

# Ruido Magnético Barkhausen para el análisis de deformación plástica en AISI 439

## Magnetic Barkhausen Noise for the analysis of plastic deformation in AISI 439

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, Gerencia Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Centro Atómico Constituyentes, Av. Gral. Paz 1499, Buenos Aires, Argentina.  
[mneyra@frd.utn.edu.ar](mailto:mneyra@frd.utn.edu.ar)

### **P. Peláez**

Gerencia Investigación y Aplicaciones, CNEA, Centro Atómico Constituyentes, Av. Gral. Paz 1499, Buenos Aires, Argentina.  
[pablopelaez5@gmail.com](mailto:pablopelaez5@gmail.com)

### **M. I. López Pumarega**

Departamento Coordinación Proyecto ICES, Gerencia Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, CNEA, Centro Atómico Constituyentes, Av. Gral. Paz 1499, Buenos Aires, Argentina  
[ilopezpumarega@gmail.com](mailto:ilopezpumarega@gmail.com)

### **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, CNEA, Centro Atómico Constituyentes, Av. Gral. Paz 1499, Buenos Aires, Argentina.  
[mpgomez@cnea.gov.ar](mailto:mpgomez@cnea.gov.ar)

## **Resumen**

En este trabajo se estudia el comportamiento plástico del AISI 439 a partir de la técnica de ensayos no destructivos de Ruido Magnético Barkhausen (RMB). Los objetivos son analizar la respuesta del RMB para diferentes porcentajes de deformación plástica y buscar una correlación entre ambas variaciones. Las probetas normalizadas fueron ensayadas en una máquina de tracción uniaxial a temperatura ambiente y a velocidad constante. Después de cada etapa de deformación, se midió el RMB. Luego, se realizaron análisis temporal y espectral de las señales de RMB. También se calculó el valor RMS (valor cuadrático medio) del RMB. Se observó un aumento en la amplitud de la RMB al aumentar la deformación hasta un valor determinado, después del cual disminuye. Los resultados obtenidos son prometedores para la aplicabilidad de este método magnético para la cuantificación de la deformación plástica.

**Palabras clave:** Aceros, Ruido Magnético Barkhausen, deformación plástica

## **Abstract**

In this work, the plastic behavior of AISI 439 is studied. The objective of this analysis is to correlate the response of the MBN to different percentages of plastic deformation. The standardized specimens were built and tested in a uniaxial tensile testing machine at room temperature and with constant rate. After each deformation, the MBN was measured. Temporal and spectral signal analysis was performed; RMS (root mean square) values of the MBN signal were calculated. An increase in the amplitude of the MBN was observed with increasing strain up to a certain strain value, after which it decreases. The results obtained are promising for the applicability of this magnetic technique for the quantification of plastic deformation.

**Keywords:** Steel, Magnetic Barkhausen Noise, plastic deformation

## Introducción

El acero inoxidable es un material que combina una excelente resistencia a la corrosión con propiedades mecánicas muy apropiadas para su aplicación en la construcción de estructuras y componentes. La complejidad de diseñar estructuras con este material, debido a su comportamiento tensión-deformación no lineal desde bajos niveles de deformación, ha hecho que el acero inoxidable sea un material ampliamente utilizado en infinidad de áreas desde hace años, pero con poca presencia en la construcción hasta la actualidad. El control de las estructuras metálicas de calidad conlleva a reducir gastos, ya que se podrían reducir los costos de mantenimiento y reparación. Además, ayuda a garantizar la seguridad de las infraestructuras (Navarro Cortés A., 2013). Es por ello que se deben inspeccionar los componentes regularmente para detectar signos de degradación. Las técnicas de Ensayos No Destructivos (END), ofrecen enormes beneficios, a través de la evaluación y el estudio de la integridad de los dispositivos críticos de cualquier industria, esto permite también realizar la extensión de vida de un recipiente, componente o estructura de una planta, permitiendo la posibilidad de la extensión de su vida útil. Dentro de los END existen algunas técnicas basadas en métodos magnéticos, que son muy sensibles a la microestructura y estados de tensiones residuales de los materiales ferromagnéticos. El Ruido Magnético de Barkhausen (RMB), pertenece a estas técnicas de END. El RMB se genera por cambios bruscos en la magnetización cuando un material ferromagnético se somete a un campo magnético variable. Se detecta, a través del movimiento de las paredes de los dominios magnéticos (PDM), con una bobina captadora en la superficie del material (Cullity B. D. y Graham C. D., 2009; Stefanita C. G., 2008; Neyra Astudillo M. R. et al., 2020; Campos, M. F. et al., 2011).

En este trabajo se estudia el comportamiento plástico del acero inoxidable AISI 439. El objetivo de este análisis es correlacionar la respuesta del RMB a diferentes porcentajes de deformación plástica final. Las muestras estandarizadas fueron construidas y ensayadas en una máquina de ensayo de tracción uniaxial. Después de cada deformación final, fuera de la máquina de tracción, se midió el RMB y se caracterizaron metalográficamente las microestructuras. Se realizó un análisis de las señales temporal y espectral. En el análisis temporal mediante el estudio de la envolvente y el valor RMS (Root Mean Square, en inglés), se observa un aumento en la amplitud del RMB al aumentar la deformación. En el análisis espectral mediante el estudio del espectrograma, se observa que a medida que la probeta comienza a deformarse más allá del 1 %, el efecto que se produce es que el RMB comienza a manifestarse en un intervalo de tiempo más acotado.

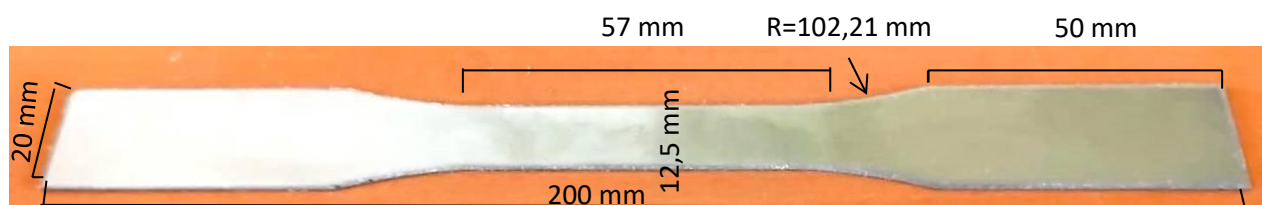
## Desarrollo

### Materiales

En este trabajo, se estudiaron placas de acero inoxidable AISI 439, proporcionadas por la empresa Arcelor Mittal S.A. Las dimensiones de las placas son: 300,0 mm x 210,4 mm x 0,5 mm. En la Figura 1, se muestra la fotografía de una de las probetas cortadas según la Norma ASTM E8/E8M (2004). En la Tabla 1 se muestra su composición química.

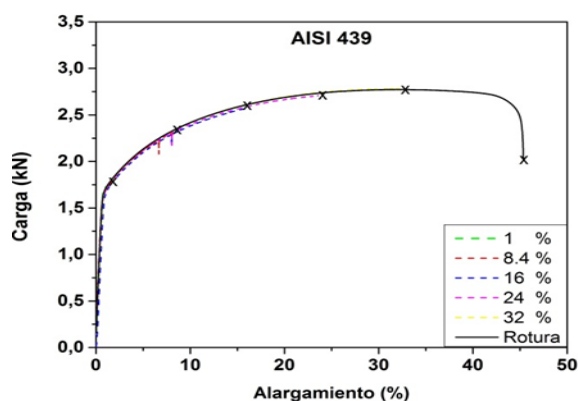
Tabla 1. Composición química, AISI 439

Elementos	C	Mn	Si	P	Cr	Ni	N <sub>2</sub>	Otros
Porcentaje en peso (%)	0.03	1.00	0.04	0.03	17.0-19.0	0.50	0.030	$0.20+4(C+N_2)\leq Ti+Nb\leq 0.75$



**Figura 1.** Fotografía de una de las probetas normalizadas AISI 439.

Para obtener las propiedades mecánicas, se ensayó una de las probetas hasta la rotura. Para medir la carga se utilizó una celda de carga de 100 kN. El ensayo se realizó a una velocidad constante de 1 mm/min, siguiendo la Norma de ensayo de tracción IRAM IAS U500-102 (1987). Después se deformaron 5 probetas con las siguientes deformaciones: a) 1 %; b) 8,4; c) 16 %; d) 24 % y e) 32 %. Estos ensayos se realizaron en la Gerencia de Materiales, División Materiales Avanzados de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). En la Figura 2 se muestra la curva Carga vs. Alargamiento porcentual (hasta rotura), superpuesta con las diferentes etapas de deformación final. Además, en la Tabla 2 se muestran las propiedades mecánicas.



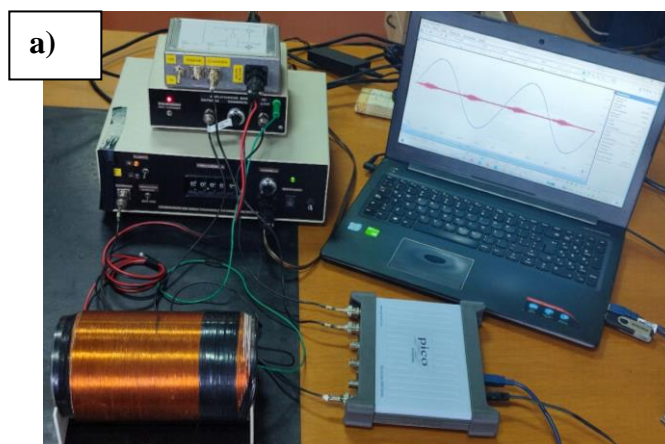
**Tabla 2.** Propiedades mecánicas, AISI 439.

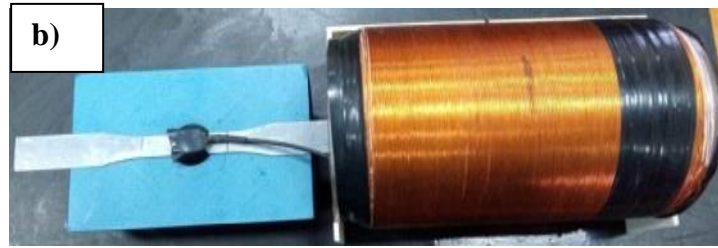
Limite elástico $\sigma_y$ (MPa)	149
Tensión de fluencia $\sigma_s$ (MPa)	172
Tensión de rotura $\sigma_f$ (MPa)	201

**Figura 2.** Curva Carga vs. Alargamiento (%).

### Medición del RMB

Para las mediciones de RMB, las muestras fueron excitadas con un campo magnético variable, generado dentro de una bobina con forma de solenoide, con una onda sinusoidal de 10 Hz y 2 V de amplitud. La bobina sensora de RMB se ubicó en la zona central de la probeta (mayor deformación) y se conectó a un amplificador con una banda de paso (1-500) kHz y bajo nivel de ruido. Después de cada deformación plástica se midió el RMB en cada una de las probetas. Todas las señales se registraron en un osciloscopio marca Pico Scope Serie 5000. En la Figura 3 se muestra: en la parte a) una Fotografía del sistema de medición experimental del RMB y en la parte b) el detalle de cómo se colocó el sensor de RMB sobre la probeta.

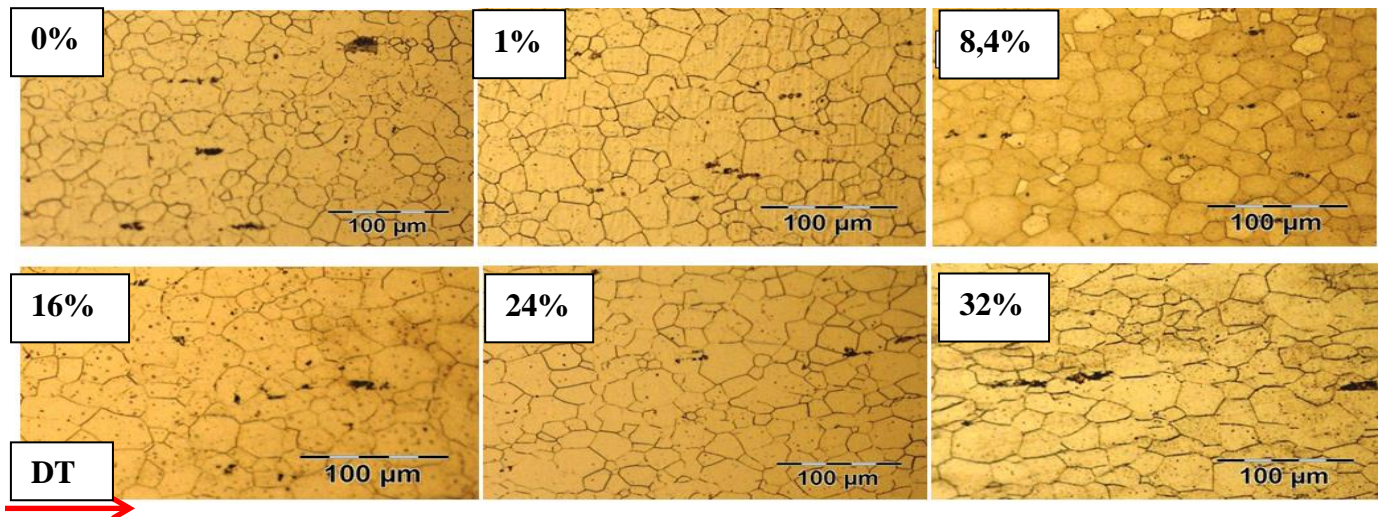




**Figura 3.** a) Fotografía del sistema de medición experimental del RMB; b) Detalle de la colocación del sensor de RMB sobre la probeta.

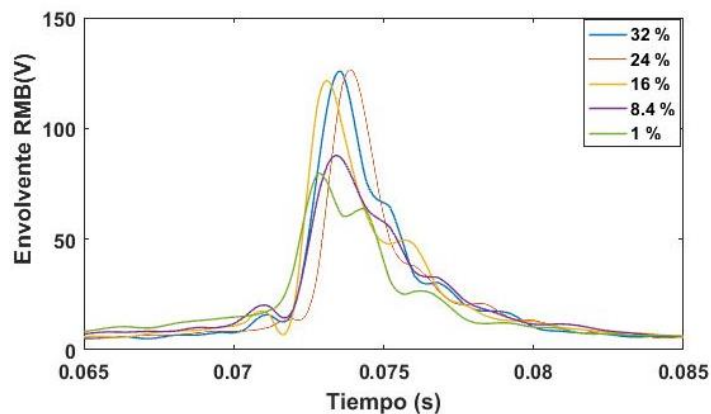
## Resultados y discusión

En la Figura 4, se muestran las micrográficas de las probetas del AISI 439, para el caso sin deformación y para las deformadas. En las probetas deformadas, se observa un nítido alargamiento de los granos en la dirección de tracción (DT) y en las mediciones de microdureza se comprobó que hay un aumento de la misma al crecer la deformación, esto es debido al endurecimiento del material (Ver Figura 6).



**Figura 4.** Fotografía de las microscopías ópticas de las probetas ensayadas. La flecha en "rojo" indica la Dirección de Tracción. (DT).

En el análisis temporal se mostró que, con el incremento de la deformación, aumenta la amplitud de las señales de las envolventes del RMB. También se ve una ligera asimetría en la respuesta magnética en el flanco de la excitación, apareciendo en tiempos mayores hacia la derecha, tal como se observa en la Figura 5.

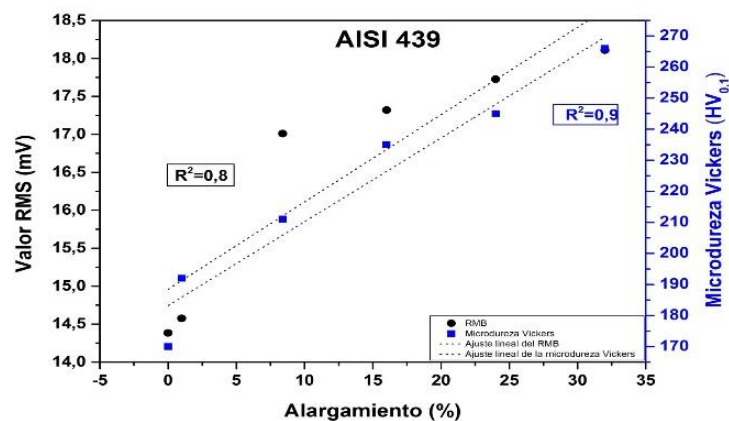


**Figura 5.** Función envolvente del RMB vs. Tiempo.



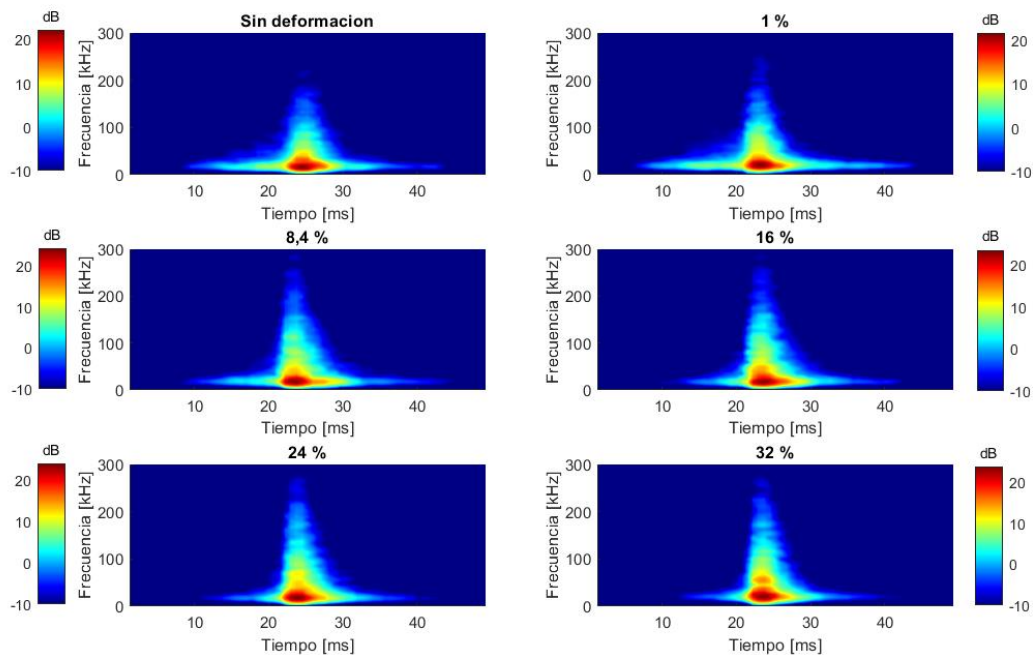
Esto implica que hace falta un mayor campo magnético para poder empezar a mover las PDM y una mayor energía para lograrlo, ya que a mayor deformación aumenta la cantidad de sitios de anclajes que se oponen al movimiento (Neyra Astudillo M. R. et al., 2020; Campos, M. F. et al., 2011). Además, se observó que aumenta la amplitud máxima de la función envolvente a medida que crece la deformación, hecho que refuerza la teoría de que, a estos niveles de deformación, la densidad de discordancias no alcanzó un valor crítico como para influenciar negativamente la generación de avalanchas de RMB por el movimiento de las PDM (Neyra Astudillo M. R. et al., 2020). También con el crecimiento de la deformación se verifica que crece el área bajo la envolvente del RMB.

En la Figura 6, se graficaron el Valor RMS y la microdureza Vickers, en función del alargamiento, se observa que el valor RMS y la microdureza Vickers aumentan a medida que crece la deformación. Los valores de  $R^2$  (grado de linealidad), para el valor RMS y alargamiento (%) es 0.8 y para la microdureza Vickers y el alargamiento (%) es 0.9. En los dos casos presentan una fuerte dependencia lineal.



**Figura 6.** Valor RMS y microdureza Vickers, en función del alargamiento.

En la Figura 7, se muestra el espectrograma (Frecuencia vs. Tiempo, y en colores la Intensidad en dB) de las señales las probetas sometidas a distintos grados de deformación. En la probeta no deformada, el mayor contenido energético (a partir de los 0 dB) en el dominio de la frecuencia del RMB, comienza a manifestarse aproximadamente a partir de los 10 ms hasta los 35 ms. El mayor nivel de energía se sitúa en el intervalo entre 22 ms y 25 ms y a una frecuencia de aproximadamente 20 kHz. También se observan niveles de menor valor de energía hasta los 250 kHz en el mismo intervalo de tiempo. Este comportamiento cambia con la primera deformación de la probeta. En el caso del 1 % de deformación el espectro es muy similar al anterior. Luego, conforme se incrementa la deformación, la energía y su distribución temporal cambian. El inicio de la señal del RMB comienza cada vez más tarde, a diferencia de lo que sucede entre la probeta no deformada y la deformada al 1 %. Para un 8,4 % de deformación, el contenido energético (color amarillo) comienza antes de los 15 ms; para el 16 % se inicia a partir de los 17 ms; a los 20 ms para una deformación del 24 % y un valor similar se observa para una deformación del 32 %. Esto provoca que la energía se concentre cada vez más en el intervalo de 20 ms a 30 ms. Se podría decir que, a medida que la deformación de la probeta supera el 1 %, el RMB comienza a manifestarse en un intervalo de tiempo más acotado. El contenido de mayor energía comienza más tarde y se extingue antes en el tiempo. Se puede ver que a medida que aumenta la deformación, comienzan a aparecer mayores niveles de energía en todo el rango de frecuencias en el intervalo de 20 ms a 30 ms.



**Figura 7.** Espectrograma de las probetas ensayadas.

## Conclusiones

Se realizaron ensayos de tracción uniaxial bajo norma, a diferentes porcentajes finales de deformación en probetas de acero AISI 439. Después de la deformación final, cada probeta fue evaluada con la técnica de RMB en la zona de mayor deformación (zona central).

En las micrografías de las probetas deformadas, se observó un alargamiento de los granos en la dirección de tracción y se comprobó que hubo un aumento de la microdureza al crecer la deformación.

Con respecto al RMB, al aumentar la deformación se incrementan las amplitudes máximas de las envolventes del RMB y el área bajo las mismas. Además, se observa un ligero corrimiento de estas hacia tiempos menores.

El Valor RMS del RMB y la microdureza Vickers, mostraron una fuerte dependencia lineal, aumentando a medida que crece la deformación.

El espectrograma muestra que la mayor parte de la energía se encuentra a bajas frecuencias, del orden de los 20 kHz. Se observa que a medida que la probeta comienza a deformarse más allá del 1 %, el efecto que se produce es que, el RMB comienza a manifestarse en un intervalo de tiempo más acotado y el contenido de mayor energía comienza más tarde y se extingue antes en el tiempo.

## Referencias

- ASTM E8/E8M-04 (2004), Standard test methods for tension testing of metallic materials. ASTM book of standards.
- Campos, M. F., Campos, M A., Landgraf, F. J. G. (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, New Jersey, United States, John Wiley & Sons, 164-165.
- IRAM IAS U500-102 (1987), Materiales metálicos - Ensayo de tracción. Método de ensayo a temperatura ambiente. <https://www.iram.org.ar/busqueda-avanzada-de-normas-iram/>.
- Navarro Cortés A. (2013), "Determinación de los parámetros característicos del comportamiento tenso-deformacional de aceros inoxidables ferríticos conformados en frío", Tesina (D'Especialitat, Escola de Camins), Escuela técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Barcelona, Francia.
- Neyra Astudillo M. R., Nuñez N., López Pumarega M. I., Gomez M., Ruzzante J. (2020), "Evaluation of Plastic Deformation in Steels with Magnetic and Acoustic Techniques", *International Journal of Magnetism and Electromagnetism*, 26, 1-13.
- Stefanita C. G. (2008), *From Bulk to Nano. The Many Sides of Magnetism*, Springer Series in Materials Science, 19-38.