

Estudio de la anisotropía magnética de aceros al Si con RMB

Study of the magnetic anisotropy of Si steels with MBN

Presentación: 13 y 14 de septiembre de 2023

M. R. Neyra Astudillo

Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional (UTN), San Martín 1171, Campana, Buenos Aires, Argentina.
Departamento Coordinación Proyecto ICES, Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina.

mneyra@frd.utn.edu.ar

F. Castillo Menegotto

Departamento de Física "J.J. Giambiagi", FCEN, U.B.A., Argentina

franciscocm9@hotmail.com.ar

H. Sánchez

Departamento Coordinación Proyecto ICES, Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina

hsanchez@cnea.gov.ar

D. Mouriño

Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional (UTN), San Martín 1171, Campana, Buenos Aires, Argentina.

djmour17@yahoo.com.ar

M. Gómez

Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional (UTN), San Martín 1171, Campana, Buenos Aires, Argentina.
Departamento Coordinación Proyecto ICES, Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina.

mpgomez@cnea.gov.ar

Resumen

Cuando un material ferromagnético es sometido a campos magnéticos lentamente variables, se generan cambios en su magnetización, produciéndose "saltos" discretos. Estos saltos se generan por el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos. Una pequeña bobina sobre la superficie de la muestra detecta el Ruido Magnético Barkhausen. El movimiento de estas paredes es regulado por la microestructura del material (precipitados, tamaño de grano, tensiones residuales, etc.). De esta manera indirecta se puede caracterizar al material. En este trabajo se estudian dos placas de acero al Si de diferente orientación: Grano Orientado y Grano No Orientado. Las mediciones de Ruido Magnético Barkhausen se realizaron en cada placa, caracterizando su anisotropía magnética. Para complementar, se estudió el ciclo de histéresis de cada material. Los resultados muestran una clara influencia de la orientación del grano.

Palabras clave: RMB, acero eléctrico, anisotropía magnética, grano orientado.

Abstract

When a ferromagnetic material is subjected to slowly varying magnetic fields, changes in its magnetization are generated, producing discrete "jumps". These jumps are generated by the movement of the walls of the magnetic domains. A small coil on the surface of the sample detects the Barkhausen Magnetic Noise. The movement of these walls is regulated by the microstructure of the material (precipitates, grain size, residual stresses, etc.). It is this indirect way that allows characterizing the material. In this work, two Si steel plates of different orientation are studied: Grain Oriented and Non-Grain Oriented. Barkhausen Magnetic Noise measurements were performed on each plate, characterizing its magnetic anisotropy. To complement, the hysteresis cycle of each material was studied. The results show a clear influence of the grain orientation.

Keywords: MBN, electrical steel, magnetic anisotropy, grain oriented.

Introducción

El acero al silicio (Si), comúnmente llamado acero eléctrico es una aleación de Fe con un contenido de Si de hasta el 6,5%. El Si aumenta significativamente la resistencia eléctrica del acero, lo que disminuye las corrientes de Foucault inducidas por el campo magnético y por lo tanto reduce las pérdidas en el núcleo. Se pueden añadir también manganeso y aluminio hasta en una proporción de 0,5%. El estudio del comportamiento de estos aceros es de vital importancia para la industria, ya que forman parte de muchas máquinas eléctricas, pudiéndose encontrar como estatores y rotores de máquinas rotativas, y en los núcleos de transformadores eléctricos. Hay dos tipos principales de acero al Si unos de grano orientado (GO) y otros de grano no orientado (GNO).

Los aceros eléctricos de GO normalmente tienen un nivel de Si de 3% de Si. Se utilizan principalmente para grandes transformadores y generadores debido a sus ventajas como el ahorro de energía y la reducción significativa del volumen. También por su eficiencia son muy utilizados en centrales nucleares, hidroeléctricas y térmicas de gran escala (Chang Sheng Li et al., 2013).

Los aceros eléctricos de GNO, por lo general tienen un nivel de Si de 2 a 3,5 %. Son materiales magnéticamente blandos comúnmente utilizados en la industria de motores eléctricos para la fabricación de núcleos laminados. Para esos usos se requiere que las láminas de acero tengan propiedades magnéticas óptimas en todas las direcciones. Numerosos estudios se realizan para optimizar las tecnologías de procesamiento de los aceros eléctricos GNO para mejorar su calidad magnética (Youliang He et al., 2021; Stupakov O, et al., 2010).

El Ruido Magnético Barkhausen (RMB) es una técnica no destructiva para el ensayo de materiales ferromagnéticos. Es una técnica muy sensible a la microestructura, impurezas y otros defectos de los aceros, lo que permite investigar el estado de los mismos, incluyendo su orientación cristalográfica. La anisotropía magnética es la no homogeneidad de las propiedades magnéticas al ser medidas en diferentes direcciones del material. Cuando la población de granos exhibe una orientación preferencial, conocida como textura, el material también puede exhibir mayor anisotropía magnética. Las propiedades magnéticas de un material dependen de la dirección en la que son medidas. Sólo la anisotropía magnetocristalina que está directamente relacionada con la simetría del cristal es una propiedad intrínseca del material, mientras que las otras anisotropías magnéticas (de forma, de intercambio, de tensiones, etc.) son extrínsecas o "inducidas". El diseño de los materiales ferromagnéticos comerciales depende de su anisotropía magnética (Cullity B. D., Graham C. D., 2009; Stefanita C. G., 2008; Neyra Astudillo M. R., 2018). Por estas razones, el RMB es una técnica adecuada para detectar esta anisotropía, aun desconociendo el proceso de fabricación. Como resultado, cuando se mide el valor RMS (valor cuadrático medio) de las señales de RMB, en función de la dirección del campo magnético externo aplicado, se puede estudiar la anisotropía magnética del material. La forma de la gráfica correspondiente revela la dirección del eje de fácil magnetización, ya que la señal RMB es mayor en esa dirección en particular. En ausencia de la anisotropía magnética, la gráfica del valor RMS es una circunferencia (Neyra Astudillo M. R., 2018; Campos, M. F. et al., 2011; Stupakov O, et al., 2010). En este trabajo se presentan las mediciones de RMB en dos placas de

aceros al Si de GO y GNO, siendo el objetivo estudiar la anisotropía magnética inducida por el proceso de laminación. Se complementa el estudio con mediciones del ciclo de histéresis.

Desarrollo

Materiales

Se estudiaron placas de acero al Si, proporcionadas por la Empresa Electropart Córdoba S.A. En la Figura 1 se muestran las fotografías de las placas estudiadas. En la Figura 1a) para la placa de GO se muestra con una flecha la dirección de laminación (DL) indicada por el fabricante. Las dimensiones de las probetas para la placa de GO son 25.5 cm x 17 cm x 0.23 cm y para la placa de GNO de 30 cm x 17 cm x 0.5 cm.

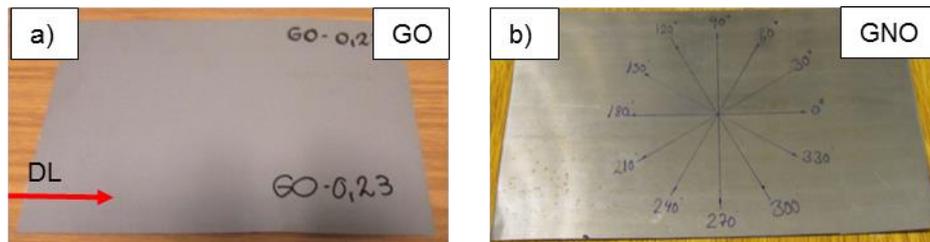


Figura 1. Fotografía de la placa de acero al Si, a) GO y b) GNO.

Medición del RMB

Para estudiar la anisotropía magnética inducida por el proceso de laminación original, se utilizó la técnica de RMB. El campo de excitación del yugo se lograba con una tensión sinusoidal de 10 Hz y una amplitud de 1 V producida por un generador, que luego era amplificada. La bobina sensora del RMB estaba colocada en el centro del yugo. El amplificador de esta bobina sensora tiene una banda de paso de 5 kHz a 200 kHz. El yugo fue ubicado sobre la dirección 0°-180° de una circunferencia dibujada sobre la probeta, de modo que la dirección de laminación y las líneas del campo coincidieran con la dirección 0°-180°. Luego se variaba la dirección del campo girando el yugo cada 30° hasta completar la circunferencia. Se midieron 10 repeticiones por cada ángulo. Todas las señales fueron registradas en un osciloscopio digital PicoScope 5000 Series. En la Figura 2 a) se muestra la fotografía del sistema de medición del RMB y en b) el detalle de la posición del yugo y la bobina sensora, ubicación 0°-180° sobre la probeta.



Figura 2. a) Fotografía del Sistema Experimental del RMB. b) detalle de la posición del yugo y la bobina sensora, ubicación 0°-180°.

Resultados y discusión

Para el estudio anterior se llevaron a cabo mediciones en 12 posiciones diferentes durante la rotación completa del yugo-bobina sensora cada 30°. Por cada posición se midió 10 repeticiones. Se muestra el promedio de las señales por cada posición. La frecuencia de muestreo es de 500 kHz/s.

En la Figura 3, se muestran las señales de RMB para los ángulos: 0°, 30°, 60° y 90°, para los aceros de GO y GNO. Se observa que para el GNO, no cambia la amplitud ni la forma de la señal. Para GO, cambia la amplitud y la forma de la señal. La mayor amplitud es para el ángulo de 0° coincidiendo con la DL.

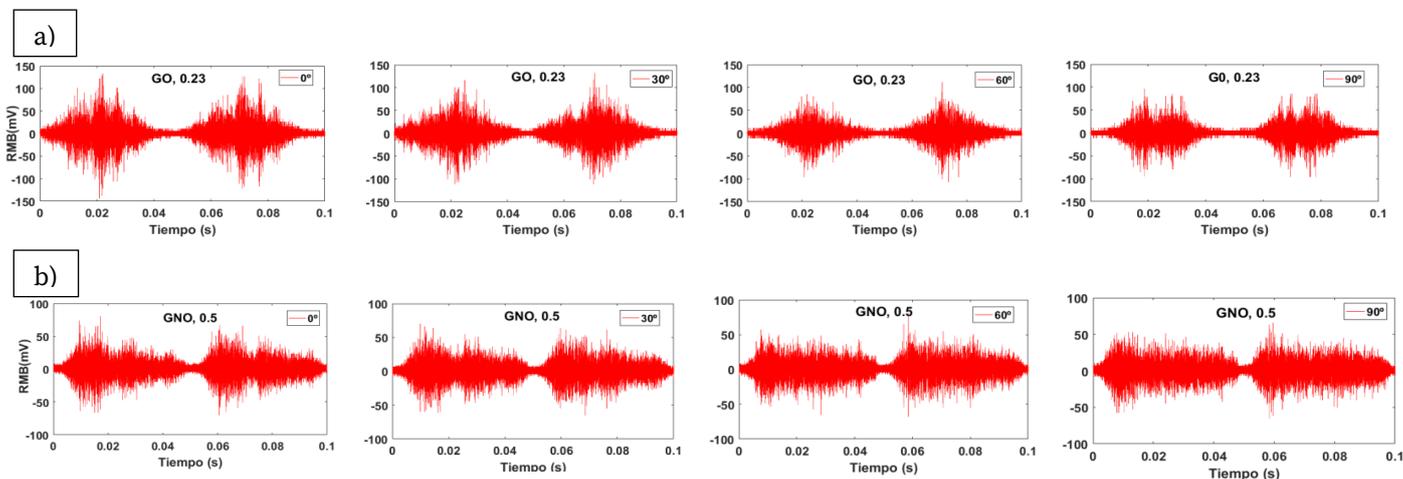


Figura 3. Señales de RMB a) GO y b) GNO, para los ángulos: 0°, 30°, 60° y 90°

En la Figura 4 se muestra el diagrama polar del valor RMS del RMB para cada placa de acero al Si. Estos valores fueron medidos sobre las placas originales, tal como fueron entregadas por el fabricante. El propósito de estas mediciones fue corroborar la dirección de laminación (DL). En la Figura 4 a) para el acero de GO la forma de la gráfica revela la existencia de anisotropía magnética, la señal de RMB es mayor en DL, coincidiendo con la dirección del eje de fácil magnetización, y en la Figura 4 b) para el acero de GNO hay una ausencia de anisotropía, la forma de la gráfica es una circunferencia. En ambos casos se corroboró la indicación del fabricante [4-6].

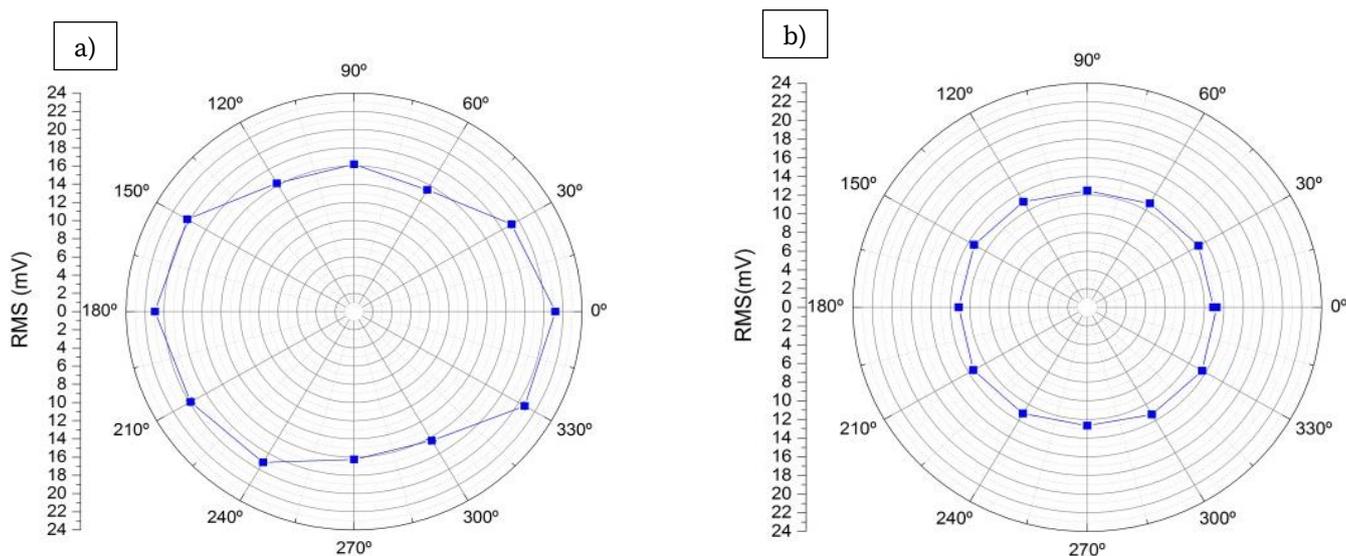


Figura 4. Mapa de anisotropía magnética usando el valor RMS del RMB para aceros de a) GO y b) GNO.

Para completar el análisis del comportamiento magnético de estos materiales, se midieron sus ciclos de histéresis. Esto se llevó a cabo con un equipo de ciclo de histéresis del Grupo de Emisión Acústica de la Facultad Regional Delta de la UTN. En la Figura 5 se muestra la superposición de los ciclos de histéresis del acero al Si con GO (Figura 6 a) y de GNO (Figura 5 b) para diferentes ángulos. En la Figura 5a) se observa que a medida que se

“rota” el ángulo de medición, se produce una rotación del ciclo de histéresis en el sentido anti horario. Esto ocurre porque en los ángulos diferentes a la DL se produce un aumento de bordes de grano, y la consecuente formación de puntos de anclaje, que dificultan el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos (PDM) resultando un aumento en la saturación magnética. En b) las curvas del GNO son cualitativamente similares porque es un material isotrópico (igual en todas las direcciones). También se observa una tendencia de la figura a “rotar” en sentido horario, pero en un grado menor, a medida que el yugo es rotado en sentido anti horario.

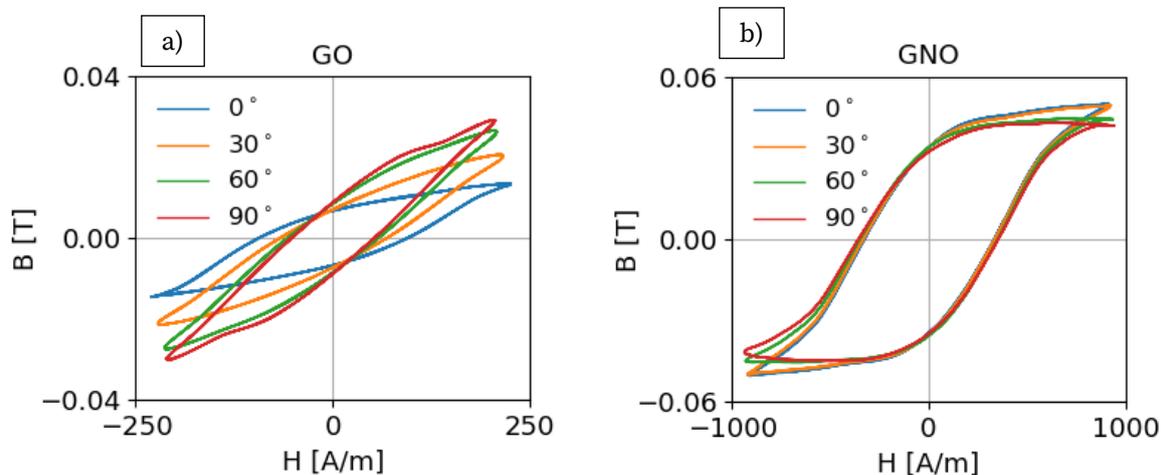


Figura 5. Curvas del ciclo de histéresis para diferentes ángulos a) GO y b) GNO.

Conclusiones

Se estudió la anisotropía magnética en dos placas de aceros al Si de GO y GNO con la técnica de RMB, y se complementó con el estudio de sus ciclos de histéresis.

Mediante los valores RMS del RMB en función del ángulo de medición sobre la placa, se pudo revelar la existencia de una anisotropía magnética en el acero de GO. La señal de RMB mostro ser mayor en la dirección de laminación (DL), coincidiendo con la dirección del eje de fácil magnetización. En cambio, para el acero de GNO no se encontraron indicios de una anisotropía magnética (ver Figura 3). En ambos casos se corroboró la indicación del fabricante.

En el estudio de los ciclos de histéresis, para el GO se observa que a medida que se “rota” el ángulo de medición, se produce una rotación del ciclo de histéresis en el sentido anti horario. Esto ocurre porque en los ángulos diferentes a 0°-180° (DL) se produce un aumentos de defectos, y la consecuente formación de puntos de anclaje, que dificultan el movimiento de las PDM resultando un aumento en la saturación magnética. Para el GNO las curvas son cualitativamente similares dado que se trata de un material isotrópico.

Referencias

- Campos, M. F., Campos, M. A., Landgraf, F. J. G., and Padovese L. R. (2011), “Anisotropy study of grain oriented steels with Magnetic Barkhausen Noise”, *Journal of Physics: Conference Series*, 303, 1-6.
- Cullity B. D, Graham C. D. (2009), *Introduction to Magnetic Materials*, 2da Edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, United States, 164-165.
- Hao Wang, Chang Sheng Li, Tao Zhu, Ban Cai, Gang Huo, Nasir Mohamed, (2013), “Effect of Ball Scribing on Magnetic Barkhausen Noise of Grain-oriented Electrical Steel”, *Journal of Materials Science & Technology*, 29, 7, 673-677.
- Stupakov O, Perevertov O., Stoyka V. and Wood R. (2010), "Correlation Between Hysteresis and Barkhausen Noise Parameters of Electrical Steels," in *IEEE Transactions on Magnetics*, 46, , 517-520,
- Neyra Astudillo M. R. (2018), “Caracterización de Materiales con Técnicas de Ruido Magnético Barkhausen y Emisión Magneto Acústica”, Tesis de Doctorado en Ciencia y Tecnología, Mención

Materiales, Instituto Sabato, Universidad Nacional de San Martín-Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina.

Stefanita C. G. (2008), "From Bulk to Nano. The Many Sides of Magnetism, Springer Series in Materials Science, 19-38.

Youliang He, Mehdi Mehdi, Hanke Liu, Erik J. Hilinski, Afsaneh Edrissy (2021), " Angular magnetic Barkhausen noise of incline- and cross-rolled non-oriented electrical steel sheets", Materials Characterization, 177, 111200.