

Análisis comparativo en la determinación de ferrita delta para aceros inoxidables austeníticos

Comparative analysis on delta ferrite determination for austenitic stainless steels

Eduardo Asta¹, Juan Carlos Ríos¹, Francisco Cambiasso¹

¹Laboratorio de Materiales - GIMF – UTN-FRH (CP1706) París 532, Haedo, BA, Argentina
e-mail: asta.eduardo@gmail.com, rios@cnea.gov.ar, ingcambiasso@yahoo.com.ar

RESUMEN

En la soldadura de aceros inoxidables austeníticos la determinación de ferrita delta (ferrita- δ) resulta muy importante para poder conocer la susceptibilidad que presenta el metal de soldadura a la fisuración en caliente, uno de los problemas más importantes en relación con la soldabilidad, el comportamiento metalúrgico y mecánico de este tipo de aceros. La determinación de ferrita- δ en el metal de soldadura puede realizarse con métodos predictivos a partir de la composición química del metal aportado por el consumible de soldadura (Diagramas de Schaeffler, DeLong, WRC 1988 y WRC 1992) en forma metalográfica y a través de una técnica de ensayo no destructiva utilizando un medidor magnético para la determinación de ferrita.

En este trabajo se presenta un análisis comparativo entre la determinación predictiva de ferrita- δ y el método magnético utilizando electrodos inoxidables austeníticos para proceso SMAW de diferentes composiciones y diámetros. Los aportes utilizados corresponden a distintos lotes de fabricación de dichos consumibles y se ha utilizado una metodología estandarizada para la determinación magnética.

La correlación entre ambos métodos parece funcionar mejor para valores de NF entre 4 y 8. Los errores y la correlación entre los dos métodos aplicados para determinar NF no resultan aceptables cuando los electrodos depositan metales de soldadura con valores altos de NF, mayor que 18.

Palabras clave: ferrita- δ , aceros inoxidables, diagramas WRC (FN), diagrama de Schaeffler.

ABSTRACT

In the welding of austenitic stainless steels, the determination of delta ferrite (δ -ferrite) is very important to assess the susceptibility of weld metal to hot cracking, one of the major problems related to weldability, metallurgical and mechanical behavior of this type of steels. The determining δ -ferrite in the weld metal can be performed with predictive methods from the chemical composition of weld metal provided by the welding consumable (the diagram of Schaeffler, DeLong, WRC 1988, WRC1992), by metallography and using non-destructive testing technique by magnetic determination of ferrite. This paper presents a comparative analysis of the predictive determination of δ -ferrite and the magnetic method using austenitic stainless electrodes for SMAW process using different classifications and diameters. The filler metals used correspond to different batches of such consumables and it has used a standardized methodology for magnetic determination. The correlation between the two methods seems to work best for NF values between 4 and 8. Errors and the correlation between the two methods applied to determine NF are not acceptable when the electrodes deposit solder metals with high NF values, greater than 18.

Keywords: δ -ferrite, stainless steels, WRC (FN) diagram, Schaeffler diagram.

1. INTRODUCCIÓN

La soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos tiene en la denominada fisuración en caliente uno de los principales problemas que pueden afectar la integridad estructural de las uniones soldadas de dichos aceros.

Esta forma de fisuración se manifiesta, principalmente, en el metal de soldadura, aunque también puede extenderse al material base en la zona afectada por el calor (ZAC). Es conocido que el origen de la susceptibilidad a la aparición de fisuras en caliente [1,2] depende de la composición del metal de soldadura. En particular, la presencia de impurezas tales como S y P, así como contenidos crecientes de Nb y Si aumentan dicha susceptibilidad. La tendencia a la fisuración en caliente de un metal de soldadura austenítico depende fuertemente de la microestructura, en tal sentido la presencia de ferrita, en particular ferrita delta (ferrita- δ), resulta beneficiosa en la mitigación de dicha tendencia. La mayoría de los materiales de aporte inoxidables austeníticos están fabricados de acuerdo a especificaciones que permiten la presencia de determinado porcentaje de ferrita- δ en la microestructura del metal depositado. En consecuencia, un contenido de ferrita- δ mínimo del 3 a 4% es considerado aceptable como para asegurar la ausencia de fisuras en caliente. No obstante, sucesivos trabajos de diferentes autores [3,4] concluyeron que el modo de solidificación ferrítico-austenítico (FA) resulta esencial para reducir el riesgo, más que el contenido de ferrita- δ .

En otro orden, la presencia de ferrita- δ en el metal de soldadura austenítico no es siempre beneficiosa. Puede en ocasiones disminuir la resistencia a la corrosión del metal de soldadura austenítico, en determinados medios corrosivos, debido a un ataque preferencial sobre la ferrita. Por su parte, como consecuencia del aporte térmico y la velocidad de enfriamiento, así como la operación en servicio a temperaturas elevadas (350-900 °C) la ferrita- δ puede transformarse en fase sigma (fase- σ), provocando una fragilización del material con disminución de la tenacidad del metal de soldadura austenítico proporcional al porcentaje de fase- σ contenido en el mismo, además de también disminuir la resistencia a la corrosión. En consecuencia, para determinadas aplicaciones, como es el caso de componentes soldados de aceros inoxidables austeníticos operando a bajas temperaturas o en régimen criogénico, es necesario acotar el contenido máximo de ferrita- δ (ej. 6%) con la finalidad de no deteriorar la ductilidad y la tenacidad [5,6] para tales condiciones de servicio.

En función de lo descrito resulta necesario medir el contenido o nivel de ferrita- δ tanto en las etapas de diseño como de fabricación de componentes soldados de aceros inoxidables austeníticos, así como en el aseguramiento de la calidad correspondiente a la producción de los consumibles. La determinación del contenido de ferrita- δ es usualmente referida como número de ferrita (NF) en vez de porcentaje. Los métodos de determinación pueden dividirse en dos grupos: predictivos y de medición.

La determinación predictiva se basa en la aplicación de diagramas constitucionales para predecir el NF en el metal de soldadura de uniones de aceros inoxidables y uniones de metales disímiles. Cronológicamente los diagramas constitucionales utilizados [6,7] se inician con el conocido diagrama de Schaeffler (1949) siguiendo a éste los diagramas de DeLong (1956), Hull (1973), Espy (1982), WRC-1988 (MacCowan, Siewert y Olson, 1988) y WRC-1992 (Kotecki y Siewert, 1992). Todos ellos partiendo del diagrama de Schaeffler han sido ajustados con correcciones o agregados de elementos de composición, que influyen en el contenido de ferrita- δ , para lograr una mayor exactitud en la predicción del NF. También en los últimos años se comenzó a desarrollar una nueva metodología de predicción de NF utilizando el modelo matemático [6,8,9] de redes neuronales artificiales (en inglés: artificial neural networks).

La determinación predictiva es utilizada en el análisis preliminar de proyectos constructivos para definir diferentes alternativas de consumible en relación con los límites de ferrita- δ requeridos o especificados. En tal sentido el diagrama WRC-1992 [7] es muy aplicado en la industria y particularmente en los sistemas de calidad de producción de consumibles. Los diagramas predictivos utilizan como datos de entrada elementos de composición química del metal de soldadura, determinados mayormente con espectrómetros. En consecuencia, la certeza en la predicción de ferrita- δ dependerá de la exactitud con que se determinó la composición química.

Los métodos de medición de ferrita- δ responden a diferentes técnicas, tales como: magnética y metalográfica; ambas son las más comúnmente utilizadas. Otras menos utilizadas son la difracción por rayos X y la electroquímica. El método magnético es muy utilizado por tratarse de un ensayo no destructivo y la técnica está basada en la respuesta magnética de la fase ferrita- δ en contraposición a la fase austenita (fase γ), no magnética.

En función de las incertidumbres que plantean ambas determinaciones en las aplicaciones industriales, este trabajo presenta un análisis estadístico [10-11] comparativo entre la determinación predictiva de ferrita- δ y el método magnético utilizando electrodos inoxidables austeníticos para proceso SMAW de diferentes composiciones y diámetros, utilizando muestras para control de calidad correspondientes a diferentes lotes de producción estándar.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se han utilizado para el trabajo electrodos de acero inoxidable austenítico E308L, E316L, E309L y E309MoL, para proceso de soldadura manual (SMAW), cuyas clasificaciones responden a la norma ANSI/AWS A5.4 [10].

Dichos consumibles han sido provistos en diámetros de 2, 2,5 y 4 mm y corresponden a 50 muestras de lotes de fabricación diferentes. En la Tabla 1 se indican los rangos de composición química, determinada con un espectrómetro de emisión óptica (OES), para los metales de soldadura auseníticos obtenidos con los electrodos utilizados en el trabajo.

Para la determinación de ferrita- δ se aplicó el método predictivo WRC-1992 y la técnica de medición magnética. Con los resultados de ambos métodos se realizó un análisis estadístico comparativo.

2.1 Método predictivo

La determinación predictiva de ferrita- δ se efectuó utilizando el diagrama constitucional WRC-1992, tal como se muestra en la Figura 1. Los datos de entrada del diagrama corresponden a las relaciones de composición química definidas como C_{req} y N_{ieq} , tal como se indica en las siguientes ecuaciones:

$$C_{req} = Cr + Mo + 0,7Nb \quad (1)$$

$$N_{ieq} = Ni + 35C + 20N + 0,25Cu \quad (2)$$

Este diagrama es presentado para calcular el contenido de ferrita- δ , a partir de la composición química del metal depositado, de acuerdo con el Anexo A (informativo) de la norma ANSI/AWS A5.4 [10] y es utilizado, en general, por los fabricantes de consumibles para certificar el producto según lo requerido, en forma estándar, por la industria.

2.2 Método magnético y técnica de soldadura aplicada

Se ha aplicado un método no destructivo de medición de la ferrita- δ . El equipo utilizado para este trabajo es un medidor de ferrita Dr.Förster Modelo 1.053 calibrado con patrones secundarios, sets 37 y 51 del IIW (International Institute of Welding) comisión II, cuyo principio de medición es el de permeabilidad magnética. Esta práctica es utilizada por los fabricantes de consumibles para el control de calidad de los lotes de electrodos de acero inoxidable producidos.

Las probetas para la medición de ferrita- δ han sido realizadas de acuerdo con la norma ANSI/AWS A5.4 [12] Anexo A (informativo) y en la Figura 2 se muestran la forma y dimensiones requeridas para la misma. Para cada probeta con el metal de soldadura depositado, correspondiente a las clasificaciones de electrodos evaluadas en este trabajo, se efectuaron 5 mediciones de ferrita- δ , en términos de NF, y se determinó un valor NF promedio de las mismas que se utilizó para el análisis estadístico comparativo. La técnica de soldadura ha sido la misma para todos los metales de aporte utilizados y es la que se describe a continuación.

El metal base utilizado es un acero AISI 1010 cuyas medidas se indican en la Figura 2, asegurando antes de efectuar los aportes de soldadura la adecuada limpieza de la superficie de la chapa. El aporte se ha efectuado en posición plana en pasadas sucesivas hasta haber obtenido un metal de soldadura sin efectos de dilución con el metal base, para lo cual se requiere un espesor mínimo de 20 mm para el aporte de soldadura. En todos los casos el arco es iniciado de forma tal que no toque o incida sobre las paredes laterales del dispositivo de cobre para el aporte. Tanto los arranques como las paradas se han realizado en el extremo de la probeta, por fuera del largo de medición (L) de NF, Figura 2. Entre capa y capa de soldadura se ha cambiado la dirección de avance de la soldadura.

El procedimiento de soldadura aplicado ha sido manual, los rangos de corriente para cada diámetro de electrodo de inoxidable utilizado están indicados en la Figura 2. En todos los casos se ha aplicado la técnica de arco corto y de cordones rectos, sin oscilación. La temperatura máxima entre pasadas ha sido de 95°C, a fin de controlar dicha temperatura se ha utilizado un enfriamiento en agua del aporte correspondiente a cada pasada, luego de 20 s de realizada la misma. A la superficie de la probeta de soldadura se le ha dado una terminación lisa y suave (sin aguas marcadas) para facilitar la medición de ferrita. La medición de ferrita se ha realizado sobre la parte superior de la superficie de la probeta, en la dirección del largo indicado como L en la Figura 2.

Tabla 1: Rango de composición química de los electrodos utilizados

CLASIFICACIÓN	RANGO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA (% EN PESO)					
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
E-308L	0,025-0,04	0,68-1,01	0,41-0,68	9,47-10,93	18,09-20,65	0,01-0,17
E-316L	0,024-0,08	0,75-1,00	0,46-0,74	11,01-13,62	17,70-22,00	2,21-2,89
E-309L	0,02-0,04	0,83-1,33	0,44-0,76	12,37-13,73	22,36-24,02	0,02-0,13
E-309Mo	0,03-0,04	0,80-1,08	0,62-0,84	12,70-13,72	22,00-23,37	2,10-2,81

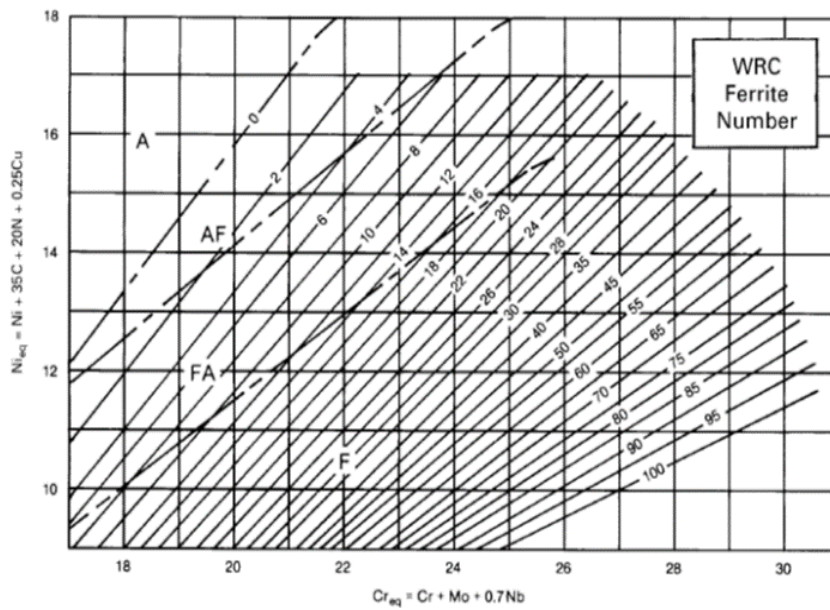
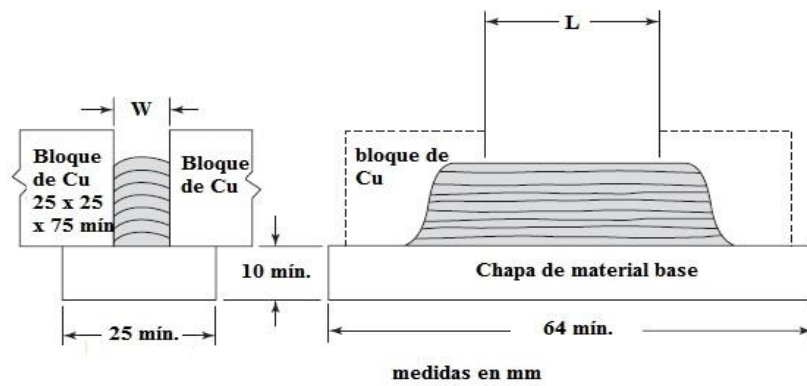


Figura 1: Diagrama constitucional WRC 1992 [7].



Diám. electr. mm	W mm	L
2 y 2,5	6,5	32
4	13	38

Diám. electr. mm	Rango de corriente de sold. A
2	40-50
2,5	65-80
4	120-140

Figura 2: Esquema de la probeta de soldadura utilizada para la medición magnética de ferrita- δ de acuerdo con AN-SI/AWS A5.4[12].

3. RESULTADOS

La Tabla 2 muestra los resultados correspondientes a los rangos de NF obtenidos tanto con el cálculo predictivo, utilizando el diagrama WRC-1992 y los valores de composición química de la Tabla 1, como con la medición magnética para los electrodos considerados en el trabajo. Así mismo la Tabla 2 muestra los valores de rango de error encontrado (NF WRC1992 – NF Medido), los valores de error medio y la desviación estándar del error (SE).

Las Figuras 3 a 7 muestran los resultados del análisis estadístico de regresión lineal para cada una de las muestras de electrodos utilizados de la Tabla 1 y para el conjunto de valores de las muestras de electrodos E-308L, E316L y E309L. Los gráficos de regresión lineal presentan valores de NF predichos por el diagrama WRC-1992 en función de NF experimental, medido con el equipo magnético.

Las Figuras 5 y 6 muestran la correlación entre NF calculada por WRC-1992 y la NF medida para metales depositados con los lotes de electrodos E-309L y E-309MoL respectivamente.

Finalmente, la Figura 7 muestra el gráfico de correlación para el conjunto de muestras de los electrodos E-308L, E-316L y E309L.

Tabla 2: Rango de NF obtenidos, rango de errores entre NF WRC-1992 y NF medido

ELECTRODO	RANGO NÚMERO DE FERRITA (NF)		RANGO ERROR	ERROR MEDIO	SE
	WRC-1992	Ferrita Medida	NF	NF	
E-308L	3,0-11,0	3,0-10,0	1,5	0,425	0,59
E-316L	2,0-22,0	2,0-24	4,5	0,86	1,51
E-309L	10,0-21,0	8,0-18,0	7,4	4,2	2,25
E-309MoL	20,0-23,0	17,0-24,0	8	2,2	3,37
Todos	2,0-23,0	2,0-24	10,8	1,5	2,15
SE = Desviación estándar del error					

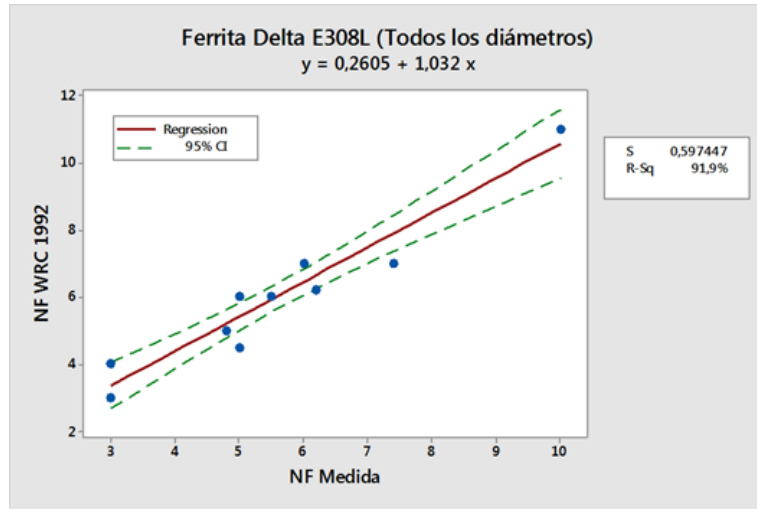


Figura 3: Regresión lineal NF WRC-1992 vs. NF medida electrodo E-308L.

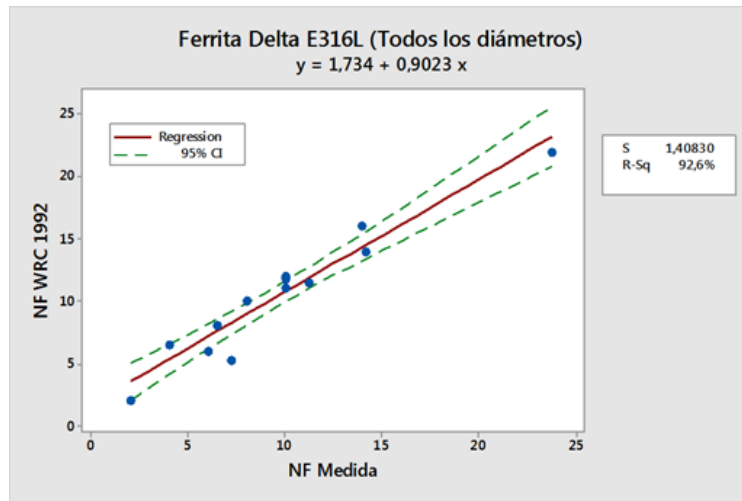


Figura 4: Regresión lineal NF WRC-1992 vs. NF medida electrodo E-316L.

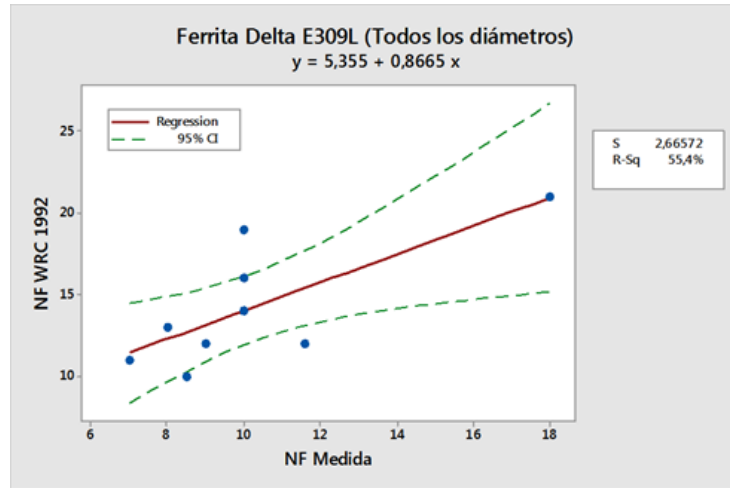


Figura 5: Regresión lineal NF WRC-1992 vs. NF medida electrodo E-309L.

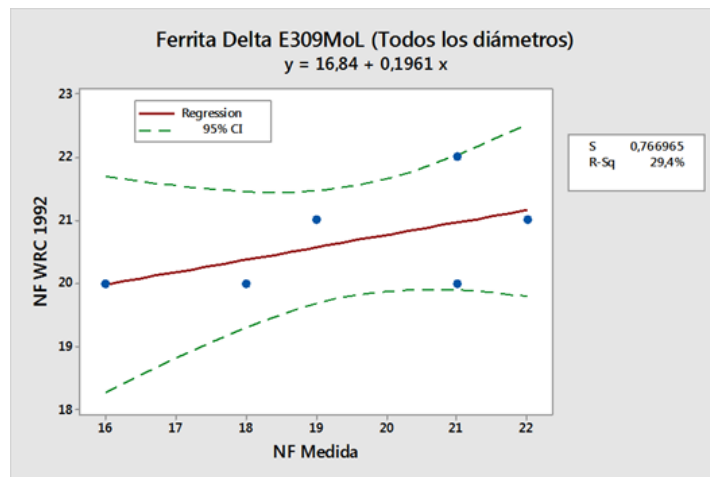


Figura 6: Regresión lineal NF WRC-1992 vs. NF medida electrodo E-309MoL.

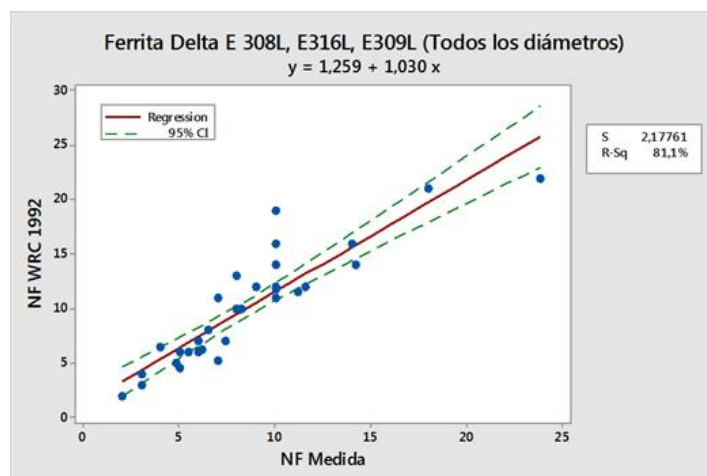


Figura 7: Regresión lineal NF WRC-1992 vs. NF medida, electrodos E-308L, E-316L y E-309L.

4. DISCUSIÓN

Del análisis de los valores de la Tabla 2 se puede observar que el rango de error y el error medio, para los metales depositados con los electrodos E-308L y E-316L, resulta más elevado para el electrodo E-316L (4,5 y 0,86) respecto del E-308L (1,5 y 0,425), tal diferencia se puede justificar en los valores más elevados de NF que presentaron los metales de soldadura depositados con electrodos E-316L (hasta NF 24) teniendo en cuenta que de acuerdo con lo mostrado [6], la diferencia en NF se hace más importante para valores de NF mayores que 18, no obstante el contenido de Mo del electrodo E-316L. También se aprecia una mayor dispersión del error para el electrodo E-316L ($SE=1,51$). El error se incrementa a prácticamente el doble para los electrodos E-309L y E-309MoL con una desviación estándar en ambos electrodos de 2,25 y 3,37 respectivamente. Cuando se considera el error para todo el conjunto de valores de NF, de todos los electrodos, el rango de error es también elevado con una dispersión algo superior ($SE=2,15$). Se indica además que no se ha observado en el análisis estadístico una influencia como variable del diámetro de los electrodos. La dispersión de los valores tanto predichos como medidos se mantiene dentro del mismo rango para los diámetros de consumibles utilizados.

De forma coherente a lo discutido para los resultados de la Tabla 2, las Figuras 3 y 4 muestran el mejor grado de correlación entre los valores predichos y los medidos. La correlación encontrada, para un intervalo de confianza del 95% ($\pm 2\sigma$), permite observar, para estas dos clasificaciones, una aceptable correlación (R-Sq) de 91,9% y 92,6%, respectivamente, con una relativamente baja dispersión ($S=0,69$) para el electrodo E-308L y un valor mayor ($S=1,40$) para la clasificación E-316L. Observando los gráficos de regresión de las Figuras 3 y 4 también se puede inferir que para metal depositado con electrodo E-308L la correlación entre ferrita predicha y medida presentan un mejor ajuste y una menor dispersión para valores de NF entre 4 y 6. En tanto que para el electrodo E-316L dicha observación resulta para valores de NF entre 4 y 10.

En las Figuras 5 y 6 se observa una regular a pobre correlación para los consumibles E-309L y E-309MoL, 55,4% y 25,4% respectivamente. Esto se relaciona con la mayor dificultad de correlación entre el modelo predictivo de NF y el método de medición que aparece para valores de NF mayores que 18.

De la Figura 7 se infiere una correlación regular a aceptable (81,1%) con una desviación estándar, $S=2,18$, que resulta coherente con la dispersión que se observa y con algunos valores de NF fuera del intervalo de confianza del 95%. Los valores obtenidos para el electrodo E-309MoL ha sido segregados de la Figura 7 debido a la fuerte distorsión estadística que introduce por la marcada pobre correlación que induce el mayor contenido de Mo (Figura 6). Se aprecia también que para el conjunto de valores NF predichos vs medidos el ajuste y la dispersión son mayores para un rango de NF entre 3 y 8 aproximadamente.

El análisis estadístico comparativo, entre ambas metodologías, ha mostrado resultados que son representativos, a nivel del control de calidad y certificación, de lotes de producción comercial estándar de electrodos revestidos de aceros inoxidable austeníticos clasificados por la norma AWS A5.4, utilizando las probetas estandarizadas por dicha norma, tanto para determinación de composición química como para la medición directa de ferrita δ .

Por su parte, es necesario considerar la fuerte incidencia de la variabilidad en el análisis de composición química para la predicción de ferrita [13,14], en relación con la medición de ferrita. Dicha variación se pone en evidencia al observar la Tabla 1, para los rangos de composición química de los metales de soldadura correspondientes a distintos lotes de fabricación de cada una de las clasificaciones de electrodos inoxidables austeníticos utilizados. No obstante, las diferencias evidenciadas podrían ser más importantes en el control de ferrita δ aplicado a componentes y elementos estructurales industriales [15], donde aparecen en forma más significativa variables tales como: aporte térmico, espesor, composición química, dilución, entre otros.

5. CONCLUSIONES

Las diferencias o errores, así como la correlación entre valores de ferrita δ , expresados como NF, determinados por el método predictivo WRC-1992 y la medición por el método magnético resultan aceptables, tanto para aplicaciones predictivas de diseño como en control de calidad industrial, para el caso de metales de soldadura obtenidos con electrodos austeníticos E-308L y E-316L en proceso SMAW, correspondientes a lotes de fabricación comercial estándar.

La correlación entre ambos métodos parece funcionar mejor para valores de NF entre 4 y 8. Los errores y la correlación entre los dos métodos aplicados para determinar NF no resultan aceptables cuando los electrodos depositan metales de soldadura con valores altos de NF (NF mayor que 18), como es el caso de la soldadura con electrodos E-309L y E-309MoL.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Conarco Alambres y Soldaduras S.A (ESAB Argentina) y a la Fundación Latinoamericana de Soldadura por el soporte técnico recibido.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CASTRO, R.J., DECADENET, J.J., *Welding metallurgy of stainless and heat resistance steels*, Cambridge UK, Cambridge University Press, 1974.
- [2] LIPPOLD, J.C., SAVAGE, W. F., “Solidification of austenitic stainless steel weldments part II-the effect of alloy composition on ferrite”, *Welding Journal*, v. 59, n. 2, pp. 45-58, 1980.
- [3] MASUMOTO, I., TAKAMI, K., KUTSUNA, M., “Hot cracking of austenitic stainless steel welds”, *Journal Jpn. Welding Society*, v. 41, pp. 1306-1314, 1972
- [4] KUJANPAA, V. P., “Effects of steel type and impurities in solidification cracking of austenitic stainless steels”, *Metal Construction*, v. 117, pp. 40R-46R, 1985.
- [5] LEFEBRE, J., “Guidance on specifications of ferrite in stainless steel weld metal”, *Welding in the World*, v. 31, n. 6, pp. 390-406, 1993.
- [6] VALIENTE BERMEJO, A., “Predictive and measurement methods for delta ferrite determination in stainless steel”, *Welding Journal*, v. 91, n. 4, pp. 113s-121s, 2012.
- [7] KOTECKI, D. J., SIEWERT, T. A., “WRC-1992 constitution diagram for stainless steels weld metals”, *Welding Journal*, v. 71, n. 5, pp. 181s-191s, 1992.
- [8] VASUDEVAN, M., MURUGANANTH, M., BHADURI, A. C., RAJ, B., PRASAD RAO, K., “Bayesian neural network analysis in ferrite number in stainless Steel welds”, *Sci. and Tech. of Welding and Joining*, v. 9, n. 2, pp. 109-120, 2004.
- [9] VASUDEVAN, M., BHADURI, M., RAJ, B., PRESAD RAO, K., “Delta ferrite prediction in stainless Steel welds using neural network analysis and comparison with other prediction methods”, *Journal of Materials Processing Technology*, v.142, n. 1, pp. 20-28, 2003.
- [10] LOR, S., *Sampling: design and analysis*, Duxbury Press, 2010
- [11] OAKLAND, J., *Statistical process control*, Sixth Edition, Butterworth- Heinemann, 2008.
- [12] ANSI/AWS A5.4-92, “Specification for stainless steel electrodes for shielded metal arc welding”, American Welding Society, 1992.
- [13] FARRAR, J. C., Zhang, Z., “Round robin on ferrite measurement and chemical analysis”, IIW Document II-1510-03, International Institute of Welding, Paris, 2003.
- [14] KOTECKI, D. J., ZHANG, Z., “Sources of variation in ferrite number predictions vs. measurements”, *Welding Journal*, v. 92, n. 6, pp.175s- 181s, 2013.
- [15] FARRAR, J. C. M., “The measurement of ferrite number (NF) in real weldments- Final report”, *Welding in the World*, v.49, n. 5/6, pp. 13-21, 2005.