



CARACTERIZACION NO DESTRUCTIVA DE PROBETAS DE ACERO INOXIDABLE AISI 316

Alejandro E. Lois

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Gral. Pacheco
Gral. Pacheco, Buenos Aires, 1617, Argentina,
alois@frgp.utn.edu.ar

Marta C. Ruch

Dpto. Ensayos No Destructivos y Estructurales, Comisión Nacional de Energía Atómica
Buenos Aires, Argentina,
Tel./Fax (54)11 6772 7355
ruch@cnea.gov.ar

Resumen

Frecuentemente se observa, a causa de los procesos de fabricación de componentes de acero inoxidable austenítico, tales como embutido, trefilado, rectificado o bruñido, la transformación martensítica (transformación de fase $\gamma \rightarrow \alpha'$). La aparición de martensita en un acero inoxidable austenítico trae aparejada una disminución de la velocidad de deformación en tracción, lo cual afecta su facilidad de fabricación, pero, más importante aún, resulta perjudicial a sus propiedades de resistencia a la corrosión bajo tensión y a la resistencia a la fragilización por hidrógeno. Por otra parte, en ciertas aplicaciones, el aumento de las características mecánicas, debido a la aparición de martensita, es aprovechado, por ejemplo, para la fabricación de resortes.

Por esto, el conocimiento de la proporción de martensita presente en un acero inoxidable austenítico es muy importante, más aun si se obtiene en forma no destructiva. Un método aplicable a esto es el de corrientes inducidas (CI), cuyas señales contienen información sobre las propiedades del material. En este trabajo se desarrolla una técnica para extraer esta información - proporción de martensita, conductividad eléctrica y permeabilidad magnética - de las señales de CI obtenidas con un equipo convencional. A partir del modelado de la impedancia (Z) de sondas acopladas a materiales levemente magnéticos, y mediante una calibración adecuada, pueden estimarse esas cantidades. Se muestra la aplicación de este método en probetas de acero inoxidable austenítico tipo AISI 316, con diferentes contenidos de martensita α' , a las que se ensayó con un equipo de corrientes inducidas MAD8D™. Las tensiones medidas en los ensayos fueron transformadas numéricamente al plano de impedancia y se las comparó con las curvas de Z teóricas, observándose una buena correspondencia. Se verificó una relación lineal entre las componentes de Z experimental y el contenido de α' de las probetas, a partir de la cual, y con la calibración adecuada, se puede estimar dicho contenido.

Las probetas fueron también ensayadas en un difractor de rayos X Philips X'Pert PW3710 con radiación Cu K α . Se procesaron todos los datos obtenidos a partir de estos ensayos, realizándose el ajuste del diagrama experimental mediante diagramas simulados por un software específico, obteniéndose las proporciones de martensita y austenita presentes en cada muestra. Estos resultados se compararon con los obtenidos en ensayos no destructivos por corrientes inducidas (CI) obteniéndose una buena correspondencia entre ellos.

1. Introducción

Bajo el efecto de la deformación en frío, la transformación de la austenita en martensita α' puede ocurrir a temperaturas mayores que la M_s , temperatura que corresponde a la aparición de martensita de origen térmico ⁽¹⁾. La transformación martensítica por deformación en frío en aceros inoxidable austeníticos de la serie 300 se observa frecuentemente en el transcurso de los procesos de fabricación de componentes, tales como embutido, trefilado, rectificado o bruñido ⁽²⁾. La cantidad de martensita formada es función a la vez de la composición química del acero y del modo, la tasa y la velocidad de deformación y, naturalmente, de la temperatura del proceso ⁽¹⁾. El comportamiento del acero AISI 316 frente a la transformación martensítica es diferente del de otros aceros de la misma serie, como los AISI 304 y 347, ya que los porcentajes de fase transformada α' son menores en el 316 para deformaciones iguales. Esta diferencia de comportamiento del SS 316 puede explicarse a partir de su composición, la cual le da mayor estabilidad a la fase austenita y lo hace menos sensible a la transformación martensítica ⁽³⁻⁵⁾.

La aparición de martensita en un acero inoxidable austenítico conlleva una disminución de la velocidad de deformación en tracción, afectando su facilidad de fabricación ⁽⁶⁾, resulta perjudicial a sus propiedades de resistencia a la corrosión bajo tensión y a la resistencia a la fragilización por hidrógeno ⁽²⁾, y, en ciertos casos, empeora el problema de la sensibilización (corrosión debida a la precipitación de carburos de cromo) ^(3, 7). Se justifica por tanto la búsqueda de un método que permita caracterizar un acero inoxidable austenítico en forma no destructiva.

El modelo matemático desarrollado por los autores permite transformar las lecturas obtenidas con un equipo convencional de ensayos por corrientes inducidas, expresadas en valores de tensiones horizontal y vertical, en valores de impedancia compleja ⁽⁸⁾. En el presente trabajo se utiliza el modelo para hallar -a partir de resultados experimentales- los valores de las propiedades electromagnéticas, conductividad eléctrica y permeabilidad magnética relativa, de una serie de probetas bifásicas, de acero austenítico AISI 316 con contenidos crecientes de martensita, con la suposición de que el mismo es un material metálico levemente magnético.

Se correlacionaron los valores de impedancia calculados a partir del ensayo por corrientes inducidas, con los valores de permeabilidad magnética medidos magnéticamente ⁽⁹⁾ y por difracción por rayos X, estableciéndose, para las cuatro frecuencias utilizadas en el ensayo por corrientes inducidas, una muy buena correlación lineal, con coeficientes de determinación muy altos, entre la reactancia calculada y la proporción de martensita medida magnéticamente ⁽⁹⁾, no así entre ésta y la resistencia

eléctrica calculada, sugiriendo el análisis que la resistencia no es afectada por el contenido de martensita.

A partir la correlación lineal entre la reactancia obtenida con un ensayo por corrientes inducidas y la proporción de martensita contenida en muestras de acero inoxidable, se elaboró un método para la estimación de dicha proporción. Para la correcta implementación de este método son necesarias dos muestras del material a ensayar, una totalmente austenítica y otra con una cantidad de martensita conocida. Con estas dos muestras se determina la recta de calibración, y a partir de ésta puede evaluarse el contenido de martensita incógnita en el material a ensayar.

2. Materiales y Equipos

Se utilizó una serie de once probetas elaboradas con un acero inoxidable austenítico AISI 316 comercial. Las probetas fueron preparadas por J. Marengo y P. Álvarez ⁽⁹⁾. Estas probetas se obtuvieron a partir de chapa y fueron sometidas a un recocido inicial de austenización a 1050 °C durante una hora en vacío y enfriadas en aire, a fin de unificar las estructuras iniciales. Luego, todas las probetas fueron deformadas un 63% a -70 °C por laminación a fin de inducir la transformación de fase $\gamma \rightarrow \alpha'$, con lo que se produjo una proporción máxima de martensita. Con un tratamiento térmico posterior a tiempo constante y distintas temperaturas se recuperaba la fase γ en distintas proporciones en cada muestra, obteniéndose de esta manera probetas con diferentes contenidos de martensita. (Mayor el número de probeta, mayor la temperatura del recocido y menor el contenido de α'). Todas las probetas miden 65 x 30 x 2,3 mm.

Como patrones de calibración de conductividad, se utilizó la caja serie 520 de Zetec, Inc., en particular las dos muestras de menor conductividad eléctrica, que identificamos como patrones 4 y 5, y una muestra de acero ASTM 508 clase 2 utilizado como patrón de permeabilidad magnética certificado ⁽¹⁰⁾, cuyas propiedades electromagnéticas se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Conductividad y permeabilidad de patrones certificados

Material	Conductividad S/m	Permeabilidad Magnética Relativa
Estándar 4 Zetec	$2.036 \cdot 10^6$	1
Estándar 5 Zetec	$0.554 \cdot 10^6$	1
ASTM 508 clase 2	$1.388 \cdot 10^6$	206

Para hacer los ensayos por corrientes inducidas se utilizó un equipo basado en PC MAD8D™ de Eddy Current Technology, Inc., en modo multifrecuencia (60, 90, 120 y 240 kHz).

Para realizar los ensayos de difracción por rayos X, se empleó un difractómetro Philips X'Pert PW3710 con radiación Cu K α .

3. Ensayos por corrientes inducidas

El modelo matemático utilizado, se desarrolló a partir de la solución de David H. S. Cheng ^(11, 12) al problema de las corrientes inducidas en un medio levemente magnético para el caso de una espira ideal, ampliándolo al caso de una bobina circular de sección finita (geometría representada en la Figura 1), obteniéndose soluciones analíticas para problemas del cálculo de impedancias de la sonda.

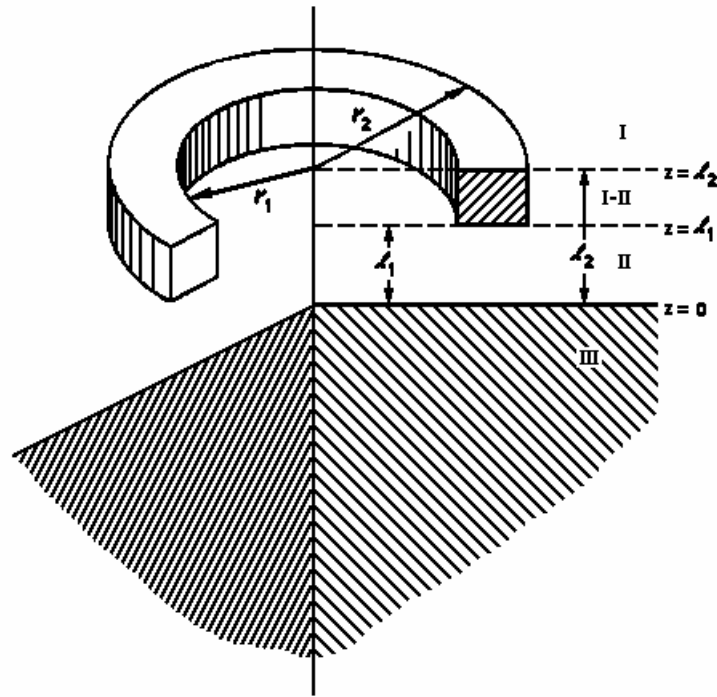


Figura 1. Esquema de la disposición experimental ilustrando los parámetros usados en los cálculos.

A partir de estas soluciones, se dedujo la siguiente ecuación, la cual fue utilizada para calcular la impedancia normalizada de una bobina circular real de sección finita:

$$Z_{\text{nor}} = 1 + j \frac{\int_0^{\infty} \frac{1}{\alpha^3} I^2(r_2, r_1) \left[-2e^{-\alpha_0(l_2+l_1)} + e^{-2\alpha_0 l_2} + e^{-2\alpha_0 l_1} \right] \left(\frac{\mu_1 \alpha_0 - \mu_0 \alpha_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{1}{\alpha_0^3} d\alpha}{\int_0^{\infty} \frac{1}{\alpha^3} I^2(r_2, r_1) \left\{ 2(l_2 - l_1) + \frac{2}{\alpha_0} \left[e^{-\alpha_0(l_2-l_1)} - 1 \right] \right\} \frac{1}{\alpha_0^2} d\alpha}, \quad (1)$$

donde:

$$\alpha_0 = \sqrt{\alpha^2 - k_0^2}, \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha^2 - k_1^2}, \quad (3)$$

$$k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0, \quad (4)$$

$$k_1^2 = \omega^2 \mu_1 \epsilon_1 - j\omega \mu_1 \sigma , \quad (5)$$

$$I(r_2, r_1) = \alpha^2 \int_{r_1}^{r_2} r_0 J_1(\alpha r_0) dr_0 . \quad (6)$$

donde σ es la conductividad eléctrica, $\mu = \mu_0 \mu_r$ es la permeabilidad magnética, $\omega = 2 \pi f$ (la frecuencia de ensayo) y la variable α surge de la separación de variables. Las constantes l_1, l_2, r_1, r_2 , corresponden a las dimensiones de la sonda, la cual se representa en la Figura 1.

Estas ecuaciones fueron programadas utilizando el software MATHEMATICA[®] 2.2.3, permitiendo calcular la impedancia de la bobina conociendo las propiedades electromagnéticas del medio y las dimensiones de la bobina. La figura 2, tomada de ⁽¹³⁾, muestra curvas calculadas con el modelo, para 90 kHz, haciendo variar solamente σ (curvas roja y lila) o la permeabilidad magnética relativa μ_r (curvas azul y verde). La curva azul corresponde a materiales hipotéticos con $\sigma = 10^6$ S/m y μ_r en el rango 1 a 512. Estas simulaciones ayudan a entender los resultados experimentales que presentamos aquí.

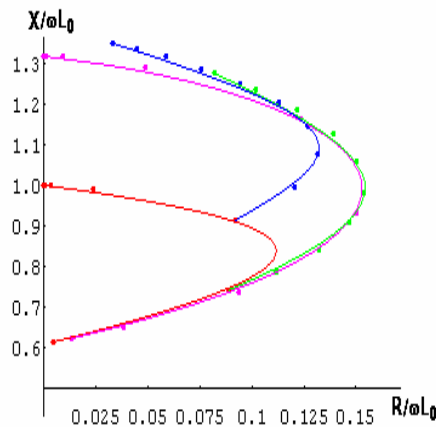


Figura 2. Curvas de impedancia normalizada (plano-Z) calculadas para 90 kHz

La información de las curvas de lift-off correspondientes a cuatro frecuencias diferentes fue obtenida con MAD8D[™], y almacenada en archivos grabados en medio magnético. Con el objeto de analizar los resultados experimentales con las herramientas teóricas diseñadas, se escribió un programa para leer los datos correspondientes a las tensiones medidas, almacenados en los archivos generados por MAD8D[™], y convertirlos a otro formato, compatible con MATHEMATICA[®]. Los datos adquiridos con el MAD8D[™] son los correspondientes a tensiones sobre la bobina, representadas en cuadraturas en la pantalla del monitor, y no necesariamente coinciden con las componentes real e imaginaria de la impedancia. Para representar los datos medidos sobre el plano de impedancia en el cual se basan los cálculos matemáticos, se empleó una transformación lineal, cuyos parámetros se determinan con un software escrito al efecto, a partir de 3 pares de puntos dato. Para mayor información, referirse a ⁽¹³⁾. Se usa luego una rutina también escrita en MATHEMATICA[®] para transformar los valores de tensión que

entrega el equipo correspondientes a la sonda acoplada con las probetas en la impedancia de la misma en cada caso.

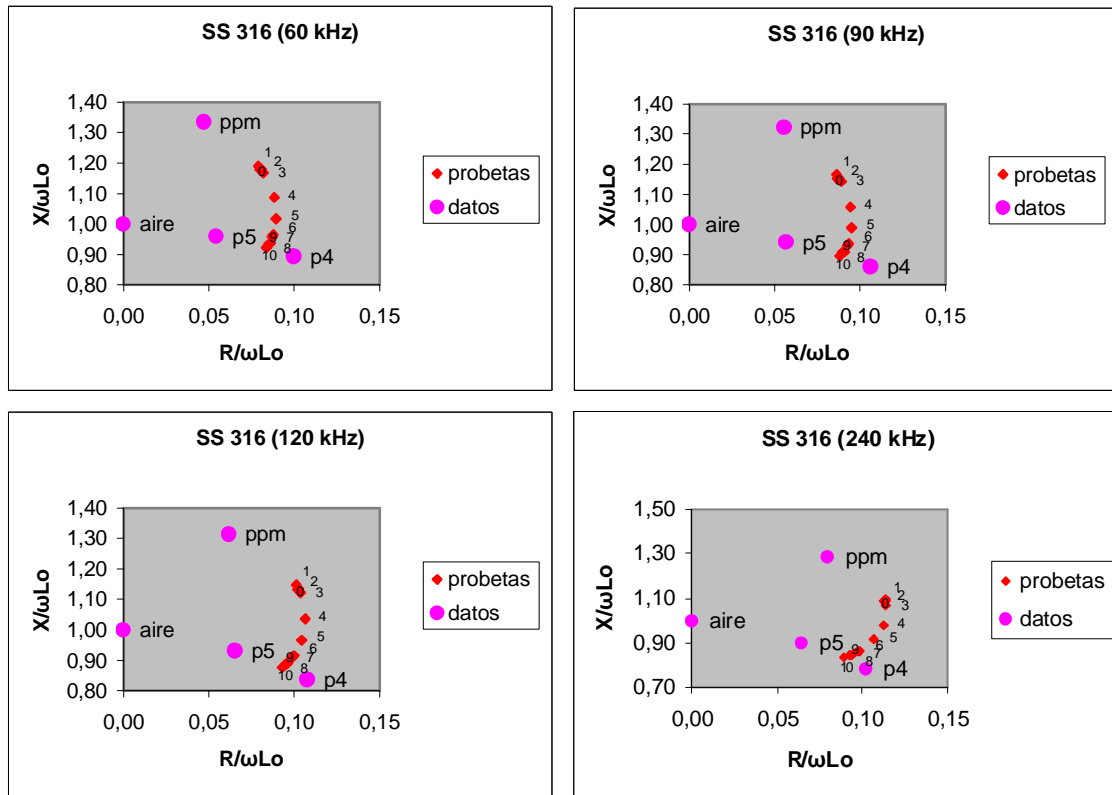


Figura 3
Representación en plano de impedancia: Serie AISI 316.

Se realizaron 3 ensayos sobre cada muestra a fin de estudiar la repetibilidad de los mismos ⁽¹⁴⁾. Las frecuencias utilizadas en cada ensayo fueron: 60, 90, 120 y 240 kHz. La Figura 3 representa el plano complejo normalizado para la serie AISI 316. Se aprecia que los valores de la reactancia normalizada no superaron el nivel de 1,2. En estos gráficos se puede observar que todas las muestras de esta serie presentan una permeabilidad magnética menor que la del patrón (PPM). El rango de variación de la resistencia normalizada es de 0,02, quince veces menor que el correspondiente a la reactancia normalizada que es de 0,3. Se observa una buena concordancia entre las curvas experimentales transformadas y la curva teórica azul de la Figura 2, por lo que se puede suponer que todas las probetas usadas en este experimento presentan igual σ y diferente μ .

4. Cálculo de las propiedades electromagnéticas

A partir de los resultados de los ensayos de CI, transformados al plano de impedancia compleja normalizada, se puede calcular σ de la muestra 10, puramente austenítica, invirtiendo el modelo, para lo cual se usa el método numérico de bisección. Los valores de impedancia compleja dependen funcionalmente del producto de f , μ_r y σ . ecuaciones (1-6). Como se ve en la curva azul de la figura 2, todas las probetas de la serie 316 se

comportan como si tuvieran la misma σ . Por otro lado, se menciona en la literatura ⁽¹⁵⁾ que μ_r es la variable principal que afecta a un ensayo de CI, en el caso de un material conductor compuesto por dos fases, una magnética ($\mu_r > 1$), minoritaria, y otra no magnética, siempre que la geometría de las probetas y la sonda no varíe.

Al invertir el modelo para evaluar μ_r , se utilizó por tanto la σ de la muestra 10, totalmente austenítica, aceptando que dicha propiedad no se ve alterada por la aparición de la martensita como segunda fase minoritaria. Se presentan en la Tabla 2 los resultados para la frecuencia de 60 kHz. La primera columna contiene la designación de la probeta y la segunda la μ_r calculada. Los errores en la determinación de σ y μ_r no exceden del 12% para el rango de conductividad eléctrica de los materiales estudiados y las frecuencias seleccionadas para los ensayos ⁽¹⁶⁾. La Figura 4 representa la μ_r en función del número de probeta. Se puede apreciar que los valores de μ_r obtenidos en las probetas de AISI 316, no fueron altos, tal cual se esperaba de un material estabilizado.

Tabla 2. Propiedades electromagnéticas (σ , μ_r) calculadas

AISI 316	$\sigma = 1,25 \pm 0,15 [10^6 \text{ S/m}]$
Nº de probeta	Permeabilidad magnética relativa (μ_r)
0	$9,66 \pm 1,16$
1	$11,6 \pm 1,40$
2	$9,89 \pm 1,19$
3	$8,66 \pm 1,04$
4	$3,52 \pm 0,43$
5	$1,96 \pm 0,24$
6	$1,32 \pm 0,16$
7	$1,26 \pm 0,16$
8	$1,08 \pm 0,14$
9	$1,06 \pm 0,13$
10	$1,04 \pm 0,13$

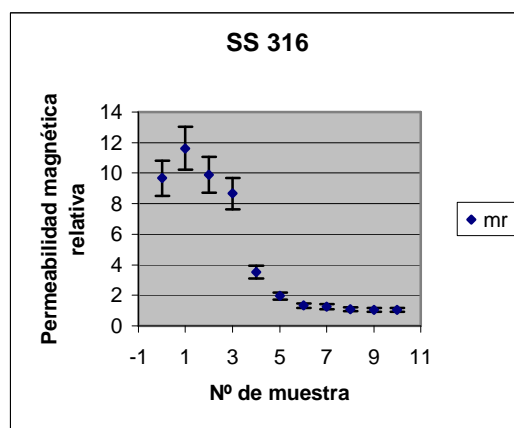


Figura 4
 μ_r calculada en función del número de probeta

5. Ensayos por Difracción de Rayos X

En la Figura 5 se representan gráficamente los resultados obtenidos con el ensayo de difracción de rayos X, en porcentaje en peso de fase martensítica. Se observa que este material (AISI 316) presenta porcentajes bajos de martensita, no superando el 20% en ninguno de sus ejemplares. Se cumple la hipótesis de que α' es la fase minoritaria. Se puede observar la buena concordancia entre las Figuras 3 y 4, obtenidas con dos métodos diferentes.

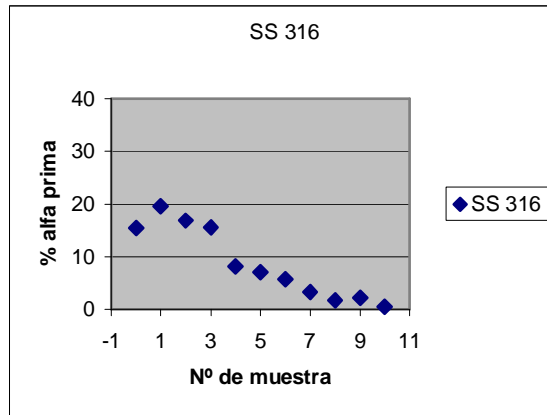


Figura 5
Proporción en peso de martensita determinado por Rayos X según número de probeta.

6. Análisis de los resultados

6.1 Relación entre la impedancia de sonda y el contenido de martensita

Los materiales utilizados en este trabajo habían sido caracterizados anteriormente por J. Marengo y P. Álvarez ⁽⁸⁾, con un método magnético. Una vez realizados los ensayos por corrientes inducidas, se buscó correlacionar los valores de impedancia calculados a partir del ensayo, con los valores medidos magnéticamente y con las composiciones determinadas por difracción de Rayos X. Se llevaron a cabo distintos tipos de análisis de regresión, lineales y no lineales, a fin de establecer una relación estadística entre las variables resistencia y reactancia normalizadas por un lado y proporción de martensita por el otro. La Figura 6 representa gráficamente los resultados obtenidos.

Se observa una relación lineal entre los valores de reactancia normalizada y la proporción de martensita, con un alto coeficiente de determinación en las cuatro frecuencias de ensayo. Cabe recordar que el coeficiente de determinación (R^2) establece qué proporción de la variación de la variable dependiente puede atribuirse a una relación lineal entre ambas variables. Los altos valores de este coeficiente en todas las frecuencias, superiores a 0,93, en el caso de la relación entre la reactancia normalizada y la proporción de martensita, justifican la adopción de este modelo lineal. En el caso de la resistencia normalizada, ésta se mantiene prácticamente constante. En las dos frecuencias bajas una ecuación cuadrática es la curva que mejor ajusta, seguida de la

lineal (no dibujada), aunque dicho ajuste es muy pobre y los términos cuadráticos y lineales son muy pequeños. En las frecuencias de 120 y 240 kHz, la curva que mejor ajusta es la exponencial, pero con un exponente muy bajo. Concluimos que en realidad, el contenido de martensita parece no afectar a la resistencia normalizada.

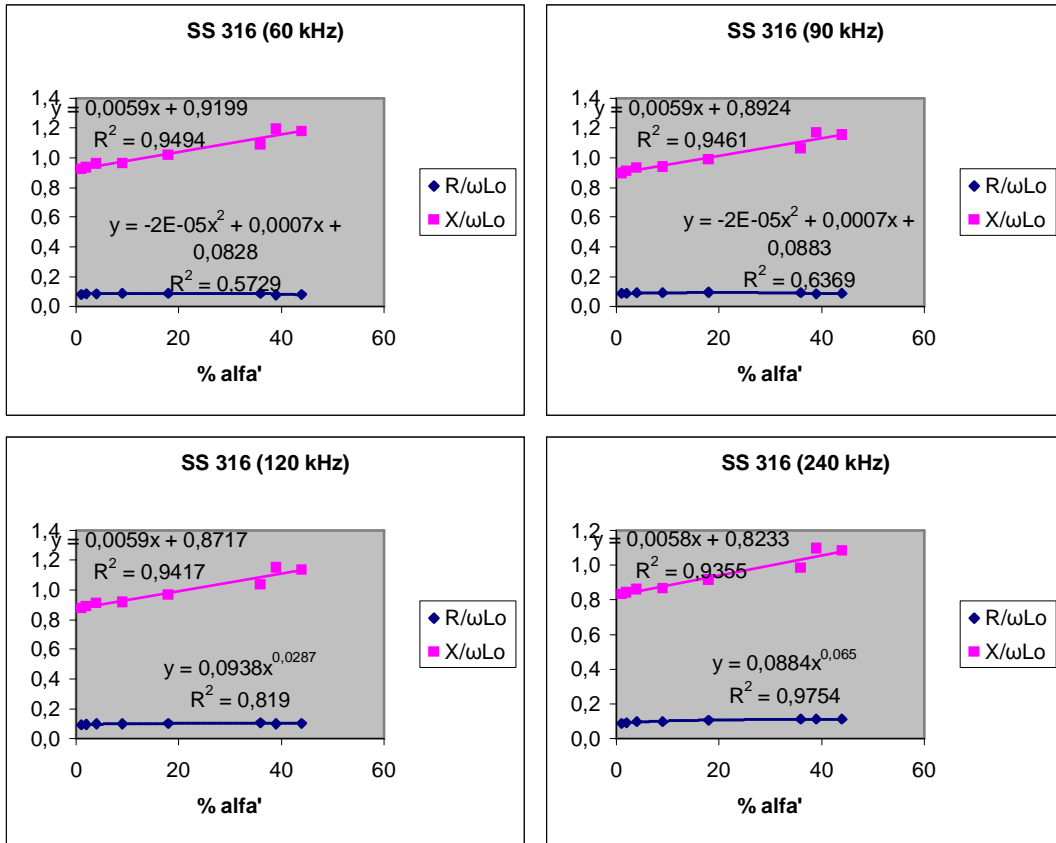


Figura 6
Componentes de impedancia normalizada vs. % de martensita (mét. magnético).

Se analizó también la relación entre las componentes de impedancia normalizada obtenida en ensayos CI y la proporción en peso de α' de las probetas de las distintas series, determinada a partir de diagramas de difracción de rayos X. La Figura 7 representa esta información.

Al igual que lo sucedido en el caso de la correlación entre componentes de Z y proporción de α' medida magnéticamente ⁽⁸⁾, el modelo de regresión lineal es el más apropiado para representar la curva X/ωLo vs. %α' en todas las frecuencias, con valores de R² superiores a 0,95. También puede llegarse a la misma conclusión que antes con respecto de la curva R/ωLo vs. %α': la resistencia normalizada no se ve afectada por el contenido de martensita. Los valores R² son un poco más altos en este caso, tal vez debido a que el método magnético es volumétrico y la difracción de rayos X y las CI tienen una penetración limitada.

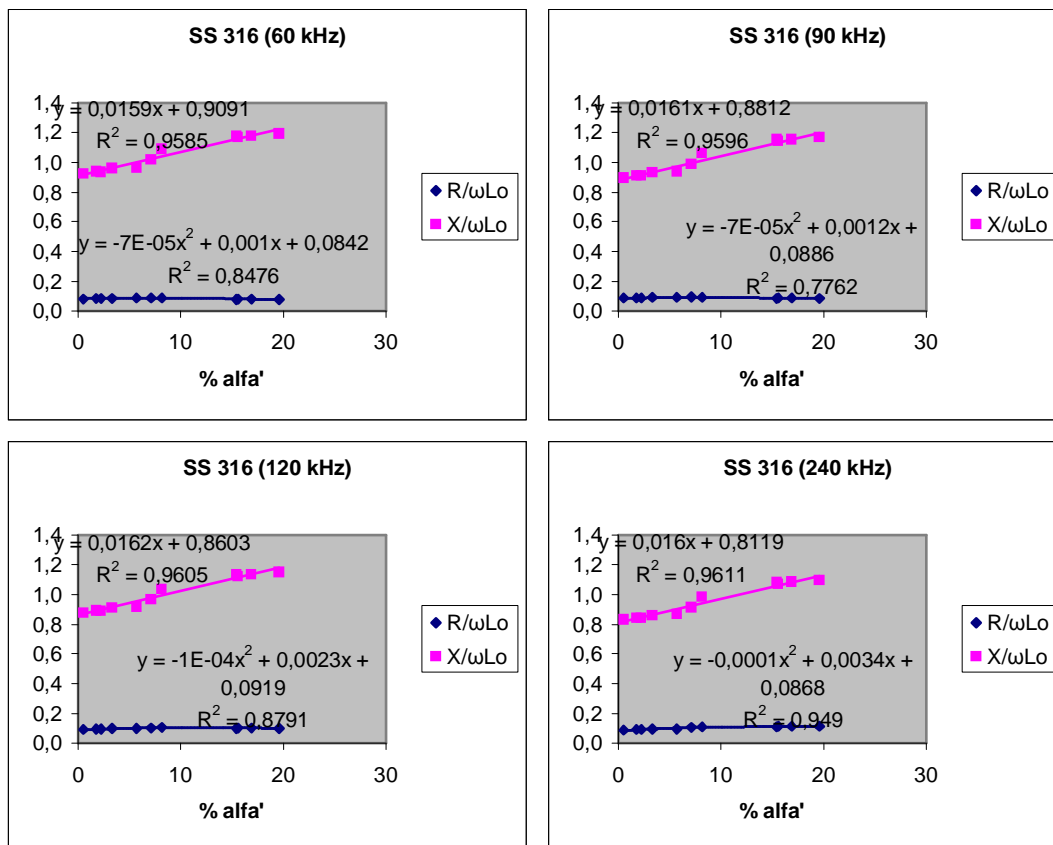


Figura 7
Componentes de impedancia normalizada vs. % de martensita (rayos X).

6.2 Estimación de la proporción de martensita en aceros inoxidables con ensayos por corrientes inducidas

A partir la correlación lineal hallada entre la reactancia obtenida con un ensayo por CI y la proporción de α' minoritaria contenida en muestras de acero inoxidable, se elaboró un método para la estimación de dicha proporción. Para la correcta implementación de este método son necesarias dos muestras del material a ensayar, una totalmente austenítica y otra con una cantidad de martensita conocida. Con estas dos muestras se determina la recta de calibración, y a partir de ésta puede calcularse el porcentaje de martensita que se desconoce en el material a ensayar.

Se aplicó este procedimiento, a modo de ejemplo, a las muestras numeradas 2 a 9, tomando como patrones las muestras 1 y 10, con un contenido en peso de martensita determinado por rayos X del 20% y 1%, respectivamente. Con los valores de reactancia normalizada obtenidos para esta serie con la frecuencia de 240 kHz (elegida por ser la de menor profundidad de penetración de las corrientes inducidas, y por ende, más parecida a la profundidad de penetración de los rayos X) se obtiene la siguiente recta de calibración:

$$\% \alpha' = 153,9 \frac{x}{\omega L_0} - 124,74$$

En la Figura 8 se puede apreciar la confiabilidad de la recta hallada, representada junto con los valores correspondientes a todas las muestras de la serie AISI 316, calculados anteriormente.

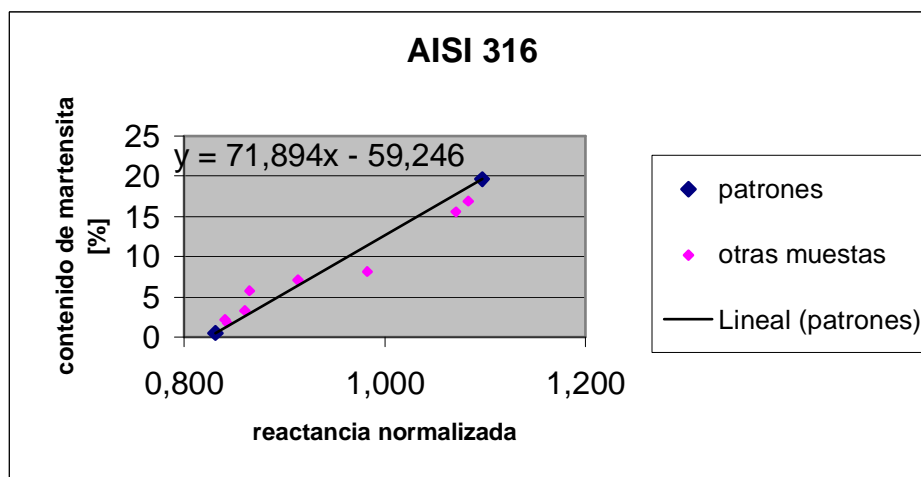


Figura 8

Representación de la recta de regresión junto con las muestras de la serie AISI 316

El contenido de las muestras 2 a 9 de la serie AISI 316 se calcula ingresando en la fórmula de la recta hallada con los valores extremos de reactancia normalizada. Los resultados pueden verse en la Tabla 3.

En la Tabla 3, la primera columna corresponde al número de muestra, la 2ª al porcentaje de martensita obtenido por difracción de Rx, la 3ª a la reactancia normalizada obtenida de un ensayo de CI, y por último, la 4ª al porcentaje de martensita calculado con el método propuesto. En la Figura 9 se comparan los valores de las columnas 2 y 4 de la Tabla 3. Se observa la buena concordancia entre ambos resultados.

Tabla 3. Cálculo del contenido de martensita con el método propuesto a 240 kHz.

MUESTRA	% ALFA', Rx	X/ωLo	% ALFA', este método
2	17	1,08	19
3	16	1,07	18
4	8	0,98	11
5	7	0,91	6
6	6	0,87	3
7	3	0,86	3
8	2	0,84	1
9	2	0,84	1

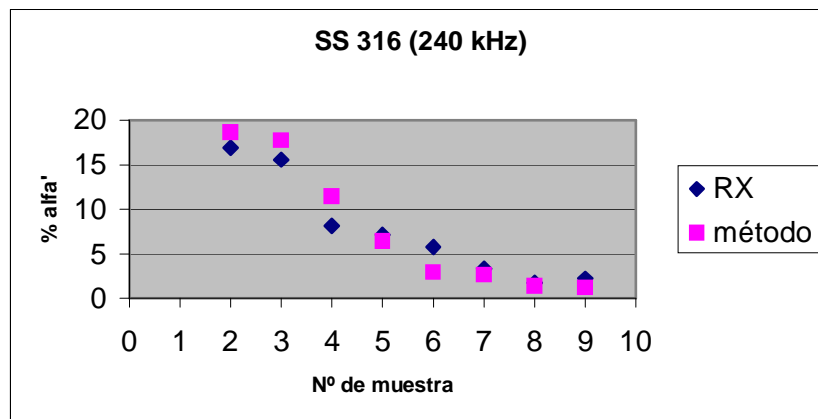


Figura 8
Comparación entre el % de martensita medido por Rx y el calculado con el método propuesto.

7. Conclusiones

El software que presentamos ofrece un método para el procesamiento de datos de CI para calcular los valores de conductividad eléctrica y permeabilidad magnética en muestras de acero inoxidable levemente magnéticas y evaluar el contenido de martensita en aceros inoxidables austeníticos.

Se verificó una relación lineal entre las componentes reactiva de Z experimental y el contenido de martensita α' de las probetas, que permite, teniendo dos patrones de calibración del material a ensayar, uno sin martensita y otro con una proporción máxima, estimar el contenido de martensita transformada en un acero inoxidable austenítico, a partir de un ensayo no destructivo de CI.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado con fondos de los PICT 12-12113 y 12-14426; SeCyT - Argentina

Los autores agradecen a la CNEA y a la FRGP UTN, por toda la colaboración prestada.

Referencias

1. J. C. Bavay, "Aciers inoxydables austénitiques" , cap. 16 en: P. Lacombe, B. Baroux, G. Béranger (Ed.), "Les aciers inoxydables" , Les Éditions de Physique, 1990.
2. P. Lacombe, G. Béranger, "Structures et diagrammes d'équilibre des diverses nuances d'aciers inoxydables. Conséquences sur leurs traitements thermiques", cap. 2 en: P. Lacombe, B. Baroux, G. Béranger (Ed.), "Les aciers inoxydables" , Les Éditions de Physique, 1990.

3. M. Stalder, S. Vogel, M.A.M. Bourke, J.G. Maldonado, D.J. Thoma, V.W. Yuan, "Retransformation ($\alpha' \rightarrow \gamma$) kinetics of strain induced martensite in 304 stainless steel", *Material Science and Engineering A*, vol. 280, pp. 270-281, 2000.
4. Rozenak, P., Bergman, R., "X-ray phase analysis of martensitic transformations in austenitic stainless steel electrochemically charged with hydrogen", *Material Science and Engineering A*, vol. 437, pp. 366-378, 2006.
5. Lula, R.A., Bernstein, I.M., "Residual and minor elements in stainless steels", cap. 14 en: Peckener, D., Bernstein, I.M. (Ed.), "Handbook of Stainless steels", McGraw-Hill, 1997.
6. H. Giraud, B. Baroux, "Emboutissabilité des aciers inoxydables", cap. 20 en: P. Lacombe, B. Baroux, G. Béranger (Ed.), "Les aciers inoxydables", Les Éditions de Physique, 1990.
7. M.A.M. Bourke, J.G. Maldonado, D. Masters, K. Meggers, H.G. Priesmeyer, "Real time measurement by Bragg edge diffraction of the reverse ($\alpha' \rightarrow \gamma$) transformation in a deformed 304 stainless steel", *Material Science and Engineering A*, vol. 221, pp. 1-10, 1996.
8. A. Lois, M. Ruch, "Assessment of martensite content in austenitic stainless steel specimens by eddy current testing", *Insight*, Vol. 48, No. 1, pp. 26-29, 2006.
9. J. Marengo, P. Alvarez, "Cuantificación del porcentaje de martensita alfa formado durante el maquinado de aceros inoxidable austeníticos de la serie 3xx", I Congreso de Ensayos No Destructivos para América Latina y el Caribe, San Pablo, Brasil, septiembre de 1986, pp. 537-555
10. R. Muñoz, Informe Técnico N° 48077, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro Regional Córdoba.
11. D.H.S. Cheng, "The Reflected Impedance of a Circular Coil in the Proximity of a Semi-Infinite Medium", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 14, No. 3, pp. 107-116, 1965.
12. C.V. Dodd, W.E. Deeds, "Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems", *J. Appl. Phys.* 39, No 6, pp 2829-2838, 1968.
13. M. Ruch, "Mediciones de conductividad eléctrica con MIZ-22 y ect-MAD8D en aceros inoxidable austeníticos", Informe Técnico N° IN-13E-051-IM/02, CNEA, 2002
14. A. Lois, M. Ruch, "Assessment of martensitic content in austenitic stainless steel specimens by eddy currents", BINDT annual meeting, 2006, Stratford-upon-Avon.
15. Ma, X., Peyton, A.J., Zhao, Y.Y., "Eddy currents measurements of electrical conductivity and magnetic permeability of porous metals", *NDT&E International*, vol. 39, pp. 562-568, 2006.
16. A. Lois, H. Mendonça, M. Ruch, "Conductivity calculations from eddy current measurements on thin specimens", *Insight*, Vol. 44, No. 5, pp. 279-284, 2002.