin embargo, son complejos y estocásticos, y son abordados por algunos autores mediante el estudio con técnicas sofisticadas de análisis de señales, como “onditas” y fractales [17, 18]. En nuestro Grupo hemos comenzado también a usar este tipo de análisis [20].

El objetivo del presente trabajo, es presentar el sistema de medición desarrollado en nuestro Laboratorio y verificar su capacidad para la caracterización de muestras ferromagnéticas. Dado que el RB y la EMA son fenómenos complejos que dependen de muchas variables, la caracterización que encaramos es relativa a una muestra patrón. Aún en este sentido los resultados presentados son preliminares.

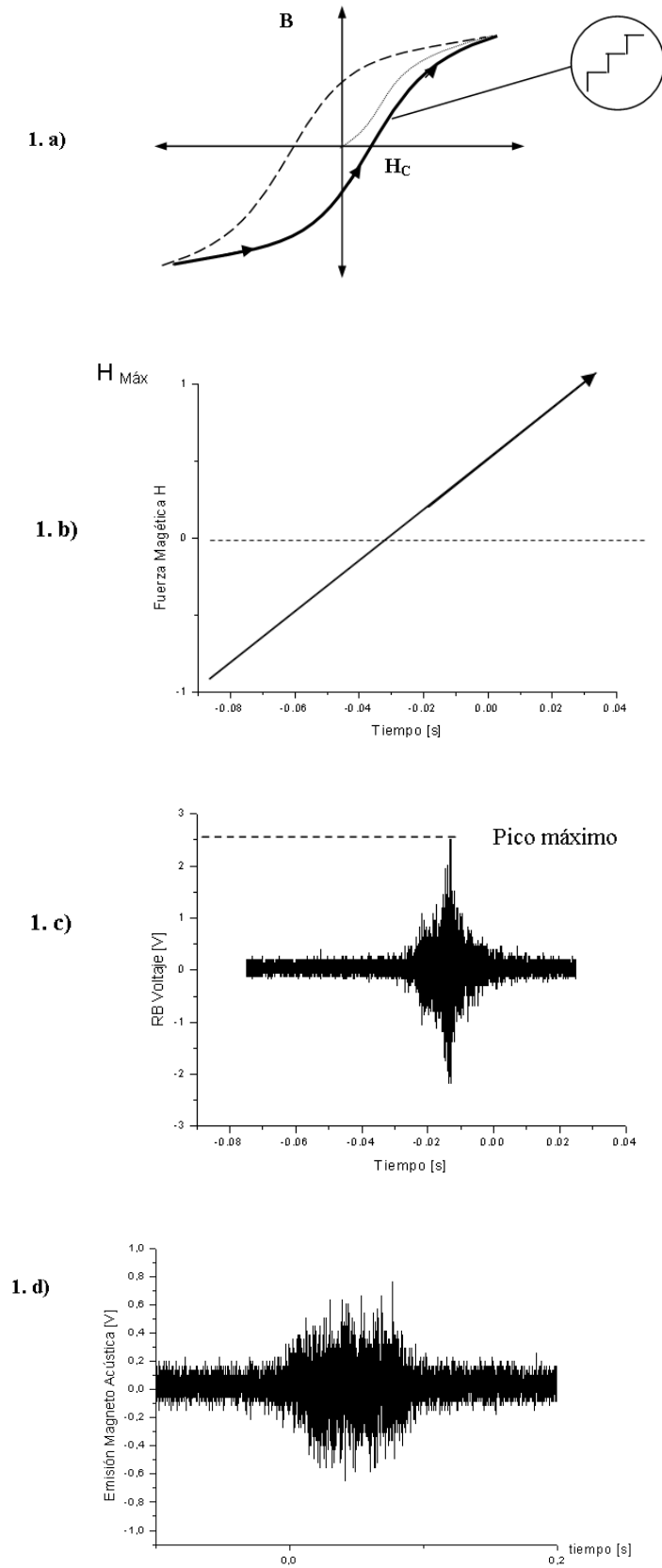


Figura 1: a) Curva de histéresis mostrando los saltos discontinuos en la magnetización; b) fuerza magnética (H) aplicada al yugo de excitación; c) señal de RB obtenida en la muestra, d) señal de EMA obtenida en la muestra.

2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para realizar las probetas, se eligió un acero comercial de bajo contenido de carbono (AISI 1020), de tamaño de grano heterogéneo ASTM 8 a 9 (22 a 16 μm) y con una composición química estándar mostrada en la Tabla 1. Se construyeron cuatro probetas de este material y se las sometió a distintos tratamientos termo-mecánicos. Los cambios analizados fueron: decarburización superficial; crecimiento del grano; y deformación plástica en frío. Los resultados que se obtuvieron de las probetas con diferentes tratamientos fueron comparados con los resultados obtenidos sobre una probeta sin tratamiento (testigo). Otro de los estudios encarados en este trabajo fue la medición de RB y EMA en una probeta sometida a un flujo de radiación neutrónica, produciéndole daños a la misma. Dichos daños afectan el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos y con ello se producen cambios en las señales de RB y EMA. Con ese fin se fabricaron otras dos probetas idénticas, pero de menor tamaño que las anteriores, dejando una como testigo ; la otra fue sometida a una dosis baja de neutrones rápidos ($3.6 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2$). Se midieron en ambos casos los mismos parámetros ya descriptos y se compararon entre si.

Tabla 1: Composición química del acero SAE/AISI 1020

Comp. en peso [%]	C	Mn	P máx.	S máx.	Si
SAE/AISI	0.18-0.23	0.30-0.60	0.040	0.050	0.15-0.30

Cada una de las muestras de un lote de cuatro, P1, P2, P3 y P4, con dimensiones 57 mm x 118 mm x 8 mm fue sometida a un tratamiento termo-mecánico diferente que consistió respectivamente en (ver detalles en la Tabla 2):

P1: Muestra patrón, sin tratamiento, con el tamaño de grano heterogéneo original, ASTM 9-8 (16 a 22 μm).

P2: Muestra decarburizada hasta una profundidad de 200 μm . El crecimiento de grano superficial fue hasta ASTM 4 (90 μm).

P3: Muestra sometida a crecimiento de grano hasta ASTM 6 (45 μm).

P4: Muestra laminada en frío.

Se prepararon también otras dos muestras de tamaño adecuado al dispositivo de irradiación, de 130 mm x 28.5 mm x 8 mm, con la misma composición química mostrada en la Tabla 1. Las muestras fueron:

P1.1: Muestra patrón, sin tratamiento.

P1.2: Muestra irradiada, bajo una intensidad de flujo neutrónico de 3.6×10^{15} neutrones/cm².

Tabla 2: Ciclos térmicos correspondientes a las muestras P2 y P3.

Muestra	Ciclo Térmico	Atmósfera	Resultado
P2	735°C, 4 h Enfriado en horno	No oxidante	Decarburización superficial
P3	975 °C, 3 h Enfriado en horno	Exotérmica y desoxidante (CO ₂ , N ₂ , H ₂ , vapor de agua)	Crecimiento de grano

2.1 Dispositivo de medición

Para producir el RB en un material ferromagnético, es necesario aplicar en forma controlada un campo magnético creciente, de manera que los saltos de inducción magnética se vuelvan detectables en el tiempo. El yugo magnético excitador se apoya sobre la muestra. También sobre ella se colocan la bobina sensora y el sensor de EA (ver Figura 2). En la Figura 3 se muestra una fotografía de todo el SIM desarrollado.

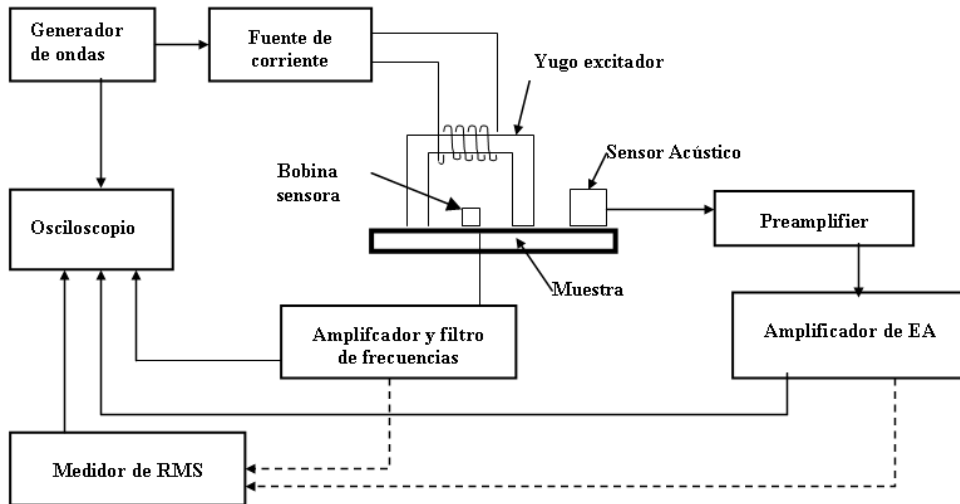


Figura 2: Disposición experimental del SIM para medición de RB y EMA.



Figura 3: Fotografía de todo el SIM para medición de RB y EMA.

El campo magnético (H) en el yugo, es producido por una corriente eléctrica que fluye a lo largo de una bobina que rodea al mismo. El valor de H se ajusta de modo que las señales de RB se hagan claramente visibles. La corriente eléctrica es producida por una fuente de corriente variable, que sigue la forma proporcionada por un generador de ondas. El rango de valores de la corriente a aplicar sobre el yugo, o el correspondiente H , se determinó después de haber caracterizado magnéticamente el material, mediante la realización de su ciclo de histéresis.

Se construyeron los distintos dispositivos (yugo magnético, fuente de corriente, amplificador y filtro de frecuencias y sensores de RB), para la aplicación del campo magnético controlado y la medición del RB y la EMA, lográndose un sistema integral de medición de dichos fenómenos (SIM). Para estos ensayos, la excitación del yugo fue una onda triangular de baja frecuencia, 2 Hz, con un valor de corriente máxima de 1,6 A.

Para la detección del RB se utilizaron diferentes bobinas sensoras, seleccionándose la de mayor sensibilidad. La EMA se midió con un sensor piezoeléctrico de banda ancha (100-1000 kHz), AE65 modelo WD, acoplado acústicamente a la superficie de la muestra, y conectado a un preamplificador de 40 dB. Luego se empleó una etapa amplificadora de ganancia variable hasta 60 dB acoplada a un medidor de RMS, ambos construidos en CNEA.

2.2 Parámetros medidos

En este trabajo sólo se presentan los resultados más representativos, para mayor detalle se puede consultar la bibliografía citada [1, 2].

Los principales parámetros de RB medidos fueron:

- Pico máximo (valor absoluto en V).
- Valor RMS de la señal completa (RB de un semiciclo, en V).

Para todos los casos se seleccionó una velocidad de muestreo de 250 ksamples/segundo.

Es importante señalar que la frecuencia de las señales de RB (≈ 1 Mz), es mucho más alta que las frecuencias de excitación del yugo (≈ 1 Hz).

Los principales parámetros de la EMA medidos fue:

- Pico máximo (valor absoluto en V).
- Valor RMS de la señal completa (EMA de un semiciclo, en V).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades magnéticas se dividen en dos categorías, las insensibles a la estructura, como la magnetización de saturación y la Temperatura de Curie, y las sensibles a la estructura, como la permeabilidad, la fuerza coercitiva, el RB y la EMA. Estos cambios en la microestructura, pueden ser cambios en los aleantes, en el tamaño de grano, en la densidad de dislocaciones, en el tamaño y orientación de segundas fases, etc. El RB y la EMA dependen también de las tensiones aplicadas y residuales y los daños por fatiga y por radiación [4-16].

Sólo se presentan aquí los principales resultados obtenidos. En la Tabla 3 se puede ver un resumen de los mismos. En las Figuras 4 a 7 se muestran algunos de los gráficos más representativos de todos los ensayos realizados. En todos los casos, se graficó el promedio de 100 mediciones del valor RMS de las señales obtenidas en cada semiciclo de excitación, en función del tiempo. Se representan los valores de cada probeta comparados con los respectivos de la probeta testigo. Para mayor claridad se analizan primero los resultados de las mediciones del RB para todas las probetas y luego los correspondientes resultados de la EMA.

Tabla 3: Resumen de resultados de todos los ensayos realizados

Muestra	P1	P2	P3	P4	P1.1	P1.2	
Dimensiones (mm)	57x118x8	57x118x8	57x118x8	57x118x8	28.5x130x8	28.5x130x8	
Tratamiento	Patrón	Decarb. sup.	Crec. grano	Laminado en frío (23%)	Patrón	Irradiación	
Dureza (HB)	150 ± 4	134 ± 23	128 ± 3	186 ± 5	150 ± 4	-	
Tamaño de grano ASTM, (µm)	8 to 9 (22 a 16)	4 (90)	6 (45)	-	8 a 9 (22 a 16)	-	
R B	Pico máximo promedio (V)	3.759 ± 0.500	2.634 ± 0.280	5.335 ± 0.630	3.437 ± 0.337	3.909 ± 0.515	3.815 ± 0.511
	Promedio del valor RMS de la señal completa (mV)	167.88 ± 6.84	195.95 ± 4.59	245.77 ± 10.82	265.95 ± 9.32	440.30 ± 25.09	424.86 ± 23.93
	Valor RMS máximo del pico 1 (V)	0.66219 ± 0.00001	0.25075 ± 0.00001	0.52997 ± 0.00001	0.59175 ± 0.00001	0.58624 ± 0.00001	0.68445 ± 0.00001
	Posición temporal (s)	-0.02639 ± 0.00001	-0.02451 ± 0.00001	-0.01525 ± 0.00001	-0.02152 ± 0.00001	-	-
	Valor RMS máximo del pico 2 (V)	-	0.24430 ± 0.00001	0.28217 ± 0.00001	-	-	-
	Posición temporal (s)	-	-0.04293 ± 0.00001	-0.0227 ± 0.00001	-	-	-
E M A	Máximo RMS del pico 1 (V)	0.21843 ± 0.00001	0.10611 ± 0.00001	0.16175 ± 0.00001	0.14556 ± 0.00001	0.11917 ± 0.00001	0.16764 ± 0.00001
	Máximo RMS del pico 2 (V)	-	-	-	0.14452 ± 0.00001	-	-

3.1 Medición del Ruido Barkhausen

En la probeta decarburizada (P2) se produjo en la superficie un aumento del tamaño de grano de la ferrita y una disminución en la proporción de perlita, lo que condujo a un material magnéticamente más blando. Por consiguiente, se observa la aparición más temprana del RB (ver Figura 4) y también una disminución en las señales de RB. Tanto el valor del pico máximo (Figura 4 y Tabla 3) como el gráfico del RMS de toda la señal, disminuyeron respecto de la probeta sin tratamiento (P1), mostrándose la aparición de dos picos, diferenciándose de la probeta sin tratamiento con un solo pico. Estos resultados son coherentes con los de Matzkanin [9]. Otros autores encontraron variaciones en el RB cuando en el acero se varía el contenido de C y por lo tanto el tamaño y distribución de las fases, modificando así, la fijación y el tamaño de los dominios magnéticos [6, 8].

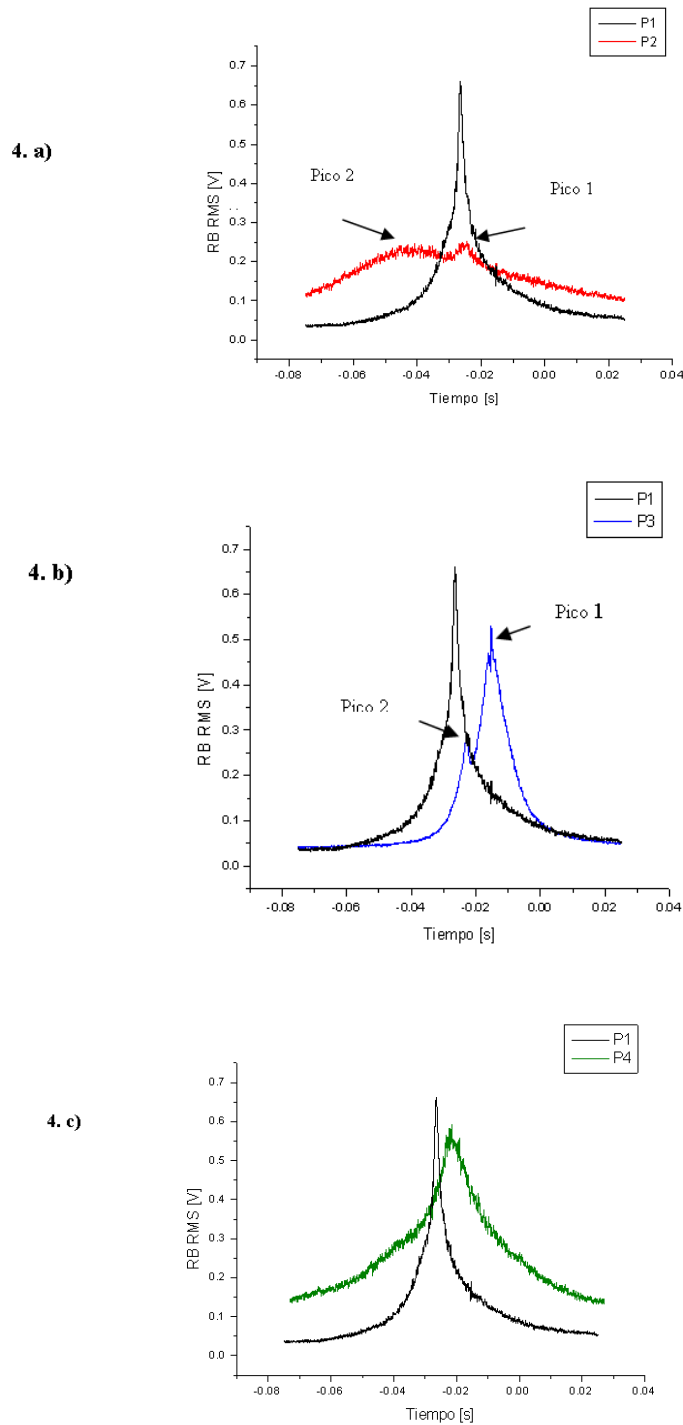


Figura 4: Valores RMS de señales de RB para las probetas: (a) P2, (b) P3 y (c) P4 comparadas con P1 (testigo).

En la curva de RMS (Figura 4 y Tabla 3) de la probeta con grano crecido (P3), se ve la aparición de dos picos retrasados respecto de la probeta testigo, además estos picos resultan ser menores al pico del material original. Este resultado muestra un mecanismo diferente del movimiento de las paredes de dominios, distinto del encontrado en otras probetas y requeriría más estudio.

En el caso de la probeta con deformación plástica (P4), la curva del RMS (Figura 4 y Tabla 3), el valor del pico máximo de la señal es similar al del estado original, sin embargo el valor RMS de toda la señal es claramente superior. Se ve la aparición de un solo pico y el retraso leve del mismo hacia campos H mayores ya que el pico aparece más tarde. Este resultado es en general coherente con la bibliografía [13].

Para el caso de la probeta irradiada (P1.2), en la Figura 5, las escalas de abcisas son arbitrarias, debido a que en cada caso se debió emplear un valor diferente en el “retraso” (“delay”) en el osciloscopio. Comparando la probeta irradiada (P1.2) con la correspondiente probeta testigo (P1.1), se ve que el pico máximo y el valor RMS de toda la señal es levemente mayor para la probeta irradiada (ver Tabla 3). Dado que el nivel de dosis alcanzado en la probeta irradiada fue muy bajo, los resultados obtenidos son preliminares y no pueden ser comparados con los de la bibliografía [14, 15]. Sin embargo el hecho de haber detectado diferencias entre la probeta irradiada y la testigo es un resultado promisorio.

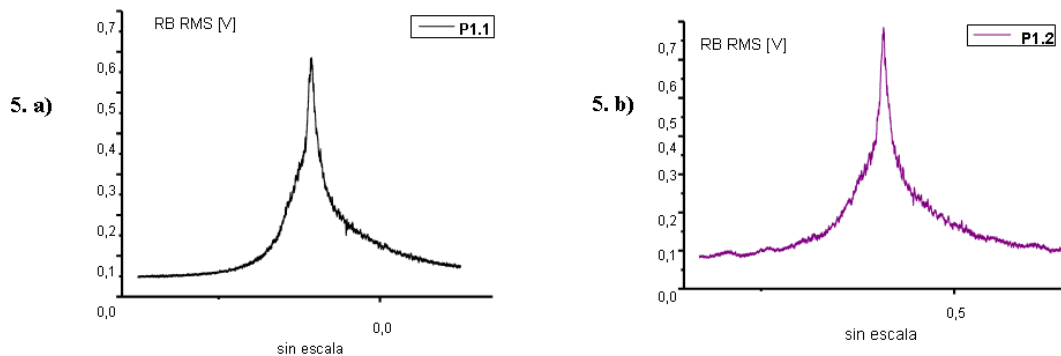


Figura 5: Valores promedios del RB para la probetas (a) P1.1 y (b) P1.2. Los valores de las escalas de abcisas son arbitrarios.

En [7] K. Titto señala que el RB es afectado tanto por las tensiones (residuales y externas) como por la microestructura (densidad y distribución de dislocaciones y textura). La coercitividad (H_c) depende de la microestructura tanto en aceros [8] como en otros materiales [10]. Para separar los efectos de las tensiones y de la microestructura sobre el RB sería necesario medir la coercitividad de cada muestra, lo que será encarado en futuros trabajos. De todas maneras, la intención de la presente etapa fue, como se dijo en la Sección 1, poner a prueba el sistema de medición desarrollado en nuestro Laboratorio en forma cualitativa.

3.2 Medición de la Emisión Magneto Acústica

La EMA fue estudiada por varios autores, principalmente por K. Ono [13, 14, 19]

En este trabajo se obtiene para todos los casos, las curvas como promedio de 100 mediciones instantáneas del valor RMS de la EMA. La frecuencia de muestreo fue de 250 ksamples/s, excepto para la probeta P4 en cuyo caso se empleó 100 ksamples/s. Aquí también se muestran resultados comparados con la probeta testigo (P1).

La probeta decarburizada (P2), presenta un nivel general del RMS, claramente menor respecto de la probeta testigo (ver Figura 6 y Tabla 3).

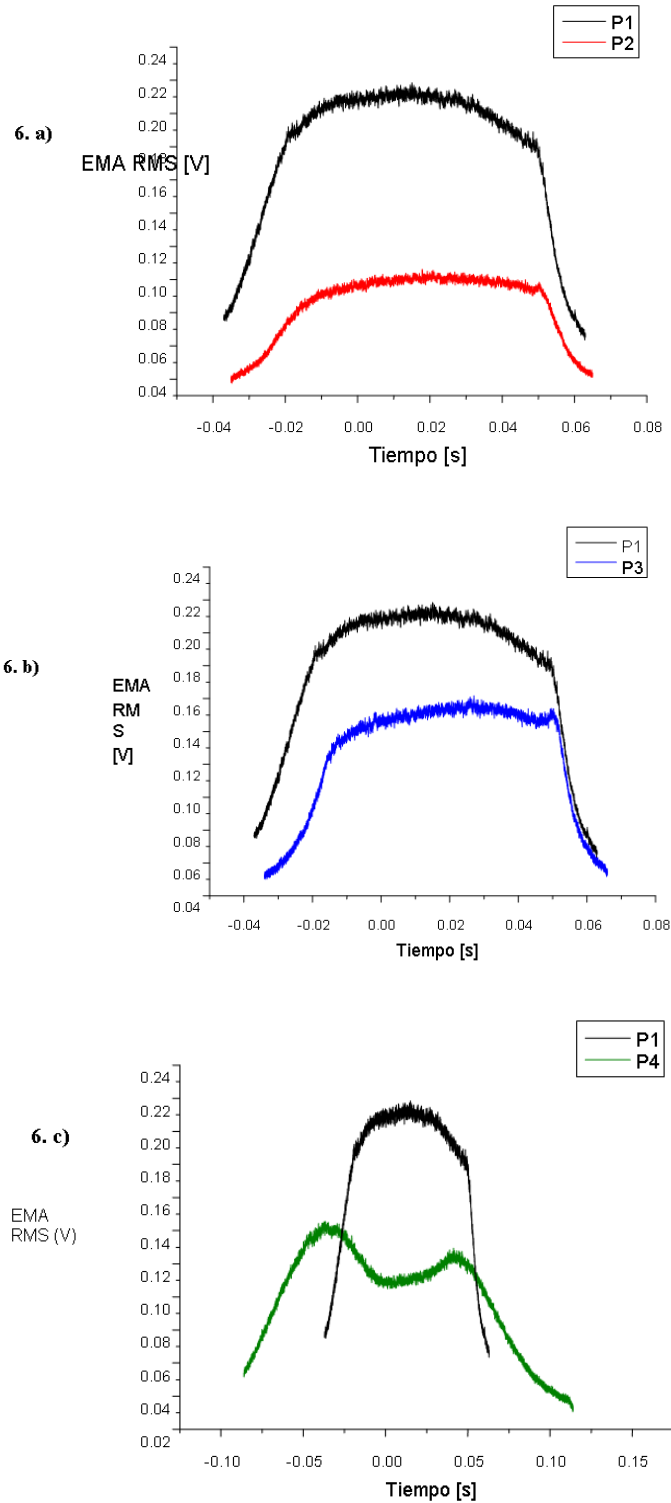


Figura 6: Curvas promedio de los valores RMS de señales de EMA, probetas P2 (a), P3 (b) y P4 (c), comparadas con P1.

En el caso de la probeta con grano crecido (P3), el nivel máximo de RMS medido es levemente menor que para la probeta original (ver Tabla 3), lo mismo sucede en toda la curva.

La probeta deformada en frío (P4) presenta una mayor duración en la señal EMA que la probeta testigo (ver Figura 6). Además en la gráfica aparecen dos picos.

Para poder ver los resultados de la probeta irradiada, en la Figura 7, las escalas de abcisas son arbitrarias, debido a que en cada caso se debió emplear un valor diferente de “retraso” (“dealy”) en el osciloscopio. La curva promedio es mayor para la probeta irradiada, presentando un leve incremento en el comienzo de la señal (ver Figura 7). El valor RMS máximo de la señal EMA es levemente mayor que en la patrón (ver Figura 7 y Tabla 3). En general podemos asegurar que si bien el nivel de dosis aplicado fue muy bajo, se perciben pequeñas modificaciones en los parámetros del Valor Pico Máximo del RMS, esto haría prometedora el estudio de esta técnica aplicada a materiales dañados por radiación de neutrones.

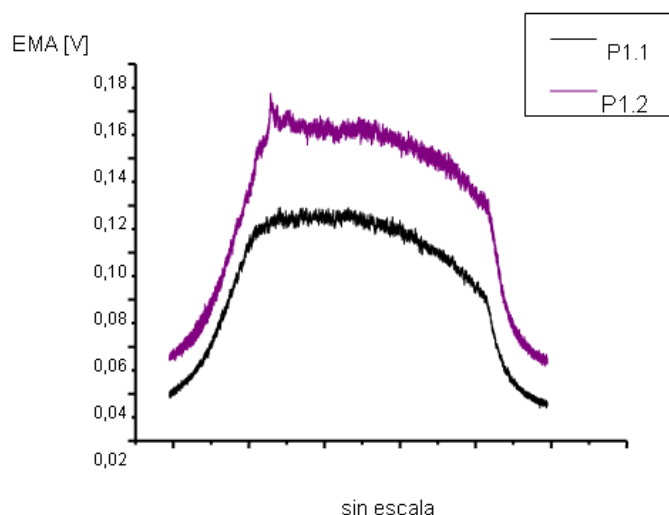


Figura 7: Valores promedio de RMS para la MAE, probetas P1.1 y P1.2. Los valores de las escalas de abcisas son arbitrarios.

4 CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo muestran que el análisis de las señales de RB y EMA obtenidos con el desarrollo y construcción de este Sistema de Medición Integral (SIM), puede ser utilizado para caracterizar cambios microestructurales en un material ferromagnético. Resultó particularmente ventajoso estudiar los valores RMS de las señales de RB y EMA, con la aparición de picos con diferente localización temporal. Estas características están relacionadas con los diferentes mecanismos de anclaje de las paredes de los dominios magnéticos, a medida que varía la microestructura del material.

La posibilidad de usar el SIM desarrollado, como herramienta de END, para materiales ferromagnéticos es clara, siempre que se realice previamente la calibración del sistema, con muestras patrón o elementos testigos con distinto grado de cambio microestructural, de acuerdo al rango que se desee evaluar.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] RUIZ, A., *Ruido Barkhausen y Emisión Magneto Acústica: desarrollo de un sistema de medición y aplicación a la caracterización microestructural*, Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales, Instituto Sabato, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Universidad Nacional de General San Martín (UNSAM), Buenos Aires, Argentina, Junio de 2005.
- [2] RUIZ, A., MARENGO, J., LÓPEZ PUMAREGA, M. I., PIOTRKOWSKI, R., RUZZANTE, J.E., “Medición del ruido Barkhausen y emisión magneto acústica en un acero AISI 1020”, *Ensayos No Destructivos y Estructurales, Actas del V Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales (V CORENDE)*, pp. 317-324, Neuquen, Argentina, 2-4 de noviembre, 2005.
- [3] DAS, S.K., JOARDER, A., MITRA, A., “Magnetic Barkhausen emissions and microstructural degradation study in 1.25 Cr–0.50 Mo steel during high temperature exposure”, *NDT&E International*, v. 37, pp. 243–248, 2004.

- [4] BALDEV, R., MOORTHY, V., JAYAKUMAR, T., RAO, B.S.K., “Assessment of microstructures and mechanical behaviour of metallic materials through non-destructive characterization”, *International Materials Reviews*, v. 48, n. 5, pp. 273, 2003.
- [5] MOORTHY, V., VAIDYANATHAN, S., JAYAKUMAR, T., RAJ, B., “Effect of tensile deformation on micromagnetic parameters in 0.2% carbon steel and 2.25Cr±1Mo steel”, *Acta Materialia*, v. 47, n. 6, pp. 1869-1878, 1999.
- [6] GATELIER-ROTHERA, C., FLEISCHMANN, P., CHICOIS, J., FOUGERES, R., *Nondestructive Testing Evaluation*, v. 8-9, pp. 591-602, 1992.
- [7] TIITTO, K., “Use of Barkhausen effect in testing for residual stresses and materials defects”, *NDT International*, v. 26, n. 1, pp. 36-41, October 1988.
- [8] TIITTO, S., “On the Influence of microstructure on magnetization transitions in steel”, *Acta Polytechnica Scandinavia, Applied Physics*, v. 80, n. 119, 1977.
- [9] MATZKANIN, G., BEISSNER, R., TELLER, C., “The Barkhausen effect and its applications to nondestructive evaluation”, *Nondestructive Testing Information Analysis Center*, October 1979.
- [10] HOFMANN, B., REININGER, T., KRONMÜLLER, H., “Influence of the microstructure on the magnetization processes in nanocrystalline Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{13.5}B₉”, *Physica Status Solidi (a)*, v. 134, N°1, pp. 247-261, 2006.
- [11] NG, D.H.L., CHO, K.S., WONG, M.L., “Study of microstructure mechanical properties, and magnetization process in low carbon steel bars by Barkhausen emission”, *Material Science & Engineering*, v. A358, pp. 186-198, 2003.
- [12] MOORTHY, V., SHAW, B.A., “Evaluation of tempering induced changes in the hardness profile of case-carburised EN 36 steel using magnetic Barkhausen noise analysis”, *NDT&E international*, v. 36, pp. 43-49, 2002.
- [13] ONO, K., SHIBATA, M., “MAE – New Method for Nondestructive Stress Measurement”, *NDT International*, v. 5, pp. 227-234, 1981.
- [14] KWON, O-Y, ONO, K., “Detection of irradiation effects on reactor vessel steels by magneto Acoustic Emission”, *Journal of Acoustic Emission*, v. 9, n. 4, 1990.
- [15] SHONG, W.J., WILLIAMS, J.G., STUBBIKS, J.F., “Interrogation of radiation effects in nuclear Pressure Vessel Steel using Magnetic Properties Measurements”, *ANS Transactions*, pp. 192, 1993.
- [16] SIM, C.M., PARK, S-S., SONG, Y-Y, PARK, D-G., CHANG, K-O., “Harmonic frequency analysis of acoustic Barkhausen Noise on neutron irradiated material”, *15th WCDT Roma 2000*, 2000.
- [17] MAGALAS, L.B., “Application of the wavelet transform in mechanical spectroscopy and in Barkhausen noise analysis”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 310, pp. 269–275, 2000.
- [18] DURIN, G., MAGNI, A., BERTOTTI, G., “Fractal properties of the Barkhausen effect”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 140-144, pp. 1835-1836, 1995.
- [19] ONO, K., “Magnetomechanical Acoustic Emission of Ferromagnetic Material at Low Magnetization Level (Type I Behavior)”, *Journal of Acoustic Emission*, v. 3, n. 3, pp. 144-148, 1984.
- [20] ISAACSON, S., PIOTRKOWSKI, R., GÓMEZ, M.P., LÓPEZ PUMAREGA, M.I., RUZZANTE, J.E., “Análisis frecuencial, mediante multi-resolución de señales de ruido Barkhausen”, In: *Quinto Encuentro del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica, E-GLEA 5*, Oberá, Misiones, Argentina, 29 de agosto-1 de septiembre, 2007.