EQUIPOS DE SOLIDIFICACIÓN DIRECCIONAL

Alicia Esther Ares.

Ciencia de los Materiales. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales (FCEQyN). Universidad Nacional de Misiones (UNaM).
Instituto de Materiales de Misiones (IMAM)
Félix de Azara 1552 (3300) Posadas-Misiones. Argentina.

Dra. Alicia Esther Ares.

Doctora en Ciencia y Tecnología, mención Materiales del Instituto Sabato (UNSAM-CNEA), 2000. Profesora Titular Regular de la UNaM (Ciencia de los Materiales) con dedicación exclusiva, desde el 2012. Investigadora Independiente del CONICET con lugar de trabajo en el Instituto de Materiales de Misiones – IMAM (CONICET-UNaM), desde el 2014. Sus líneas principales de trabajo están orientadas al estudio de la solidificación de aleaciones y materiales compuestos, estableciendo los parámetros térmicos y las estructuras de solidificación y correlacionándolos con sus propiedades mecánicas y electroquímicas.

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista experimental, la técnica de solidificación unidireccional ha sido ampliamente utilizada en los estudios de caracterización de diferentes aspectos de la macroestructura, la microestructura, de la segregación de soluto de sistemas metálicos, etc. Estos estudios se pueden dividir en dos categorías:

1. aquellos que se refieren a la solidificación en condiciones estacionarias de flujo de calor.
2. los que abordan la solidificación en régimen transitorio.

En el primer caso, la velocidad de crecimiento y el gradiente de temperatura son controlados independientemente y mantenidos constantes a lo largo de la experiencia (Bridgman/Stockbarger).

Es una técnica muy útil para determinar aspectos cuantitativos de la relación entre la microestructura y las variables térmicas de solidificación, permitiendo analizar la influencia de cada variable de forma independiente y la realización de un relevamiento de los parámetros microestructurales de la muestra solidificada.

El análisis de las condiciones de solidificación con flujo de calor transitorio es de suma importancia, ya que en el mismo se incluye a la mayoría de los procesos industriales que implican el proceso de solidificación.

En esta condición, tanto el gradiente de temperatura como la velocidad de crecimiento varían libremente con el tiempo y la posición dentro del metal.

En la literatura son aun escasos los modelos de crecimiento dendrítico validados con resultados experimentales correspondientes a aleaciones y materiales compuestos de matriz metálica de diferentes composiciones químicas [1-7].

Por lo expuesto anteriormente, el Grupo de Investigación en Solidificación del Programa de Materiales, Modelización y Metrología (PMMM) de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales (FCEQyN), Universidad Nacional de Misiones (UNaM) y del Instituto de Materiales de Misiones – IMAM (UNaM-CONICET) ha establecido, desde el año 1996, investigaciones teóricas y experimentales para evaluar la influencia de los parámetros térmicos en condiciones de solidificación unidireccional en régimen transitorio, sobre los parámetros de la macroestructura y la microestructura de diferentes sistemas metálicos, en un amplio rango de concentraciones.

EQUIPOS DE SOLIDIFICACIÓN DIRECCIONAL CONSTRUIDOS EN LA UNIVERSIDAD DE MISIONES

a. Equipo de Solidificación Direccional Vertical Ascendente

En este dispositivo la solidificación avanza en dirección opuesta a la acción de la gravedad y el peso propio de la probeta favorece el contacto térmico con la base del molde, que se encuentra refrigerada. En la Figura 1 se muestra un esquema del equipo de solidificación direccional vertical ascendente.

En las condiciones del mismo la solidificación se realiza en forma vertical y de abajo hacia arriba. El metal es fundido dentro del dispositivo y cuando la temperatura del metal líquido alcanza un determinado valor, la solidificación se inicia en la parte inferior del molde por la circulación del agua de refrigeración. Una serie de termocuplas insertas dentro del metal en diferentes posiciones a partir de la base permiten el registro de la evolución del campo térmico durante el proceso de solidificación.

El tipo de termocupla a utilizar (J, K, T, E, R, S, B) se selecciona en función al rango de temperaturas de trabajo.

Los datos de temperatura, que se almacenan en la memoria de una computadora, se utilizan posteriormente para la determinación de los parámetros de solidificación, esto es, las velocidades de las isotermas características (temperaturas de fusión en los metales puros o temperaturas de *solidus* y *liquidus* en el caso de las aleaciones), los gradientes térmicos, las velocidades de enfriamiento, el sobrecalentamiento del metal líquido, el tiempo de solidificación local, el coeficiente de transferencia de calor entre el metal y el agua de refrigeración.

Otro aspecto interesante es que como el perfil de temperatura en el líquido es cada vez mayor hacia la parte superior del lingote y el líquido más denso se encuentra en la frontera de la transformación sólido/líquido, no ocurren, en principio, corrientes convectivas o por diferencias de temperatura o por diferencias de densidad. Esto permite realizar el análisis teórico y los cálculos experimentales libres de esta complicación, ya que la transferencia de calor en el lingote se lleva a cabo principalmente por conducción térmica unidireccional [8-22].

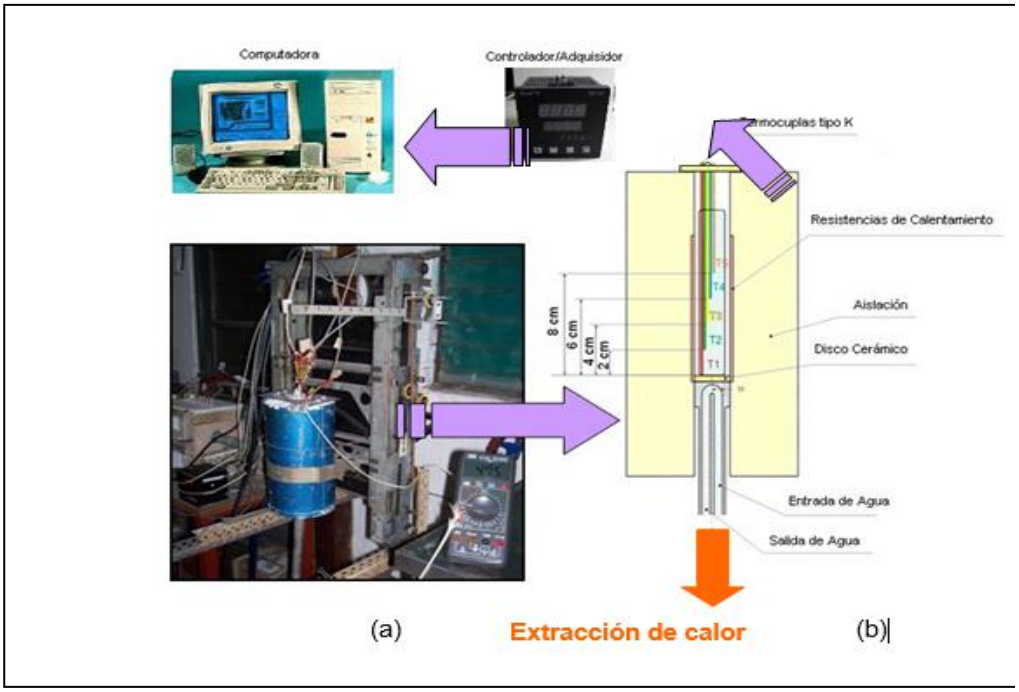


Fig. 1. Dispositivo de solidificación direccional vertical ascendente.

(a)Foto del equipo durante un ensayo de solidificación.

(b) Esquema que muestra las diferentes partes del dispositivo

b. Solidificación Unidireccional Horizontal

La Figura 2 muestra un esquema del dispositivo de solidificación unidireccional horizontal y una foto del equipo en la que se ve la probeta solidificada dentro de la cámara del molde.

El proceso de solidificación se puede realizar de dos maneras:

1. Vertiendo el metal fundido en el molde aislado térmicamente en los laterales y donde el calor es eliminado por uno o ambos extremos del molde, a través de bloques macizos de metal (o cámara de refrigeración).
2. Empleando un sistema similar que permita fundir el metal en su interior hasta que se alcanza una cierta temperatura, a partir de la cual se inicia la refrigeración (y por lo tanto el proceso de solidificación).

En el primer caso, la turbulencia del vaciamiento del material metálico induce corrientes de convección forzada, que puede tomar algún tiempo disiparlas (las cuales puede adquirir diferentes intensidades a lo largo de la sección del lingote/probeta).

No se puede considerar en este caso que estrictamente se produce una solidificación unidireccional.

En la segunda situación se garantiza, con la fusión de los metales dentro de la lingotera, una mayor estabilidad en relación con el movimiento del metal líquido. Sin embargo, es importante destacar que no se puede garantizar las mismas variables térmicas a lo largo de las diferentes secciones horizontales del lingote, ya que las diferencias en inestabilidad térmica y densidad en el líquido van a inducir corrientes convectivas diferentes a lo largo de estas secciones. Es importante en este caso, que el mapeo térmico de la evolución de la solidificación sea realizado en una sección horizontal como lo más cerca posible de la sección en la que se analizarán la macroestructura y microestructura. Esta configuración es con mucho más compleja desde el punto de vista de la determinación de los parámetros de solidificación [23, 27].

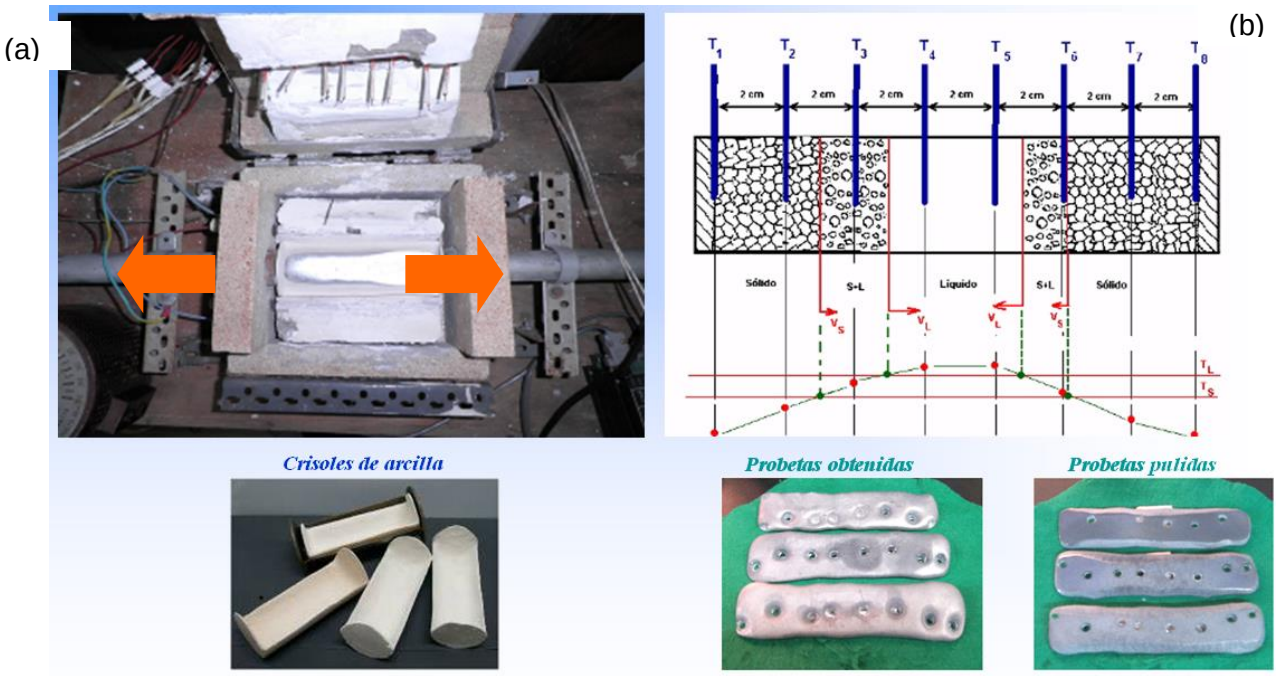


Figura 2. (a) Equipo de solidificación direccional horizontal. (b) Esquema del dispositivo indicando la posición de las termocuplas. (c) Moldes de cerámica. (d) Fotos de algunas probetas obtenidas.

c. Macroestructuras de Solidificación

La transición de estructura columnar a equiaxial (TCE) ha sido objeto de diferentes abordajes de investigación y la literatura indica que la competencia entre estos dos tipos de crecimiento se rige fundamentalmente por las condiciones del sistema metal/molde, tales como:

- La composición de la aleación,
- la densidad de núcleos en el volumen de metal líquido,
- el sobrecalentamiento del metal líquido,
- la difusividad térmica del material del molde,
- la calefacción
- el coeficiente de transferencia de calor de la interfase metal / molde
- la convección en el metal líquido.

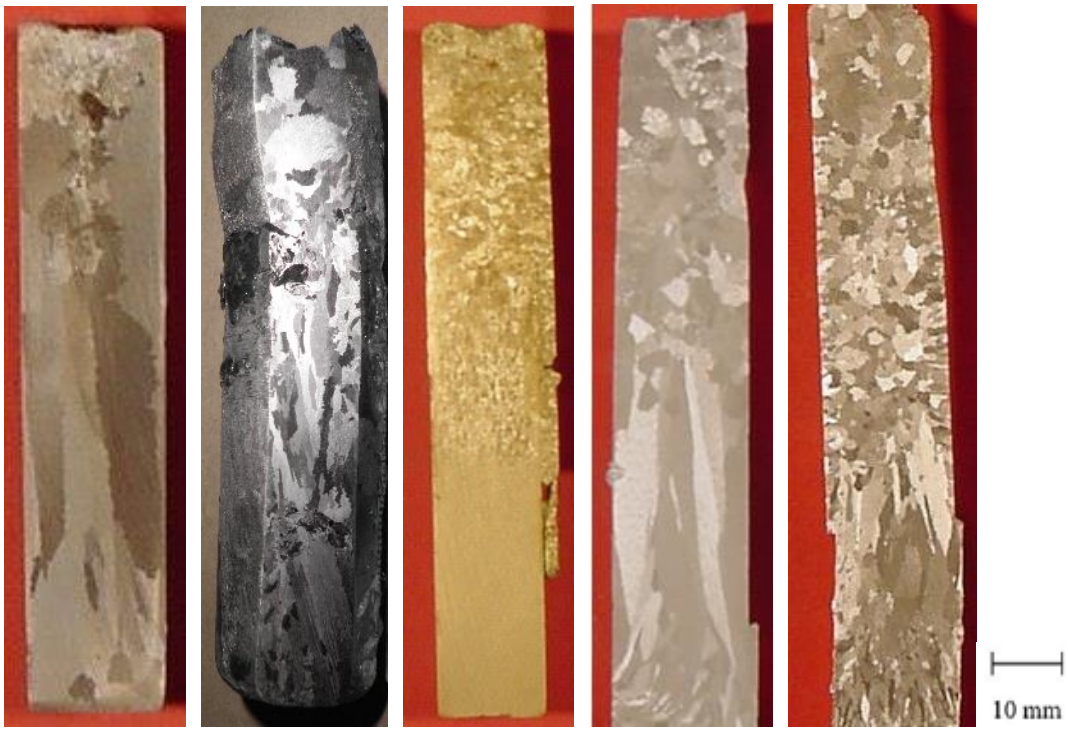
Se puede decir, de forma cualitativa, que la TCE se anticipa a medida que:

- la concentración de soluto de la aleación aumenta,
- la temperatura de vaciamiento se reduce
- las corrientes de convección en el metal líquido son más intensas.

Sin embargo, la cuantificación de esta transición requiere de una investigación exhaustiva de los mecanismos físicos involucrados. En la Figura 3 se pueden observar macroestructuras típicas de diferentes aleaciones solidificadas en forma vertical ascendente.

Dada la falta de datos experimentales que determinen la influencia real de las variables térmicas en los procesos de solidificación el Grupo de Investigación en Solidificación (PMMM – IMAM) desarrolló un programa experimental empleando aleaciones de diferentes sistemas: Pb-Sn, Al-Cu, Latón comercial, Al-Zn, Al-Mg, Al-Si, Zn-Sn, Aceros, entre otros.

En este programa se construyeron los equipos y se pusieron a punto a fin de realizar experimentos de solidificación unidireccional vertical ascendente y horizontal, siguiendo cuidadosamente el estudio de la historia térmica durante la solidificación para la posterior correlación de los parámetros térmicos con la posición de la TCE en la macro y microestructura [8-33].



(a) (b) (c) (d) (e)

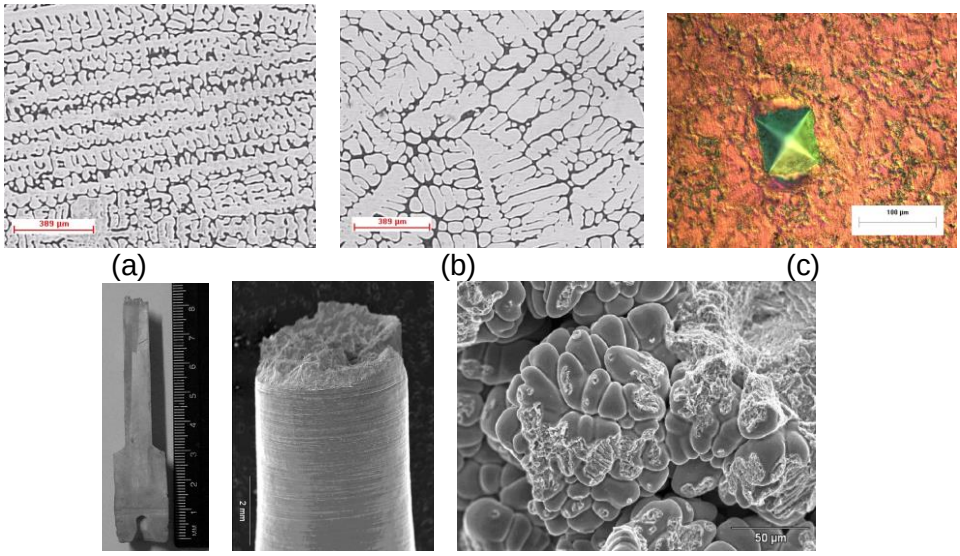
Figura 3. Macroestructuras típicas de diferentes aleaciones solidificadas en forma vertical ascendente. (a) Acero 316L. (b) Al-4,5%Cu. (c) Latón comercial. (d) Al-2%Zn. (e) Al-2%Mg.

d. Microestructuras de Solidificación

En los procesos de fundición la morfología de la solidificación es típicamente dendrítica y no cambia significativamente desde la superficie a otras posiciones de las piezas, excepto para el tamaño de los brazos dendríticos. La importancia tecnológica de estos procesos ha justificado la intensa investigación en la búsqueda de relaciones cuantitativas entre los parámetros del proceso y el espaciamiento interdendrítico.

Un modo conveniente y ampliamente utilizado en determinar el efecto de las condiciones de solidificación, y por lo tanto, las variables térmicas en la microestructura formada consiste en la medición de los espaciamientos dendríticos o celulares, es decir, la distancia entre los brazos dendríticos primarios (λ_1), secundarios (λ_2) o de un orden superior o la distancia entre las células (λ_c). La fuerza impulsora es el subenfriamiento constitucional entre dos ramas primarias adyacentes, que tienen la versatilidad en ramificar la cantidad necesaria para reducir este superenfriamiento, incluso usando un brazo terciario que comienza a crecer como primario para reducir los espaciamientos de primer orden [1, 7].

El espaciamiento interdendrítico ejerce una influencia significativa sobre las propiedades mecánicas de las aleaciones en su estado bruto de solidificación, ya que los espaciamientos más pequeños permiten que la microestructura sea caracterizada por una distribución más uniforme de segregación microscópica, que existe entre las ramificaciones dendríticas o celulares, lo que favorece el comportamiento mecánico. Adicionalmente, para eliminar las diferencias en concentración causadas por esta segregación de soluto, es de práctica común realizar tratamientos térmicos. A medida que el tiempo requerido para la homogeneización disminuye con la disminución de los espaciamientos, las condiciones de enfriamiento que pueden favorecer la obtención de materiales con espaciamientos menores resultan ser los más interesantes desde el punto de vista del análisis de sus propiedades. Por consiguiente, la determinación correcta de los parámetros que controlan estos espaciamientos durante la solidificación es de fundamental importancia. A modo de ejemplo, en la Figura 4 se muestran micrografías de algunas aleaciones ensayadas en diferentes trabajos realizados [28-31].



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figura 4. Microestructuras de diferentes aleaciones. (a) Al-2%$Cu_{Columnar}$. (b) Al-2%$Cu_{Equiaxial}$. (c) Zona de una probeta en la que se realizó el ensayo de microdureza. (d) y (e) Macroestructura de una aleación Zn-2%Al ensayada a la tracción. (f) Microestructura de la zona de fractura de la probeta.

REFERENCIAS

[1] J. A. Spittle, International Materials Reviews, 51(2006) 247-269.

[2] S. C. Flood and J. D. Hunt in: Metals Handbook, Casting, Edition 9ª (New York, 1988) p. 130.

[3] R. B. Mahapatra and F.B. Weinberg, Metallurgical Transactions, 3B (1987) 425.

[4] I. Ziv and F. B. Weinberg, Metallurgical Transactions, 20B (1989) 731.

[5] C.Y. Wang and C.Beckermann, Metallurgical and Materials Transactions, 27 A (1996) 2754-2795.

[6] Ch. A. Gandin, Acta Materialia, 48 (2000) 2483-2501.

[7] A. Garcia, Projeções, 23 (2005) 13-32.

[8] A. E. Ares and C.E. Schvezov, Metallurgical and Materials Transactions, 31A (2000) 1611-1625.

[9] A. E. Ares, S. F. Gueijman and C.E. Schvezov, J. Crystal Growth, 241 (2002) 235-240.

[10] A. E. Ares, E, Gregolin, R, Caram, C. E. Schvezov, Light Metals, (2004) 869-875.

[11] A. E. Ares; M. J. Kaufman, C. E. Schvezov, Revista Matéria, 9 (2004) 60-65.

[12] A. E. Ares; R. Caram, C. E. Schvezov, Revista Matéria, 9 (2004) 411-419.

[13] A. E. Ares, S. F. Gueijman, R. Caram, C. E. Schvezov, Journal of Crystal Growth, 275 (2005) e319-e327.

[14] A. E. Ares; C. E. Schvezov, Metallurgical and Materials Transactions, 38 A (2007) 1485-1499.

[15] A. E. Ares; L. M. Gassa, S. F. Gueijman, C. E. Schvezov, Revista Scientia et Technica, 36 (2007) 193-198.

[16] A. E. Ares; S. F. Gueijman, C. E. Schvezov, Revista Scientia et Technica, 36 (2007) 369-374.

[17] A. E. Ares; L. M. Gassa, S. F. Gueijman, C. E. Schvezov, Journal of Crystal Growth, 310 (2008) 1355-1361.

[18] A. E. Ares; C. E. Schvezov, Giessereiforschung International Foundry Research, 60 (2008) 6-13.

[19] A. E. Ares, L. M. Gassa, C. E. Schvezov, Light Metals, (2008) 689-694.

[20] M. R. Rosenberger, A. E. Ares, I. P. Gatti, C. E. Schvezov, Wear, 268 (2010) 1533-1536.

[21] A. E. Ares, C. E. Schvezov, World Journal of Engineering (WJOE), 7. Nº 3 (2010) 13-29.

[22] A. E. Ares, S. F. Gueijman, C. E. Schvezov, Journal of Crystal Growth, 312 (2010) 2154–2170.

[23] S. F. Gueijman, C. E. Schvezov, A. E. Ares, Materials Transactions, 51 (2010) 1861-1870.

[24] A. E. Ares, C. E. Schvezov, Journal of Crystal Growth, 318 (2011) 59-65.

[25] A. E. Ares, L. M. Gassa, Corrosion Science, 59 (2012) 290-306.

[26] A. E. Ares, L. M. Gassa, M. R. Rosenberger, C. E. Schvezov. Materials Chemistry and Physics. 136 (2012) 394-414.

[27] S. F. Gueijman, C. E. Schvezov, A. E. Ares. Materials Performance & Characterization (MPC). ASTM Journal. Special Issue on Thermal Process Modeling, Simulation, and Optimization, 1 (2012) 37-52.

[28] M. V. Okseniuk, S. F. Gueijman, C. E. Schvezov, A. E. Ares. Procedia Materials Science, 1 (2012) 64-71.

[29] A. E. Ares, C. M. Rodriguez, C. E. Schvezov, M. R. Rosenberger. Procedia Materials Science. 1 (2012) 72-79.

[30] Sergio F. Gueijman, Alicia E. Ares, International Journal of Engineering and Innovative Technology, Volumen: 3, Issue 5, Páginas: 293-299. Número ISSN: 2277-3754. Editorial: IJEIT. © 2013.

[31] A. E. Ares, C. E. Schvezov. Journal of Metallurgy. Volume 2013 (2013), Article ID 628495, 12 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2013/628495.

[32] A. S. Román, C. M. Méndez, A. E. Ares, Materials Science Forum, 783-786 (2014) 100-107.

[33] A. S. Román, C. M. Méndez, A. E. Ares, Corrosion Reviews (2015). A ser publicado.