

# EVALUACIÓN MICROMAGNÉTICA DEL NIVEL DE TENSIONES EN ALAMBRES DE TRACCIÓN DE RISERS FLEXIBLES

## EVALUATION OF MICROMAGNETIC LEVEL OF TENSILE STRESS IN WIRES OF FLEXIBLES RISERS

JOSÉ MATOS

*MSc. Escuela de Ingeniería, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. fidel.matos@ufrgs.br*

MARIANA DOS REIS

*MSc. Escuela de Ingeniería, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. mreis@demet.ufrgs.br*

ELISANGELA PELIZZARI

*Ing. Escuela de Ingeniería, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. epelizzari@demet.ufrgs.br*

THOMAS CLARKE

*PhD. Escuela de Ingeniería, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. tclarke@ufrgs.br*

IDUVIRGES MULLER

*PhD. Escuela de Ingeniería, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. ilmuller@ufrgs.br*

Recibido para revisar Diciembre 12 de 2011, aceptado Octubre 9 de 2012, versión final Octubre 19 de 2012

**RESUMEN:** En el presente trabajo se describe el uso de un método no destructivo que combina las medidas de los parámetros micromagnéticos para cuantificar las tensiones durante los ensayos de tracción en alambres que componen la armadura estructural de risers flexibles. Este método consideró las técnicas de análisis armónico del campo magnético tangencial, análisis de ruido Barkhausen y el análisis del incremento de la permeabilidad, mediante el ensayo de tracción con carga controlada. Se utiliza la regresión lineal de multiparámetros para analizar los datos de cada técnica en forma individual y en conjunto, con el objetivo de correlacionar los valores conocidos de las cargas con los valores medidos en los ensayos realizados. Los resultados muestran una buena relación de los valores obtenidos mediante el método micromagnético y las cargas aplicadas a los cuerpos de prueba, demostrando la eficacia de la técnica en estas aplicaciones.

**PALABRAS CLAVE:** caracterización de esfuerzos, métodos micromagnéticos, ferromagnetismo

**ABSTRACT:** This paper reports the use of a non-destructive method that uses micromagnetic parameters to measure the stress in a wire during a tensile test in different load levels. This wires forms the structural armature of flexible risers. In this work was considered the parameters of the hysteresis curve based on Harmonic Analysis of the Tangential Magnetic Field Strength, Analysis of Barkhausen Noise Signals and the Analysis of Incremental Permeability Signals during a tensile test with load controlling. A linear regression was used to analyze the data and to correlate with the know data of applied load of the test machine. The results showed an excellent relation between the obtained measures of the micromagnetic parameters and the load applied in the sample, demonstrating a potentiality of the technique in this kind of applications.

**KEYWORDS:** stress characterization, micromagnetic methods, ferromagnetism

### 1. INTRODUCCION

La caracterización de materiales en ingeniería, mediante la determinación de, propiedades mecánico-metalúrgicas, detección, localización y dimensionamiento de defectos por ensayos no destructivos (END), viene asumiendo un papel vital en la industria de componentes de alto valor agregado. De todos ellos, los métodos micromagnéticos son relevantes, cuando se trata de determinar el estado de tensiones y características microestructurales de materiales ferromagnéticos.

Las técnicas micromagnéticas, vienen siendo empleadas con bastante éxito en diversas aplicaciones, entre ellas, la evaluación de características microestructurales, tamaño de grano, nucleación, crecimiento de fases secundarias, textura y evaluación del estado de tensiones. El principio de las técnicas citadas es el uso de una corriente alterna que magnetiza el material a ser analizado, resultando en el movimiento de las paredes de dominio [1], estos son atribuidos al crecimiento de los dominios mayores en perjuicio de

los menores, debido a que los primeros están orientados favorablemente en la dirección del campo aplicado.

Los movimientos que ocurren, generan pulsos eléctricos que son captados por una bobina lectora, que va a medir la respuesta magnética del material por el campo aplicado. En el caso de las tensiones residuales, al fenómeno de magnetostricción influye dificultando o facilitando su movimiento [2]. Estas señales micromagnéticas pueden ser interpretadas mediante diferentes parámetros, como la curva de histéresis característica de las condiciones que se encuentra el material.

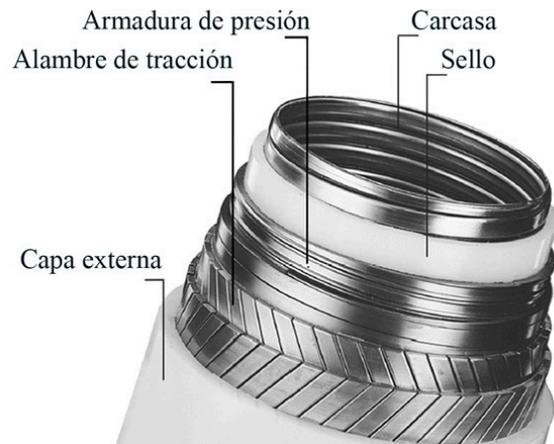
Existen investigaciones realizadas que describen, la caracterización de materiales a través de la combinación de las técnicas micromagnéticas, en la que se destaca el análisis de Ruido de Barkhausen [3,4].

Domann et. al, realizaron una serie de estudios y desarrollaron una metodología micromagnética y multiparamétrica, para el análisis microestructural y estado de tensiones del material [5,6,7]. Este análisis combina cuatro técnicas en un equipo portátil 3MA-II, desarrollado por el Instituto Fraunhofer (Alemania), estas técnicas son: Análisis armónico del campo magnético tangencial (AACMT), Análisis de ruido Barkhausen (ARB), Análisis de Incremento de permeabilidad (AIP) y Análisis multifrecuencia de la corrientes parásitas (ACP), la última técnica no se tocará en este trabajo. Este equipo permite analizar hasta 41 parámetros micromagnéticos originados por las técnicas mencionadas (tabla 1).

Se realiza un análisis estadístico con estos parámetros, para obtener una aproximación con los valores

ya conocidos, tomando en consideración a las variables que presentan una mayor dependencia con la característica que se está evaluando.

Los *risers* flexibles son estructuras de multicapas (Figura 1) que son usadas en la industria petrolífera para el transporte de fluidos, generalmente para aplicaciones en aguas profundas de exploraciones offshore. Las armaduras de tracción (Figura 1) formadas por los alambres helicoidales, son los responsables del soporte mecánico de la estructura y la ruptura de estos, es una de las fallas más frecuentes [8].



**Figura 1.** Configuración típica de un riser flexible

En este trabajo, se pretende evaluar la relación de los parámetros micromagnéticos con las tensiones aplicadas de forma controlada a alambres, similares a los utilizados en la fabricación de armaduras de tracción de *risers*. Se utiliza el equipo 3MA-II y las técnicas empleadas son: análisis armónico del campo magnético tangencial, análisis de ruido de Barkhausen y análisis de permeabilidad incremental.

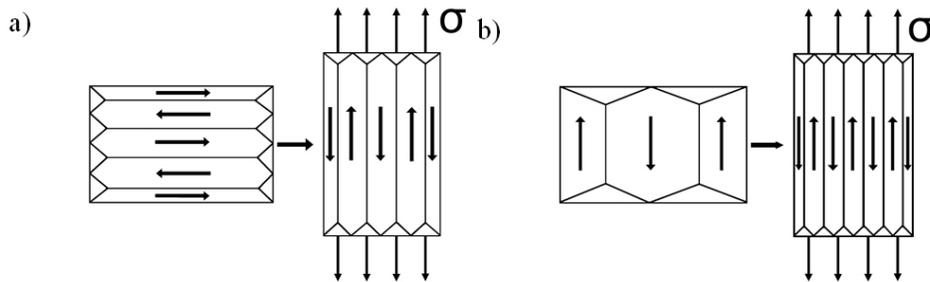
**Tabla 1.** Parámetros micromagnéticos analizados por el 3MA-II [7]

Técnica	Símbolo	Unidad	Descripción
AACMT	$A_x$	[A/cm]	Amplitud de los armónicos de orden x
	$P_x$	[rad]	Angulo de fase armónica de orden x
	$H_{CO}$	[A/cm]	Campo coercivo, derivado de la técnica AACMT
	$H_{RO}$	[A/cm]	Mayor armónico de $H_t(0)$
	K	[%]	Desviación armónica, $K=100\%*(\sum A_x^2)^{1/2}$
	$\sum AH$	[A/cm]	Sumatoria de amplitudes de las armónicas $\sum AH = \sum A_x$
	$V_{Mag}$	[V]	Amplitud de voltaje de salida (análisis micromagnético)
AACMT			Análisis armónico Del campo magnético tangencial

Técnica	Símbolo	Unidad	Descripción
ARB	$M_{Max}$	[V]	Amplitud máxima de la curva $M(H)$ , para un ciclo de magnetización
	$M_{Medio}$	[V]	Señal medio de la curva $M(H)$ , para un ciclo de magnetización
	$M_r$	[V]	Señal medio de la curva $M(H)$ , para $H=0$ A/cm
	$H_{CM}$	[A/cm]	Campo coercivo derivado de ARB
	$\Delta H_{yz_m}$	[A/cm]	Expansión de la curva $M(H)$ , para $M=0$ , $yz\%$ del Máximo valor.
	ARB		Análisis de ruido Magnético Barkhausen
AIP	$\mu_{Max}$	[V]	Amplitud máxima de la curva $\mu(H)$ , para un ciclo de magnetización
	$\mu_{Medio}$	[V]	Señal media de la curva $\mu(H)$ , para un ciclo de magnetización
	$\mu_r$	[V]	Señal media de la curva $\mu(H)$ , para $H=0$ A/cm
	$H_{C\mu}$	[A/cm]	Campo coercivo, derivado de la PI
	$\Delta H_{yz\mu}$	[A/cm]	Expansión de la curva $\mu(H)$ , para $\mu=0$ , $yz_{Max}$
	AIP		Análisis incremental de la permeabilidad magnética

El estado de tensiones del material influye en la magnetización por el efecto magnetoelástico. Los materiales con coeficiente de magnetostricción

positivo se alargan y los que poseen coeficiente de magnetostricción negativo se contraen cuando son expuestos a un campo magnético en la dirección del campo aplicado (figura 2) [9].



**Figura 2.** Ilustración del fenómeno de magnetostricción (a) positivo, (b) negativo

En el caso de materiales con magnetostricción positiva, al estar sometido a tensiones aplicadas o por el efecto de las tensiones residuales de tracción, en sentido paralelo al campo, el número de emisiones Barkhausen aumenta, debido a la facilidad de movimiento de las paredes de dominio en estas direcciones. En este trabajo, se observa un aumento del ruido magnético Barkhausen (RMB) con el aumento de las cargas de tracción aplicadas en aceros eléctricos. Las tensiones de compresión y tracción producidos por flexión influyen de forma similar en el comportamiento de los dominios

magnéticos, que se refleja en el aumento o disminución del RMB [10].

## 2. MATERIALES Y METODOS

Las dimensiones de la muestra (AISI 1060) de armadura de tracción son 4x9x300 mm, que por efecto del proceso de fabricación (trellado) presenta una elevada dureza (44 HRC) en estado deformado. La composición química fue obtenida por espectrometría de emisión óptica, los resultados se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Composición química de la muestra

Composición química (% masa)		
	AISI 1060	Muestra
C	0,55-0,65	0,610
Si	-	0,240
Mn	0,60-0,90	0,840
P	<0,03	0,018
Si	<0,05	0,011
Cr	-	0,040
Mo	-	0,050

Las principales características de este material son: microestructura perlítica y ferrítica, con granos alargados, dureza de 47 HRC y tensión de fluencia de 892,4 MPa.

Para evaluar el efecto de las tensiones en las propiedades micromagnéticas, la muestra fue traccionada en una máquina INSTRON 5585H con carga controlada. El ensayo fue conducido a diferentes niveles de carga, definidos en incrementos de 10% de la tensión de fluencia del material (982 MPa), variando de 0 a 90%. Estos valores fueron convertidos en cargas (kN) se muestran en la Tabla 3.

Para cada determinada carga, se obtuvo la medida micromagnética correspondiente. A través de estas medidas, se verificó la dependencia de cada parámetro con la tensión. Para el análisis multiparamétrico solo se detallará las variables correspondientes a las técnicas usadas, por no ser objetivo del presente trabajo.

**Tabla 3.** Tensiones aplicadas ( $\Delta\sigma$  hasta 90%) y carga para la muestra traccionada

$\sigma$ (MPa)	F(kN)
0,0	0,0
89,2	3,2
178,4	6,5
267,6	9,7
356,8	12,9
446	16,2
535,2	19,4
624,4	22,6
713,6	29,1
802,8	32,3

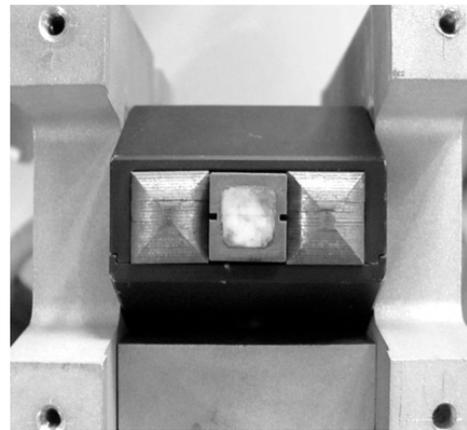
Frecuencia de excitación (global) = 100 Hz

Análisis armónico: Amplitud de campo magnético aplicado ( $H_{AACMT} = 45 \text{ A/cm} \pm 0,5$ )

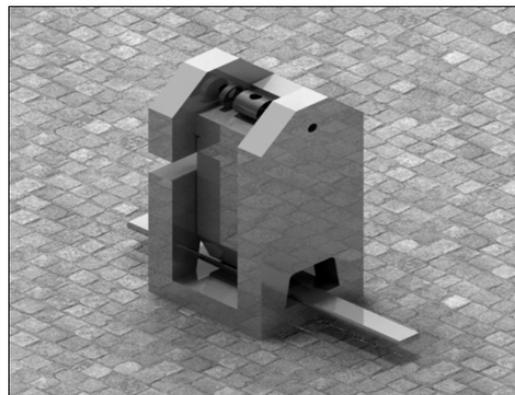
Ruido Barkhausen: Amplitud de campo magnético aplicado ( $HRB = 50 \text{ A/cm} \pm 0,3$ )

Filtro (Superior a 100 kHz, Inferior a 5000 kHz) y Aumento = 6 dB. Permeabilidad Incremental: Amplitud del campo magnético aplicado ( $HAPI = 35 \text{ A/cm} \pm 0,5$ )

El sensor utilizado consiste de una unidad magnetizadora (Yoke) y un sensor Hall (unidad lectora) entre sus polos, que mide la magnetización de la muestra (Figura 3).

**Figura 3.** Imagen del sensor

El acoplamiento entre la muestra y el sensor fue realizado con un dispositivo diseñado con el objetivo de asegurar la repetitividad de las mediciones (Figura 4).

**Figura 4.** Dispositivo para acoplar el sensor a la muestra

La figura 5, muestra el equipo utilizado y la condición de acoplamiento entre el sensor y la muestra.

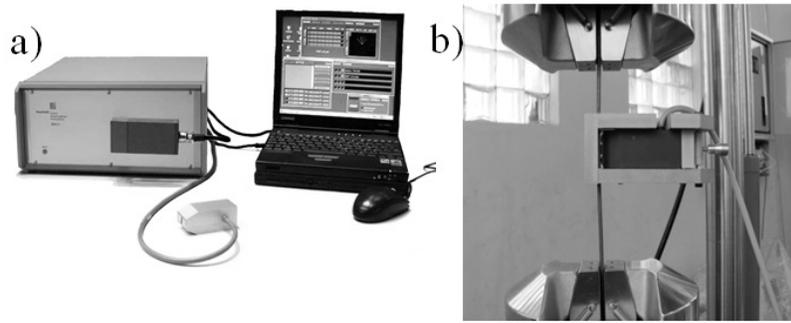


Figura 5. (a) Equipo 3MA-II, (b) detalle de la posición del sensor durante el ensayo de tracción

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Fue posible observar que no todos los parámetros micromagnéticos mostrados en la Tabla 1 se consideraron en el cálculo de la correlación (ecuaciones 1, 2, 3 y 4). Esto es debido al hecho que algunos de estos parámetros no presentan dependencia significativa con la carga, debido a eso no se presentarán los resultados individualmente, pero si, la correlación de los parámetros utilizados en el análisis multilíneal con los valores de referencia, utilizando los parámetros de las técnicas consideradas.

Para cada técnica fue elaborado un diagrama de dispersión, siendo necesario establecer en todos los casos una relación lineal entre las variables electromagnéticas y la carga de tracción que fue sometida la muestra, para la regresión lineal y análisis individual de cada técnica y en conjunto (las tres

técnicas) el software 3MA, no considera los parámetros que presentan una dependencia con la tensión.

Las ecuaciones obtenidas relacionan los valores de carga (kN) con los parámetros utilizados. Para todas las figuras, el eje de las ordenadas representa los valores de la carga obtenidos mediante la correlación de los parámetros micromagnéticos versus la aplicación de cargas y las abscisas representa, los valores de las cargas ya conocidas.

La Ecuación lineal (1) fue obtenida por regresión lineal. El resultado obtenido por la técnica de análisis armónico (Figura 6), representó un valor de  $r^2=99,63\%$ , en el ajuste y consideró 4 variables de AACMT.

$$F(\text{kN})_{\text{AACMT}} = 717,8 - 429,7 V_{\text{Mag}} + 407,3 A_3 + 66,7 A_7 - 207,6 K - 0,74 H_{\text{CO}} \quad (1)$$

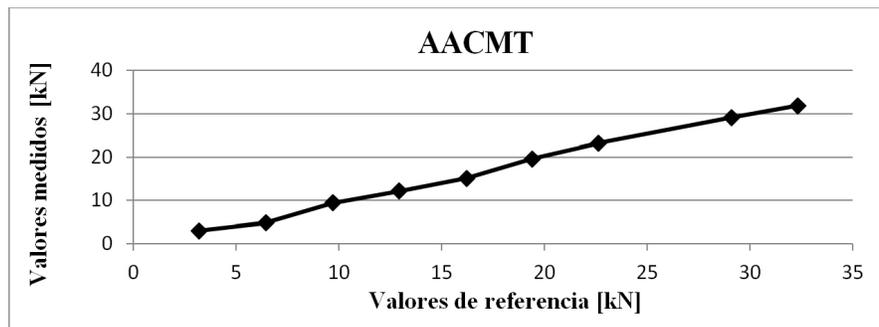
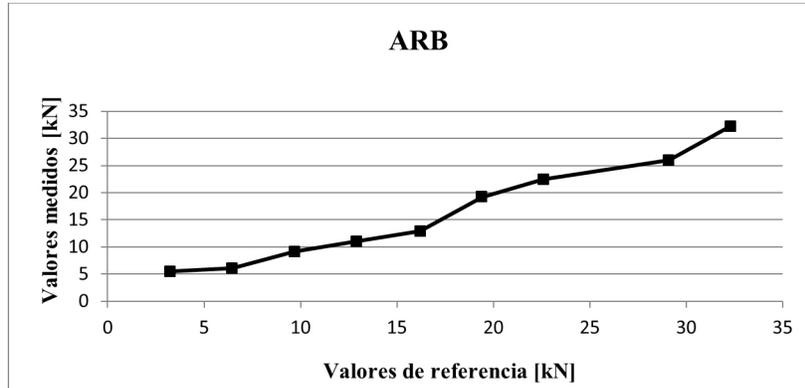


Figura 6. Correlación de las variables obtenidas por análisis armónico, con los valores de carga aplicados a la muestra

El resultado considerando la técnica de análisis de ruido Barkhausen, se presenta en la Figura 7.

Que representó un valor de  $r^2=98,70\%$  y utilizó las 7 variables de ARB

$$F(\text{kN})_{\text{ARB}} = 605 - 481,3 V_{\text{Mag}} + 1403,3 M_{\text{Medio}} + 158,6 M_{\text{r}} + 2,4 H_{\text{CM}} + 3,2 \Delta H_{25\text{m}} - 4,5 \Delta H_{50\text{m}} - 205,2 M_{\text{Max}} - 3,27 \Delta H_{75\text{m}} \quad (2)$$

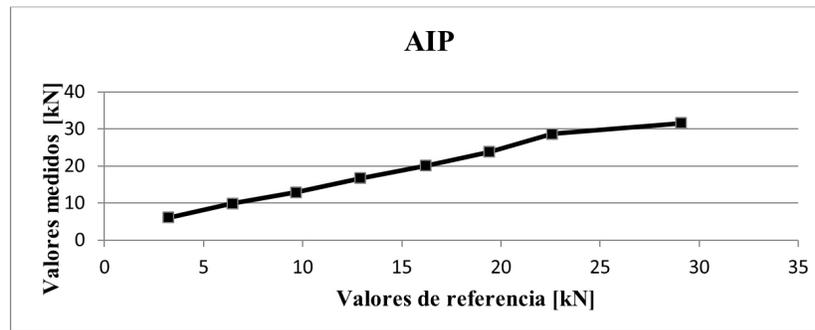


**Figura 7.** Correlación de las variables procedente del análisis de ruido Barkhausen, con los valores aplicados a la muestra. La figura 8, muestra la correlación obtenida, a través del análisis de la permeabilidad incremental.

valor de  $r^2=98,78 \%$ .

Esta consideró 5 parámetros de API y se obtuvo un

$$F(kN)_{API} = 259 + 3118,6\mu_{Max} - 8627\mu_{Medio} + 2,2H_{C\mu} + 1,3 \Delta H25_{\mu} + 7,2 \Delta H50_{\mu} \quad (3)$$



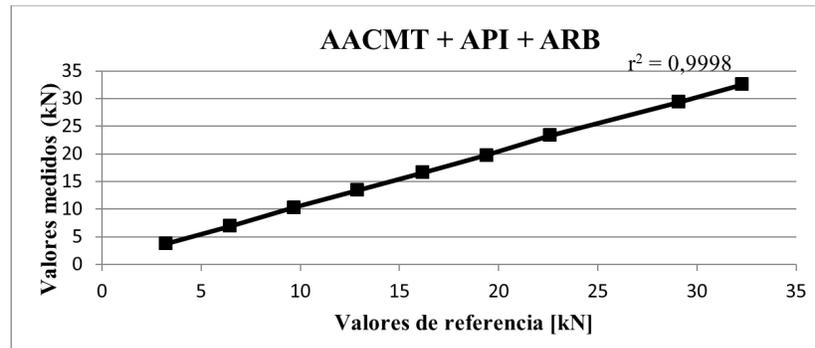
**Figura 8.** Correlación de las variables obtenidas por el análisis de parámetros incremental, con los valores de carga aplicados a la muestra

Considerando las tres técnicas simultáneamente (AACMT+ARB+API), el resultado se muestra en la figura 9. Con una correlación de  $r^2=99,98\%$ .

armónico, los que estuvieron en mayor cantidad (cinco).

La ecuación 4, obtenida consideró nueve variables micromagnéticas, siendo las variables del análisis

$$F(kN)_{AACMT + ARB + API} = 225,1 + 26,7 \Sigma HA - 52 K - 1733,1 \mu_{Medio} + 181,7 m_r - 0,4\Delta H25_{\mu} + 24,4 P_3 - 7,4 P_7 + 14 H_{RO} + 0,05 \Delta H25_m \quad (4)$$



**Figura 9.** Correlación de las variables obtenidas por las tres técnicas, con los valores de la carga aplicados a la muestra

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para el análisis cuantitativo de las tensiones del alambre durante el ensayo de tracción fueron satisfactorios para todas las técnicas micromagnéticas consideradas, indicando buenos valores de correlación entre los parámetros analizados y los valores de carga de tracción.

Considerando cada técnica individualmente, el análisis armónico fue el que tuvo un resultado mayor de correlación, entre las variables consideradas, que fue de 99,63% en comparación a 98,70% para el análisis de ruido de Barkhausen y 98,78% para la permeabilidad incremental.

Al unir las tres técnicas AACMT, ARB y API, se obtuvo un resultado mucho más satisfactorio, obtiene un resultado más satisfactorio, alcanzando valores de correlación entre variables de 99,98 %, que puede considerarse un resultado muy promisorio.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado con el apoyo de la CAPES, que es la entidad del gobierno Brasileiro orientado a la formación de recursos humanos, CNPq, Laboratorio de Metalurgia Física (LAMEF) de la UFRGS.

#### REFERENCIAS

- [1] Cullity, B. D., Introduction to Magnetic Materials, John Wiley & Sonc, Inc. Hoboken, New Jersey, USA, 2009.
- [2] Bozorth, R. M., Ferromagnetism. New York, USA, Van Nostrand, 1951.
- [3] Ilker, H., Cam, I. and Gür, H., Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique, NDT and E International., 43, pp. 29-33, 2010.
- [4] Chen, B. J., Zhang, D., Shu, X., Zhou, W. and Wang, W., Improvement of stress testing performance using Barkhausen noise sensor, Sensors and Actuators A: Physical., I, pp. 51-57, 2011
- [5] Dobmann, G., Meyendorf, N. and Schneider, E., Nondestructive characterization of materials. A growing demand for describing damage and service-life-relevant aging processes in plant components, Nuclear Engineering and Design., 171, 95-112, 1997.
- [6] Altpeter, I., Dobmann, G., Kröning, M., Rabung, M. and Szielasko, S., Micromagnetic evaluation of micro residual stresses of the IInd and IIIrd order, NDT and E International., 42, pp. 283-290, 2009.
- [7] Dobmann, G., 3MA-II System – User Manual., Fraunhofer, Germany, 2007.
- [8] Martins, C. O. D. and Reguly, A., Micromagnetic stress evaluation of flexible riser tensile armours, Insight., 51, pp. 8-20, 2009.
- [9] Barba Ortega, J. J., Efectos de confinamiento sobre el estado mixto en prismas superconductores, DYNA, año 78, 168, pp. 158-163, 2011.
- [10] Mitra, A. and Jiles, D.C., Magnetic Barkhausen emissions in as-quenched Fe-Si-B amorphous alloy. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. V168, pp. 169-176. 1997.