



CADI 2016

7,8 Y 9 DE SEPTIEMBRE
RESISTENCIA - CHACO

ISBN 978-950-42-0173-1



9 789504 201731



III CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERIA

En conjunción con:

CAEDI 2016
IX CONGRESO ARGENTINO DE
ENSEÑANZA DE LA INGENIERIA



**UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL
RESISTENCIA**



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DEL NORDESTE
FACULTAD
DE INGENIERIA**



confedi

ISBN 978-950-42-0173-1

Editores:

Alejandro Farias

Jorge Pilar

Cesar J. Acuña

CADI 2016

III CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERIA

En conjuncion con:

CAEDI 2016

IX CONGRESO ARGENTINO DE ENSEÑANZA DE LA INGENIERIA

7,8 y 9 de Septiembre de 2016
Resistencia | Chaco | Argentina

Actas del III Congreso Argentino de Ingeniería: CADI 2016. 1° Edición
Compilado por Alejandro Rubén Farías, Jorge Pilar, César J. Acuña
Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Resistencia - 2016.
Libro digital, PDF - Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-950-42-0173-1



III CADI
IX CAEDI
2016



UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL
RESISTENCIA



UNIVERSIDAD NACIONAL
DEL NOROESTE
FACULTAD
DE INGENIERÍA

DESARROLLO DE SISTEMA PARA APLICACIÓN DE LOS PROCESOS DE ZONA FLOTANTE Y RECOCIDO DIRECCIONAL EN ALEACIONES METÁLICAS A PARTIR DE UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA TEMPLE SUPERFICIAL

Juan Manuel Vallejos, Instituto de Física Rosario – CONICET-UNR; Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería-UNNE, juanmanuelvallejos@yahoo.com.ar

Martín Eduardo Leonard, Instituto de Física Rosario – CONICET-UNR, leonard@ifir-conicet.gov.ar

César Enrique Sobrero, Instituto de Física Rosario – CONICET-UNR, sobrero@ifir-conicet.gov.ar

Paulo La Roca, Centro Atómico Bariloche – CNEA-CONICET, paulonobl@gmail.com

Ana Velia Druker, Instituto de Física Rosario – CONICET-UNR; Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura-UNR, anadruker@yahoo.com.ar

Jorge Alberto Malarria, Instituto de Física Rosario – CONICET-UNR, malarria@ifir-conicet.gov.ar

Resumen— El método de zona flotante es utilizado en la industria para desarrollar y purificar materiales monocristalinos. Este proceso consiste en fundir una pequeña región de un alambre y desplazarlo hacia una zona de enfriamiento rápido de manera que desarrolle una solidificación direccional. Cuando el material no alcanza a fundirse, el fuerte gradiente térmico que se desplaza sobre la pieza favorece el crecimiento preferencial de granos, texturando la aleación. De esta forma se obtiene una morfología de granos columnares adecuada para ciertas aplicaciones. A pesar de su amplia aplicación en la fabricación de materiales semiconductores y cerámicos funcionales, el desarrollo de estas técnicas en aleaciones metálicas aún se realiza en condiciones de laboratorio y a pequeña escala. En el presente trabajo, se adaptó una bobina de espiras planas a una máquina de inducción para tratamientos de temple superficial a fin de lograr un calentamiento localizado en aleaciones metálicas. Además, se desarrolló un dispositivo electromecánico que permite el avance controlado de un alambre dentro de la espira. Se presentan los detalles del sistema y algunos resultados de estudios metalográficos obtenidos a partir de la recrystalización y el crecimiento de granos en un alambre de acero comercial de bajo carbono.

Palabras clave— zona flotante; solidificación direccional; recocido direccional; crecimiento de granos; diseño electromecánico.

1. Introducción

Las microestructuras de granos columnares en aleaciones metálicas, alargados en la dirección del esfuerzo aplicado, pueden mejorar las propiedades de creep, aumentar la resistencia a la

fatiga y proporcionar comportamiento de frenado de grietas [1-3]. Estas estructuras son obtenidas mediante procesos de solidificación o recristalización direccional. El segundo método tiene como ventaja la posibilidad de utilizar el material procesado en estado sólido, al contrario de la solidificación direccional, en donde esta se produce progresivamente dentro de piezas fundidas.

La solidificación direccional consiste en fundir una pequeña región del material mediante un calentamiento localizado y luego someterla a un enfriamiento rápido a través del desplazamiento de la muestra hacia una zona de menor temperatura. Cuando el material no alcanza a fundirse, el fuerte gradiente térmico que se desplaza sobre la pieza favorece el crecimiento preferencial de granos. De esta forma se consigue una recristalización direccional de la microestructura.

Los primeros estudios de la técnica de Recocido Direccional (RD) estuvieron orientados a la mejora de superaleaciones de base hierro para aplicaciones especiales [4-10]. Para lograr microestructuras de granos columnares en este tipo de aleaciones, es necesario una matriz de granos pequeños y equiaxiales [4-5]. Por otra parte, Zhang et al. [11] han desarrollado microestructuras de granos alargados de 23 mm de largo y con una relación de aspecto (cociente entre el largo y el ancho del grano) de 60 en hierro puro comercial sin energía de deformación acumulada en la matriz ni textura previa.

La evolución microestructural en la técnica de RD depende fuertemente de las condiciones previas del material (tamaño de granos, tipo de bordes de grano, texturas) y de algunos parámetros del proceso (velocidad de avance, gradiente térmico, ancho de la bobina) [11-15]. Para que se forme y propague una microestructura de granos columnares es fundamental que la velocidad de desplazamiento de la muestra sea menor o igual que la velocidad del movimiento de los bordes de granos [12].

A pesar de que estos procesos han sido ampliamente aplicados en la fabricación de materiales semiconductores y cerámicos funcionales [16], el desarrollo de estos procesos en aleaciones metálicas de interés comercial (aceros de medio carbono, aceros inoxidables, latones, entre otros) aún no se ha estudiado en detalle. Por otra parte, resulta atractiva la aplicación de estas técnicas en aleaciones que presentan comportamiento pseudoelástico, debido a que el tamaño de grano y las texturas influyen fuertemente en las propiedades de memoria de forma [17].

En el presente trabajo, se desarrolló una bobina de espiras planas para ser utilizada en una máquina de inducción para tratamientos de temple superficial, a fin de lograr un calentamiento localizado en aleaciones metálicas. Además, se desarrolló un sistema electromecánico para el avance controlado de un alambre dentro de esta bobina. Esto permitirá aplicar las técnicas de crecimiento de granos columnares, tanto en aleaciones comerciales como en aleaciones con memoria de forma de base hierro y cobre. Se presentan los detalles del sistema desarrollado y algunos resultados de estudios metalográficos obtenidos a partir de la recristalización y el crecimiento de granos en un alambre de acero comercial de bajo carbono.

2. Materiales y Métodos

2.1 Características de la máquina de inducción

La máquina para calentamiento de piezas por inducción utilizada se encuentra ubicada en la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario. Se trata de un equipo de alta frecuencia, el cual posee una fuente de corriente que combina válvulas de vacío y convertidores de frecuencia electrónicos

de estado sólido (diodos y tiristores). Las características nominales de la máquina se resumen a continuación:

- Potencia: 3 kW
- Frecuencia de calentamiento: 300 kHz
- Frecuencia de línea: 50 Hz
- Tensión de ánodo: 3,5kV
- Tensión de línea: 380 V
- Corriente de ánodo: 1 A

2.2 Cálculo y diseño de la bobina plana

Una bobina plana fue específicamente diseñada para generar un calentamiento localizado en los alambres. Para obtener el mayor rendimiento en máquinas de calentamiento por inducción es necesario que la impedancia de trabajo sea igual a la impedancia del circuito oscilante interno [18]. Este concepto fue utilizado en el desarrollo de la bobina plana. Esta se diseñó para que su inductancia sea aproximadamente igual a la de la bobina original del equipo. El inductor de la máquina tiene las características geométricas mostradas en la Figura 1. Mediante la Fórmula 1 [19] se estimó el valor de su inductancia (ver Figura 1 para las referencias de los parámetros de la ecuación).

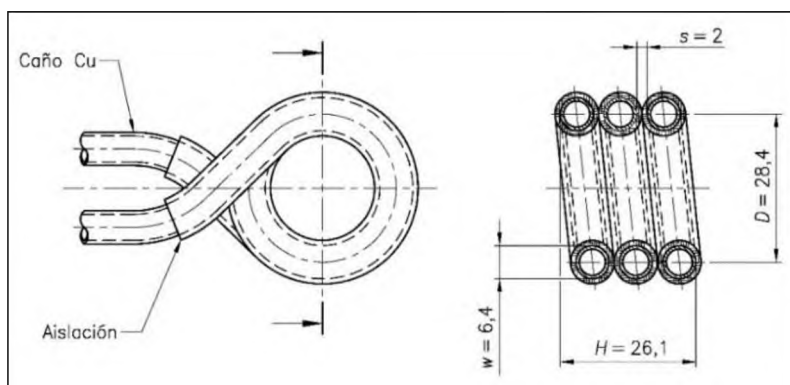


Figura 1. Dimensiones del inductor original de la máquina.

Fuente: elaboración propia

$$L = \frac{N^2 \times (D/2)^2}{9(D/2) + 10H} = 0,185 \mu\text{H} \quad (1)$$

N : número de espiras o vueltas del inductor

D : diámetro medio del inductor

El diseño empleado para la fabricación de la bobina para calentamiento localizado fue el del tipo espiralado plano o “panqueque”. En esta disposición, varias espiras son enrolladas en un mismo plano de manera tal de tener una zona de calentamiento equivalente a la de una sola

espira. Además, se redujo la sección de paso del inductor para disminuir la distancia entre la pieza y la espira. La bobina fue fabricada a partir de un caño de cobre comercial de 4,8mm (5/16”) de diámetro. Se adoptó 8mm como diámetro interno de la bobina, para que puedan ser calentados alambres de hasta 5mm aproximadamente, teniendo en cuenta que la aislación tiene un espesor de 1mm. Aplicando las Ecuaciones 2 y 3 [19] se obtuvieron los siguientes valores de inductancia para distintos números de espiras (ver Figura 2 para las referencias de los parámetros de las ecuaciones):

$$L = \frac{N^2 \times A^2}{30A - 11d} \quad (2)$$

$$A = \frac{d + N(w + s)}{2} \quad (3)$$

Tabla 1. Valores de inductancia de la bobina del tipo espiralada para distintos números de vueltas.

Número de espiras N	Inductancia de la bobina plana [μH]
2	0.103
3	0.257
4	0.508

Fuente: elaboración propia

De la Tabla 1 se puede observar que el número de vueltas para un valor de inductancia similar al original está entre 2 y 3. A pesar de que con un diseño con dos espiras se obtiene un valor más cercano, se decidió adoptar 3 vueltas para asegurar de que no haya problemas de sobrecalentamiento del inductor, ya que la sección del caño es menor y debido a ello se reduce el flujo de agua de refrigeración. Los planos y la bobina construida se muestran en la Figura 2.

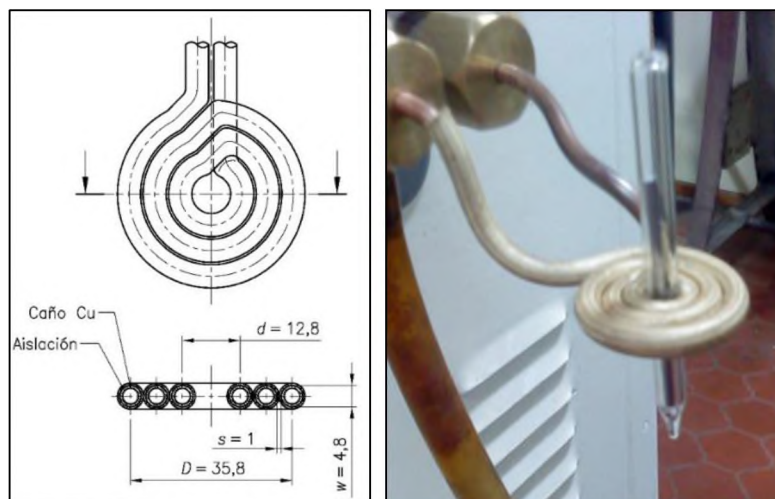


Figura 2. a) Dimensiones del inductor plano diseñado. b) Inductor plano acoplado a la máquina.

Fuente: elaboración propia

2.3 Desarrollo del sistema electromecánico para el avance controlado de un alambre dentro de la espira

Este dispositivo fue diseñado para trabajar en el rango de velocidades en el que se logra el crecimiento de granos columnares para hierro puro comercial [11]. El movimiento se obtiene a partir de un motor paso a paso de 48 pasos por vuelta controlado por una placa Arduino. Acoplado al motor, se dispuso un tren de engranajes de tres etapas de reducción (1:5, 1:5 y 1:8.33) con una reducción total de 1:208.33. Una varilla roscada de 9.52mm (3/8") fue acoplada al eje de salida para obtener el movimiento lineal del alambre. Esto se logra mediante un bastidor con una tuerca fijada en el medio de ella, que se desplaza por el empuje de la varilla. A fin de mantener la verticalidad del movimiento, se insertaron dos rodamientos lineales en los extremos del bastidor que se mueven sobre guías paralelas a la varilla roscada. El detalle del mecanismo construido se observa en la Figura 3. Este sistema permite trabajar en un rango de velocidades de 5 a 80 $\mu\text{m/s}$.

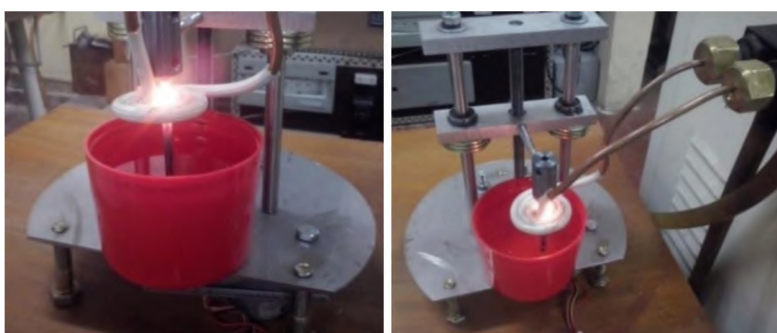


Figura 3. Proceso de RD de un alambre trefilado en frío de 4mm en el sistema desarrollado.
Fuente: elaboración propia

2.4 Materiales y métodos de ensayos

El montaje experimental en el inicio del ensayo de RD se muestra en la Figura 4. Se pueden identificar tres zonas distintas en el alambre al inicio del experimento:

1. Zona con microestructura original (ZO): zona sumergida en el agua al iniciar el experimento; se considera que mantiene su microestructura original.
2. Zona intermedia (ZI): zona situada entre la superficie del agua y justo por debajo de la bobina, cuya temperatura al inicio del ensayo es menor que la zona calentada dentro de la bobina.
3. Zona caliente (ZC): aquella que empieza el experimento dentro o sobre la espira y completa el ensayo en el agua de enfriamiento.

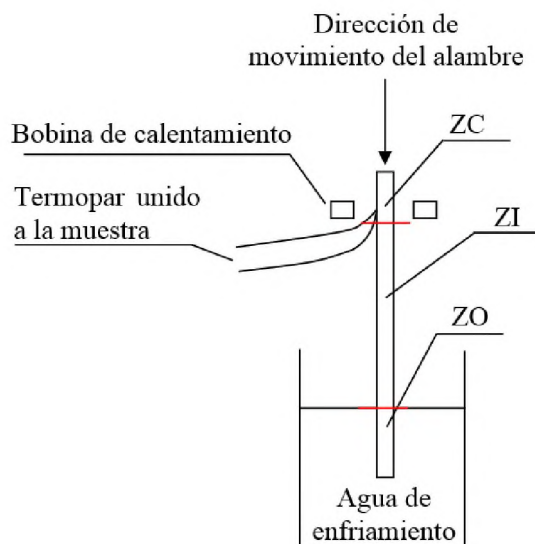


Figura 4. Montaje experimental en el inicio del ensayo de RD.
Fuente: elaboración propia

Se utilizó la bobina de calentamiento y el sistema de avance automático, ambos explicados en los apartados anteriores, y una cuba con agua a temperatura ambiente para desarrollar un gradiente térmico controlado en los alambres. La distancia entre la superficie del agua y la bobina de inducción fue ajustada para que este gradiente fuera de aproximadamente $200^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ en todas las muestras ensayadas.

Se recocieron direccionalmente tres tipos de alambres (barra de acero SAE 1005 trefilado en frío de 4mm de diámetro y alambres comerciales de bajo carbono de 2 y 1.4mm de diámetro) en las condiciones detalladas a continuación:

- Barra de acero SAE 1005 comercial trefilada en frío de 4mm de diámetro. Temperatura de la Zona Caliente (TZC): 1360°C . Velocidad de arrastre: $140\mu\text{m}/\text{seg}$.
- Barra de acero SAE 1005 comercial trefilada en frío de 4mm de diámetro. TZC: 1360°C . Velocidad de arrastre: $25\mu\text{m}/\text{seg}$.
- Alambre comercial de acero de bajo carbono de 2mm de diámetro. TZC: 880°C . Velocidad de arrastre: $15\mu\text{m}/\text{seg}$.
- Alambre comercial de acero de bajo carbono de 2mm de diámetro. TZC: 880°C . Velocidad de arrastre: $9.5\mu\text{m}/\text{seg}$.
- Alambre comercial de acero de bajo carbono de 1.4mm de diámetro. TZC: 750°C . Velocidad de arrastre: $9.5\mu\text{m}/\text{seg}$.

Se pueden observar algunos videos de tratamientos térmicos de RD utilizando el sistema desarrollado en los siguientes enlaces web:

- <https://www.youtube.com/watch?v=NoMSy6Js5l8>
- <https://www.youtube.com/watch?v=K7YZ2mz5Vts>

Los ensayos llevados a cabo a velocidades de $140\mu\text{m}/\text{seg}$ fueron realizados con una configuración del sistema previa a la versión final. En esta configuración, el dispositivo de avance controlado constaba solamente de dos etapas de reducción de velocidad.

Se midió la temperatura de las muestras mediante termocuplas tipo K soldadas a ellas. De esta forma, se trazó la curva de la TZC en función a los distintos diámetros de alambre. Esta reducción del tamaño de los alambres fue necesaria para cambiar la temperatura de las muestras ensayadas debido a que la máquina de inducción aún no cuenta con un dispositivo de regulación de potencia.

A fin de observar las microestructuras desarrolladas en el proceso de trefilado se le realizaron estudios metalográficos a los alambres procesados. Las muestras fueron pulidas mecánicamente y atacadas con una solución de 7% de ácido nítrico y 93% de alcohol etílico. Las imágenes fueron obtenidas con un microscopio óptico PME3 Inverted Metallurgical Olympus.

3. Resultados y Discusión

En la Figura 5 se muestra la relación entre la TZC y el diámetro del alambre. De la curva se observa que a medida que disminuye el diámetro del alambre, la TZC decrece rápidamente como consecuencia de la mayor distancia entre ésta y las espiras del inductor. Esto produce que aumente la dispersión del campo magnético generado por la bobina y las pérdidas de potencia de calentamiento.

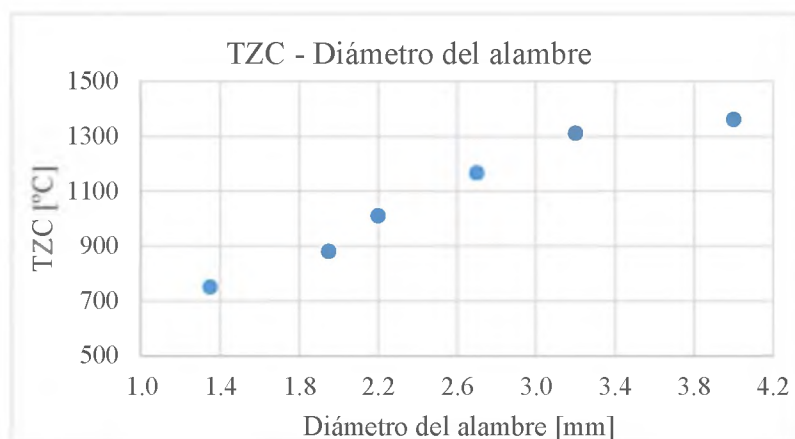


Figura 5. TZC en función del diámetro del alambre.
Fuente: elaboración propia

El gradiente de temperatura de un alambre de 1.4mm, con una distancia fija de 50mm entre el plano de la bobina y el agua de enfriamiento, se muestra en la Figura 6. Puede observarse que existe una primera zona cercana a la bobina de aproximadamente 10mm de largo en donde la temperatura permanece casi constante en la pieza, disminuyendo apenas 2.2°C/mm. Este alargamiento artificial del ancho de la bobina, producto del ensanchamiento de la ZC, favorece el crecimiento de granos durante el recocido direccional [12]. En las zonas de la pieza que se encuentran más alejadas de la bobina el gradiente de temperatura permanece casi constante, con un valor promedio de 16.4°C/mm.

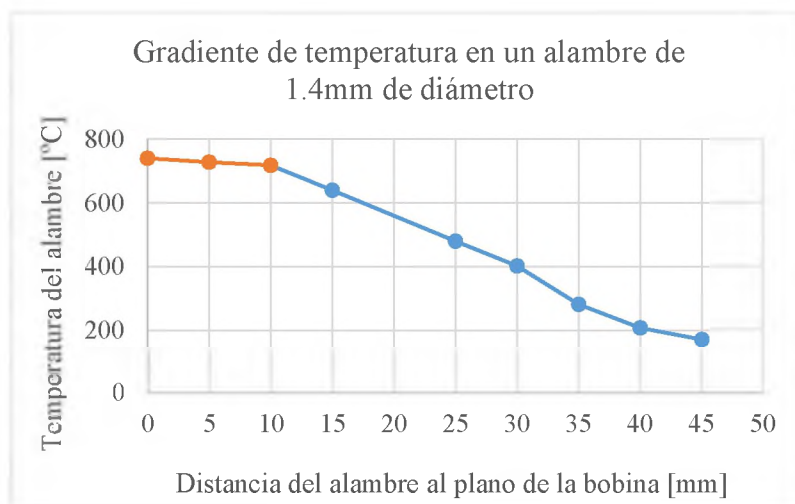


Figura 6. Gradiente de temperatura en un alambre de 1.4mm de diámetro.
Fuente: elaboración propia

Los estudios metalográficos realizados en alambres trefilados en frío de acero SAE 1005 de 4mm de diámetro y recocidos direccionalmente en el sistema desarrollado se muestran en las Figuras 7 y 8. En la Figura 7 se puede observar la microestructura original del alambre (Figura 7a), comparada con la de las zonas del alambre recocidas direccionalmente (Figura 7b). En ambos casos se observan granos chicos de ferrita con algunos granos de perlita. Sin embargo la microestructura original presenta granos aproximadamente equiaxiales, mientras que la microestructura desarrollada en el proceso de recocido muestra un alargamiento de los granos en la dirección del movimiento con una relación de aspecto de aproximadamente 3. Por otra parte, en la Figura 8 la microestructura del alambre se desarrolla de forma similar al caso anterior. Sin embargo, se observa una zona intermedia de granos muy pequeños entre la ZO y la de granos alargados (Figura 8b). El desarrollo de las microestructuras de granos alargados de baja relación de aspecto y tamaños pequeños mostradas en las Figuras 7 y 8 puede deberse a que la velocidad de movimiento de la ZC es mayor que la velocidad de movimiento de los bordes de grano del material [11,12]. Esto impide que se forme un frente de crecimiento de granos alargados en la dirección del movimiento. Además, la temperatura de la ZC del ensayo (1360°C) produce que el acero de bajo carbono se encuentre completamente en fase austenita (γ) en las zonas más cercanas a la bobina. Zheng et al. [15] demostraron que esta transformación de fase $\gamma \rightarrow \alpha$ inhibe el crecimiento direccional de granos.

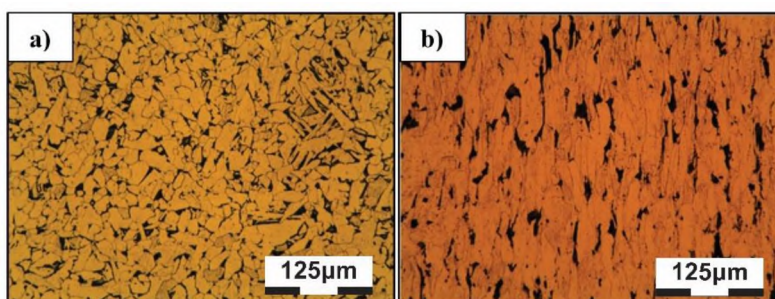


Figura 7. Microestructura desarrollada en el proceso de RD. Diámetro del alambre: 4mm; TZC: 1360°C; velocidad de arrastre: 140µm/seg. a) ZO; b) ZC.

Fuente: elaboración propia

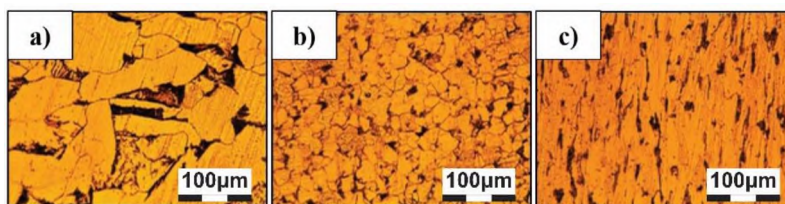


Figura 8. Microestructura desarrollada en el proceso de RD. Diámetro del alambre: 4mm; TZC: 1360°C; velocidad de arrastre: 25µm/seg. a) ZO; b) ZI; c) ZC.

Fuente: elaboración propia

Los estudios metalográficos realizados en alambres comerciales de acero de bajo carbono de 2mm de diámetro y recocidos direccionalmente se muestran en las Figuras 9 y 10, respectivamente. En la Figura 9 se observa el desarrollo microestructural de la muestra recocida a 15µm/seg. El alambre presenta una microestructura original monofásica de granos equiaxiales de ferrita (Figura 9a). La ZI muestra una microestructura de pequeños granos equiaxiales en el centro y granos equiaxiales de mayor tamaño en los extremos, aproximadamente cinco veces más grandes que los de la estructura original (Figura 9b). En cambio la zona que ha completado el proceso de recocido (ZC) presenta granos similares a los de la estructura original en el centro de la muestra y granos muy grandes en los extremos muy poco estirados en la dirección del movimiento del alambre (Figura 9c). En la muestra recocida a 9.5µm/seg (Figura 10) se observó un desarrollo microestructural similar al anterior, con la diferencia que los granos que han completado el proceso de RD presentan un crecimiento anormalmente grande y columnar en la dirección del movimiento del alambre. Este crecimiento de granos columnares logrado a la velocidad de 9.5µm/seg se corresponde con los resultados obtenidos por Zheng et al. [11], quienes determinaron que estas microestructuras se obtienen con velocidades menores a 15µm/seg para hierro puro. Por otra parte, la formación de una estructura de cristales grandes cerca de la superficie exterior del alambre y de cristales pequeños en el interior pudo haber sido inducido por el efecto pelicular (skin effect), característico de los tratamientos térmicos de inducción a alta frecuencia [18].

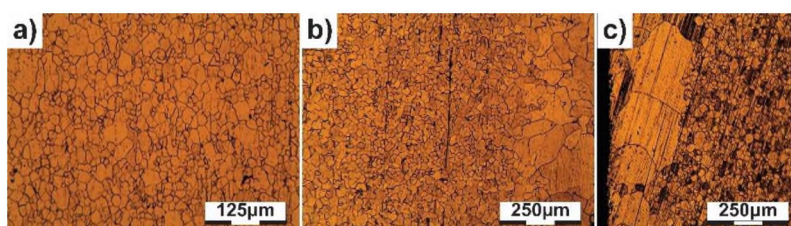


Figura 9. Microestructura desarrollada en el proceso de RD. Diámetro del alambre: 2mm; TZC: 880°C; velocidad de arrastre: 15µm/seg. a) ZO; b) ZI; c) ZC.

Fuente: elaboración propia

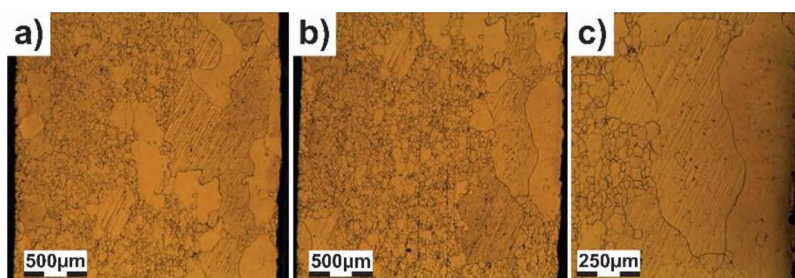


Figura 10. Microestructura desarrollada en el proceso de RD. Diámetro del alambre: 2mm; TZC: 880°C; velocidad de arrastre: 9.5µm/seg. a) ZI; b) y c) ZC.

Fuente: elaboración propia

En la Figura 11 se muestra una imagen metalográfica de un acero de bajo carbono de 1.4mm de diámetro recocido direccionalmente a 9.5µm/seg. En esta muestra se observó una microestructura del tipo bamboo con granos de crecimiento anormal, los cuales abarcan todo el espesor del alambre. Por otra parte, en medio de estos granos grandes se encontraron granos aislados muy pequeños, como se observa en la Figura 12. Zheng et al. [11,13,14] determinaron que estas pequeñas islas de cristales dentro de la estructura columnar se deben al bajo movimiento de borde de grano que presentan los bordes de bajo ángulo o del tipo borde de macla.

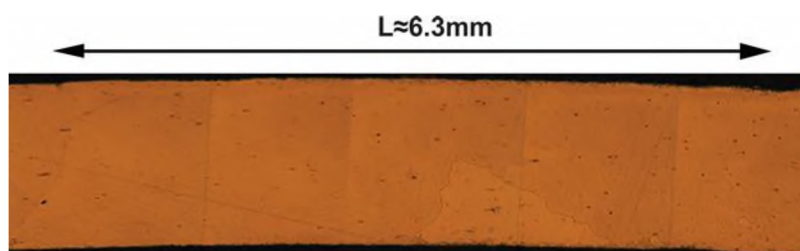


Figura 11. Microestructura de tipo bamboo desarrollada en el proceso de RD. Diámetro del alambre: 1.4mm; TZC: 750°C; velocidad de arrastre: 9.5µm/seg.

Fuente: elaboración propia



Figura 12. Islas de granos pequeños dentro de la microestructura tipo bamboo. Diámetro del alambre: 1.4mm; TZC: 750°C; velocidad de arrastre: 9.5µm/seg.

Fuente: elaboración propia

4. Conclusiones y recomendaciones

En el presente trabajo se presentó el desarrollo de un sistema para aplicar los procesos de zona flotante y recocido direccional en aleaciones metálicas. El sistema presenta las siguientes características:

- Potencia de la máquina de inducción: 3kW
- Frecuencia de calentamiento: 300kHz
- Rango de velocidades de avance: 5-80µm/s
- Ancho de zona caliente: 4,8mm.
- Diámetro interior de la bobina plana: 8mm

Se han llevado a cabo ensayos de RD en aceros de bajo carbono en diferentes condiciones. Se logró el crecimiento de microestructuras columnares en alambres de aceros de bajo carbono de 2mm de diámetro con matriz sin deformación moviéndose a 9.5µm/seg. Los granos de mayor tamaño desarrollaron longitudes de 1.5mm de largo con una relación de aspecto de 5. Además, se desarrollaron estructuras de tipo bamboo en aceros de bajo carbono de 1.4mm de diámetro con matriz sin deformación moviéndose a 9.5µm/seg. Los granos de mayor tamaño alcanzaron longitudes de 6.3mm.

En el futuro, se buscará regular la potencia de la máquina para tener un mayor control de la TZC de las muestras acoplando un variac trifásico en la entrada del transformador de la máquina de inducción. Además, se pretende adquirir un sistema de medición de temperatura por infrarrojos a fin de optimizar el proceso.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al personal de apoyo del Instituto de Física de Rosario, Hernán Rindizbacher, Daniel Castellani, Jeremías Castellani, Guido Baranello, Emiliano Bolner, Federico Mateo, Marcos Calova y Pablo Díaz por su colaboración en este trabajo.

5. Referencias

- [1] CAIRNS, R.L; CURWICK, R.L; BENJAMIN, J.S. (1975). Grain growth in dispersion strengthened superalloys by moving zone heat treatments. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v.6, n.1, p.179-188.
- [2] GODFREY, A.W; MARTIN, J.W. (1997). The effect of directional recrystallization on the low cycle fatigue response of a powder metallurgy nickel-based superalloy at elevated temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, v.222, n.2, p.91-100.
- [3] TEKIN, A; MUJAHID, M; MARTIN, J.W; SHAW, S.W.K.; MCCOLVIN, G.M; ELLIOTT L.C. (1992). The effect of process variables on the structure and properties of ODS, γ' - hardened nickel-base superalloys. In: ANTOLOVICH, S.D. (Ed.). *Superalloys*. Warrendale: The Minerals, Metals and Materials Society. p.457.
- [4] MARSH, J.M; MARTIN, J.W. (1991). Micromechanisms of texture development during zone annealing of MA 6000 extrusions. *Materials Science and Technology*, v.7, n.2, p.183-188.
- [5] HUMPHREYS, A.O; SHAW, S.W.K; MARTIN, J.W. (1995). Effect of process variables on the structure of directionally recrystallized MA-6000. *Materials Characterization*, v.34, n.1, p.9-13.

- [6] GREAVES, M.S; BATE, P.S; ROBERTS, W.T.; SHAW, S.W.K. (1996). Directional recrystallisation in nickel based high temperature alloy. *Materials Science and Technology*, v.12, n.9, p.730-734.
- [7] CHOU, T.S; BADHESHIA, H.K.D.H. (1994). Recrystallization temperatures in mechanically alloyed oxide-dispersion-strengthened MA956 and MA957 steels. *Materials Science and Engineering: A*, v.189, n.1-2, p.229-233.
- [8] BADHESHIA, H.K.D.H. (1997). Recrystallisation of practical mechanically alloyed iron-base and nickel-base superalloys. *Material Science and Engineering: A*, v.223, n.1-2, p.64-77.
- [9] HIRANO, T; MAWARI T; DEMURA, M.; ISODA, Y. (1997). Effect of directional growth-rate on the mechanical properties of Ni₃Al. *Material Science and Engineering: A*, v.239-240, p.324-329.
- [10] TSUJIMOTO, T; MATSUI T; SUZUKI, T.; TOMOTA, Y; SHIBUE, K; FURUYAMA, T. (2001). Evolution of high aspect ratio grains in a TiAl-based alloy by directional grain growth. *Intermetallics*, v.9, n.2, p.97-106.
- [11] ZHANG, Z.W; CHEN G; CHEN, G.L. (2007). Dynamics and mechanism of columnar grain growth of pure iron under directional annealing. *Acta Materialia*, v.55, n.17, p.5988-5998.
- [12] BADMOS, A.Y; FROST H.J; BAKER, I. (2002). Microstructural evolution during directional annealing. *Acta Materialia*, v.50, n.13, p.3347-3359.
- [13] ZHANG, Z.W; CHEN G; CHEN, G.L. (2006). Microstructural evolution of commercial pure iron during directional annealing. *Materials Science and Engineering: A*, v.422, n.1-2, p.241-251.
- [14] ZHANG, Z.W; CHEN G; CHEN, G.L. (2006). The effect of crystallographic texture on columnar grain growth in commercial pure iron during directional annealing. *Materials Science and Engineering: A*, v.435-436, p.573-578.
- [15] ZHANG, Z.W; CHEN G; CHEN, G.L. (2006). The effect of drawing velocity and phase transformation on the structure of directionally annealed iron. *Materials Science and Engineering: A*, v.434, n.1-2, p.58-62.
- [16] MÜHLBAUER, A. (2006). Innovative Induction Melting Technologies: A Historical Review. In: LABORATORY FOR MATHEMATICAL MODELLING OF ENVIRONMENTAL AND TECHNOLOGICAL PROCESSES (Ed.). *4th International Scientific Colloquium: Modelling for Material Processing*, Riga, p.13-20.
- [17] SOBRERO, C.E; LA ROCA, P; ROATTA, A; BOLMARO, R.E; MALARRÍA, J.A. (2012). Shape memory properties of highly textured Cu–Al–Ni–(Ti) alloys. *Material Science and Engineering: A*, v.536, p.207-215.
- [18] HASSELL, P.A; ROSS, N.V. (2011). Induction heat treating of steel. In: DAVIS, J.R. (Ed.) *ASM Handbook Volume 4: Heat Treating of Steel*. Youngstown: ASM International, p.164-206.
- [19] Tesla Coil Design, Theory and Construction. Recuperado el 20 de mayo de 2016, de http://deepfriedneon.com/tesla_frame0.html.