

***CARACTERIZACIÓN DE DEPÓSITOS OBTENIDOS CON
ELECTRODOS TUBULARES REVESTIDOS PARA EL RECARGUE
DE MEDIOS DE LABRANZA SOMETIDOS A DESGASTE
ABRASIVO EN EL SECTOR AZUCARERO***

***CHARACTERIZATION OF DEPOSITS OBTAINED WITH COATED TUBULAR
ELECTRODES FOR HARDFACING OF FARM MEANS SUBJECTED TO
ABRASIVE WEAR IN THE SUGAR SECTOR***

Alfonso Rafael Fernández Fuentes^{1}, Amado Cruz-Crespo¹, Rafael Ariza Gonçalves²,
Américo Scotti² y Nelson Guedes De Alcântara³*

¹ Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, UCLV, Carretera a Camajuaní km 5 ½ Cuba

² Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Brasil

³ Universidade Federal de São Carlo, UFSCar, Brasil

Recibido: Enero 7, 2014; Revisado: Marzo 15, 2014; Aceptado: Marzo 31, 2014

RESUMEN

Se presentan resultados de caracterización de la microestructura y la dureza de depósitos obtenidos mediante recargue por soldadura manual, empleando electrodos tubulares revestidos. Los electrodos contienen ferroaleación del tipo FeCrMn como carga de aleación en el alma tubular con dos rangos de granulometría (uno entre 0,1 y 0,25 mm y otro menor de 0,1 mm) y el revestimiento aplicado es de tipo básico. La intensidad de la corriente de soldadura (corriente continua con polaridad inversa) se varió entre 80 y 140 A con pasos de 20 A, manteniendo la tensión entre 26 y 28 V y la velocidad de soldadura de 10 cm/min. La microestructura se analizó con microscopía electrónica de barrido con microanálisis. La dureza fue determinada mediante el método Vickers. El tipo de microestructura fue hipoeutéctica en todas las condiciones experimentales, siendo ligeramente más fina y dispersa para la condición de soldadura con 80 A y ferroaleación con granulometría entre 0,1 y 0,25 mm, la cual mostró también la mayor dureza.

Palabras clave: electrodo tubular revestido, recargue duro, recargue duro, desgaste abrasivo.

Copyright © 2014. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Alfonso Rafael Fernández Fuentes, E-mail: rfernandez@uclv.edu.cu

ABSTRACT

Characterization results of microstructure and hardness of deposits are present; these were obtained by hardfacing by manual welding with coated tubular electrodes. The electrodes contain ferroalloy type FeCrMn as alloying charge in the rod core with two ranges of grain (one between 0,1 and 0,25 mm and other less than 0,1 mm) and the applied coating is the basic type. The welding current (direct current with inverse polarity) was set from 80 to 140 A, with 20 A steps, keeping the tension between 26 and 28 V and welding speed 10 cm/min. The microstructure was analyzed using Scanning Electron Microscopy with microanalysis. The hardness was determined by Vickers method. The type of microstructure was hypoeutectic in all experimental conditions, being slightly smaller and disperse at the condition of 80 A and ferroalloy with grains between 0,1 and 0,25 mm, which also showed greater hardness.

Key words: coated tubular electrode, hardfacing, abrasive wear.

1. INTRODUCCIÓN

Un grupo considerable de medios de labranza en el sector azucarero resulta severamente afectado por el desgaste abrasivo, durante la etapa de preparación de tierras, como resultado del continuo contacto con diferentes tipos de suelos. El desgaste abrasivo de los implementos de labranza puede provocar que estos pierdan la capacidad de trabajo; lo que incrementa los costos de producción.

Una alternativa, económicamente viable, para atenuar los efectos del desgaste abrasivo y reducir costos de producción es la recuperación por soldadura de las zonas desgastadas en los medios de labranza. Este tipo de recuperación por soldadura frecuentemente se realiza mediante el método SMAW con electrodos revestidos, aunque en la actualidad se trabaja en el desarrollo de otros consumibles de soldadura para estos fines, tal es el caso de los electrodos tubulares revestidos.

El revestimiento del electrodo, utilizado para recargue duro, juega un papel importante en el proceso SMAW, ya que es portador de los elementos de aleación que garantizan la resistencia al desgaste del depósito; mientras que el núcleo del electrodo es responsable de conducir la corriente eléctrica y depositar la masa metálica base. Además de los elementos de aleación, por el revestimiento se introducen también los componentes destinados a garantizar las propiedades tecnológicas de soldadura, en este caso están los elementos desoxidantes, los estabilizadores del arco y los formadores de escoria y gases, entre otros Rodríguez (1992). Por esta razón se requiere un alto valor del factor de revestimiento (espesor de revestimiento con relación al diámetro del núcleo) lo que trae consigo limitaciones operacionales tales como: dificultar la transferencia metálica y reducir la tasa de fusión del electrodo.

Las referidas limitaciones pueden ser controladas disminuyendo el factor de revestimiento, lo que se puede lograr mediante el empleo de un electrodo tubular revestido en lugar del electrodo macizo convencional; para lo cual se aplica un revestimiento exterior, más fino, que aporte exclusivamente los componentes reguladores del comportamiento tecnológico (estabilizadores del arco, formadores de

escoria y gases, entre otros), mientras que la adición de la carga que aporta los elementos de aleación se realiza por el interior del alma tubular.

Se ha demostrado que esta concepción de electrodos tubulares revestidos para recargue duro por SMAW puede garantizar altos niveles de aleación del depósito con un bajo factor de revestimiento Rodríguez (1992), (Cruz et al., 2006); además, desde el punto de vista operacional, se ha reportado que los electrodos tubulares revestidos presentan un comportamiento que favorece su empleo con bajas intensidades de corriente, por lo que comparados con los electrodos revestidos con alma maciza posibilitan alcanzar una menor dilución para la misma tasa de deposición (Cruz et al., 2008).

La posibilidad de emplear una menor corriente nominal con el uso de electrodo tubular revestido permite mejorar el desempeño del mismo en el relleno superficial por soldadura, donde resulta fundamental disminuir la dilución, sin que se pierda con ello la capacidad de producción. En este sentido, en la práctica industrial, se informa sobre la existencia de productos de tales características (electrodo tubular revestido STOODY-31) (Product Selection Guide); también, han sido publicados resultados del estudio del comportamiento operacional (parámetros de consumo, transferencia metálica y geometría de los depósitos) de electrodos tubulares revestidos para recargue duro por SMAW no comerciales, con énfasis en el efecto que sobre el depósito tienen la intensidad de la corriente de soldadura, combinado con la granulometría de la ferroaleación utilizada como carga de aleación y la composición del revestimiento (Cruz et al., 2010; Cruz et al., 2011).

Se plantea que la composición del revestimiento ejerce una importante influencia sobre la tasa de deposición para una misma corriente de soldadura, de manera que el ancho de los cordones puede ser influenciado por la cantidad de fluorita en el revestimiento, mientras que la cantidad de rutilo influye en la penetración (Cruz et al., 2010).

Por su parte, la granulometría de la carga de aleación influye sobre el rendimiento y la dilución; se ha demostrado que en el caso de electrodos tubulares revestidos, con carga de aleación tipo Fe-Cr-Mn, el incremento de la granulometría a valores entre 0,1 y 0,25 mm permite aumentar la tasa de deposición y disminuir la dilución (Cruz et al., 2011).

En los referidos trabajos (Cruz et al., 2010; Cruz et al., 2011), sin embargo, no fue verificada la influencia de las citadas variables de control sobre las características mecánico-metalúrgicas del depósito, a pesar de que son estas las que definen el comportamiento y por tanto la aplicación de los mismos. Este tipo de información tampoco se encuentra de manera sistemática en los documentos comerciales de los electrodos tubulares revestidos para recargue duro (Product Selection Guide).

Partiendo de estos antecedentes y considerando el interés teórico-práctico que puede existir por el asunto tratado, en el presente trabajo se evalúa el efecto que tienen la intensidad de la corriente de soldadura y la granulometría de la carga de aleación sobre la microestructura y la dureza de depósitos obtenidos con electrodos tubulares revestidos; lo que permitirá contar con información de valor tecnológico para el desarrollo de nuevos consumibles con aplicación en recargue duro.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La estrategia experimental aplicada se centra en la evaluación del comportamiento mecánico-metalúrgico (microestructura y dureza) de depósitos para recargue duro (obtenidos con electrodos tubulares revestidos no comerciales, a los que anteriormente se les evaluó el comportamiento operacional (Cruz et al., 2007)) en función de la intensidad de la corriente de soldadura y de la granulometría de la ferroaleación introducida como carga de aleación en el interior del electrodo tubular revestido; se aplica un diseño experimental totalmente al azar, empleando el paquete estadístico SPSS-18 para el análisis de los resultados.

El diámetro de los electrodos (valor nominal, referente al diámetro externo del alma tubular metálica) fue de 4 mm y la longitud de 430 mm. El alambre tubular, con la carga de aleación en su interior, fue revestido mediante inmersión con factor de revestimiento de 1,5, manteniendo invariable la composición del revestimiento básico, compuesto de: Caliza (CaCO_3), Fluorita (CaF_2), Rutilo (TiO_2) y grafito, aglutinados con silicato de sodio.

La granulometría de la ferroaleación (tipo FeCrMn: Cr-42 %, Mn-24 %, Fe-18 %, C-5 %, Si-5 %), introducida como carga de aleación en el interior del electrodo tubular revestido denominado ETR-1, se mantuvo entre 0,1 y 0,25 mm, mientras que para el electrodo tubular revestido, denominado ETR-2, fue menor que 0,1 mm.

Los depósitos fueron obtenidos sobre planchas de acero AISI 1020 con espesor de 9 mm, aplicando 4 niveles de intensidad de la corriente de soldadura (CC+) - 80, 100, 120 y 140 A, respectivamente - con tensión regulada de manera que el arco fuera corto, manteniendo la velocidad de soldadura constante (10 cm/min); estas condiciones fueron logradas empleado un dispositivo simulador de soldadura manual que permite mantener la tensión y la velocidad predefinidas (Cruz et al., 2008).

Una vez obtenidos los depósitos, para el análisis microestructural y la medición de la dureza, se procedió a cortar muestras en dirección transversal a los cordones. La preparación de las muestras para la evaluación de la microestructura, consistió en desbaste, seguido de pulido con pasta de diamante de 3 y 1 μm y ataque con NITAL 2 % (ASTM E3-01).

La observación de la microestructura, la determinación de su composición química mediante EDS y la adquisición de las imágenes se realizaron en un microscopio electrónico de barrido LEICA - Stereoscan - 440; para el procesamiento de imagen y el análisis cuantitativo de la microestructura se aplicó el software Image J (Image J1.44, 2012).

La dureza fue medida por el método Vickers con durómetro HECKERT-VEB/JENA modelo HPO 250, aplicando una carga de 1 kgf durante 15 s, según la norma ASTM E92-82 (ASTM E92-82).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se observa en las figuras 1 y 2, para los diferentes niveles de la intensidad de la corriente de soldadura y de la granulometría empleados, la microestructura es del mismo tipo y está formada por dendritas con eutéctica interdendrítica; dicha microestructura, según la literatura, puede ser catalogada como hipoeutéctica (Bálsamo

et al., 1995). A pesar de que en todos los casos se aprecia una similitud en cuanto al tipo de microestructura, se distinguen algunas diferencias en relación al tamaño y la proporción de los micro-constituyentes presentes.

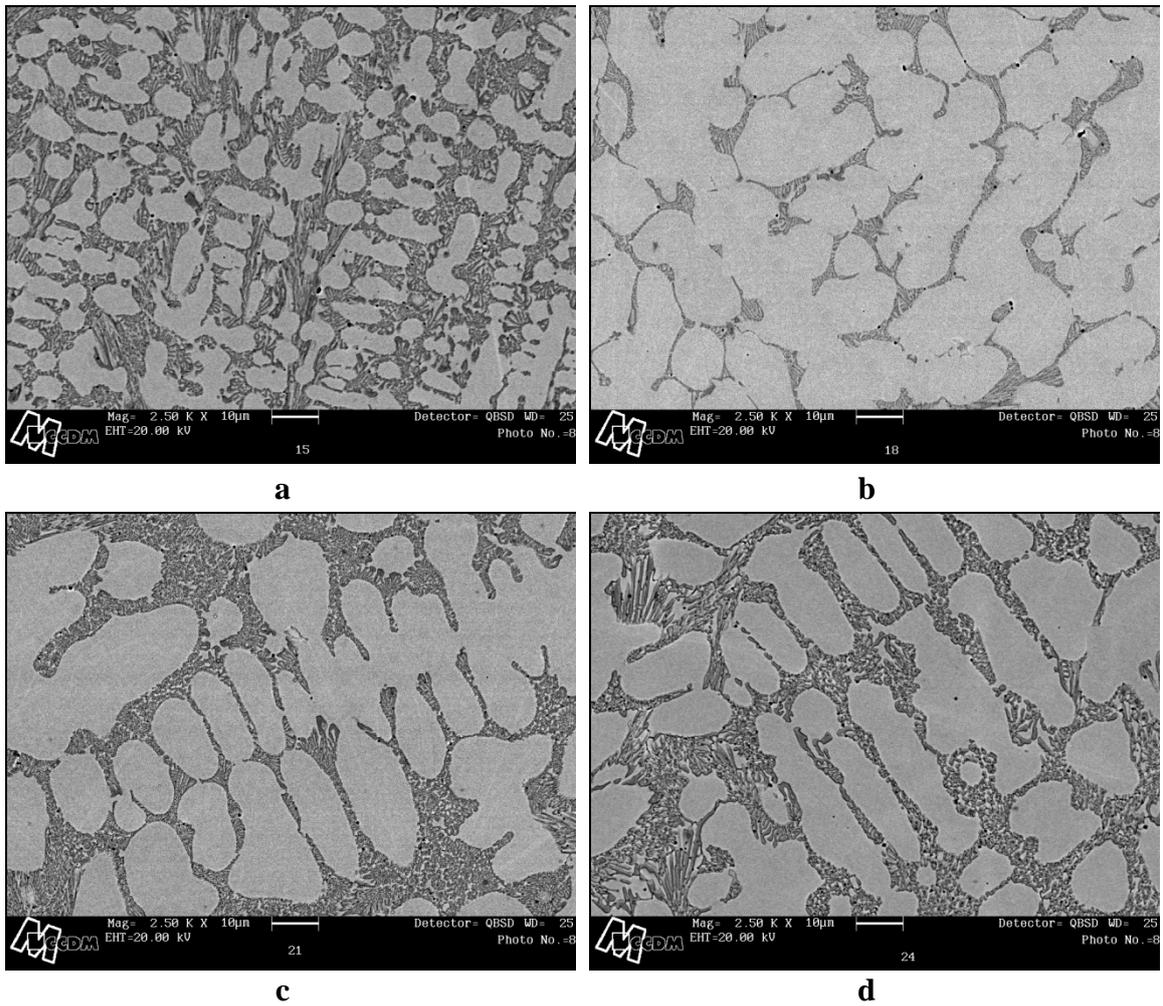
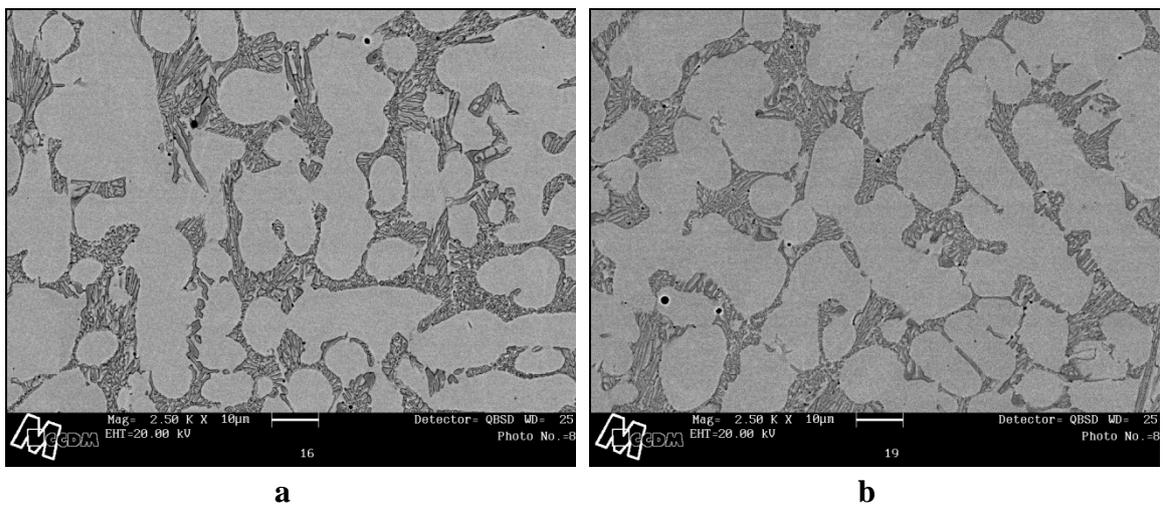


Figura 1. Microestructura de los depósitos obtenidos con el electrodo ETR-1 (granulometría 0,1-0,25 mm), con corriente de soldadura de 80, 100, 120 y 140 (a, b, c y d respectivamente)



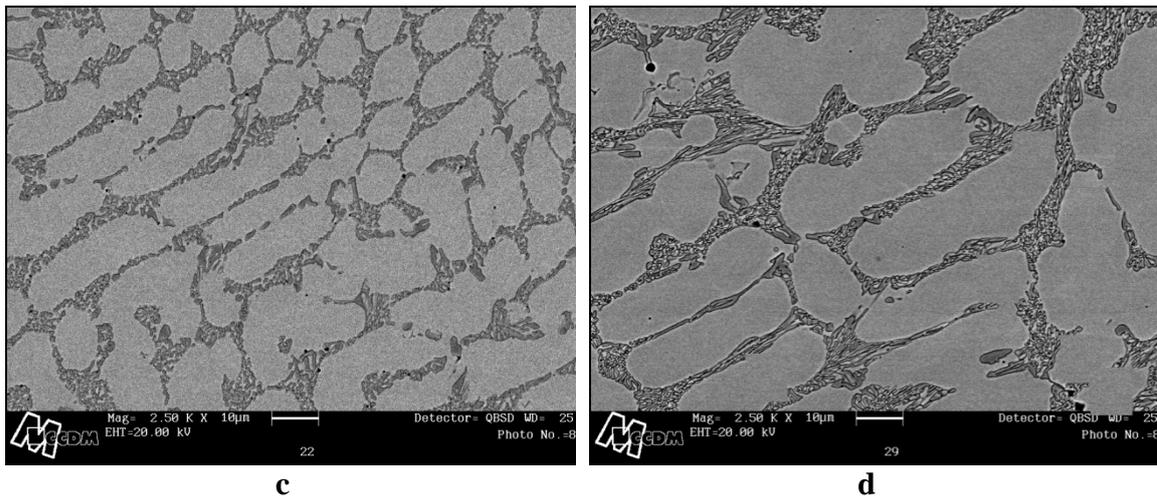


Figura 2. Microestructura de los depósitos obtenidos con el electrodo ETR-2 (granulometría menor que 0,1 mm), con corriente de soldadura de 80, 100, 120 y 140 (a, b, c y d respectivamente)

Desde el punto de vista del tamaño de los micro-constituyentes, la diferencia se acentúa para el caso del electrodo ETR-1 (con intensidad de la corriente de soldadura de 80A), que provoca un refinamiento microestructural apreciable, en comparación con el resto de las condiciones experimentales (figura 1a).

Con relación a la proporción de los micro-constituyentes, la cuantificación de la eutéctica interdendrítica (figura 3) corrobora las diferencias apreciadas en la microestructura; mientras que el análisis de varianza indica que sobre esta variable existe un efecto significativo de la intensidad de la corriente de soldadura y su interacción con la granulometría ($p < 0,001$ con η^2 igual a 0,89 y 0,73 respectivamente).

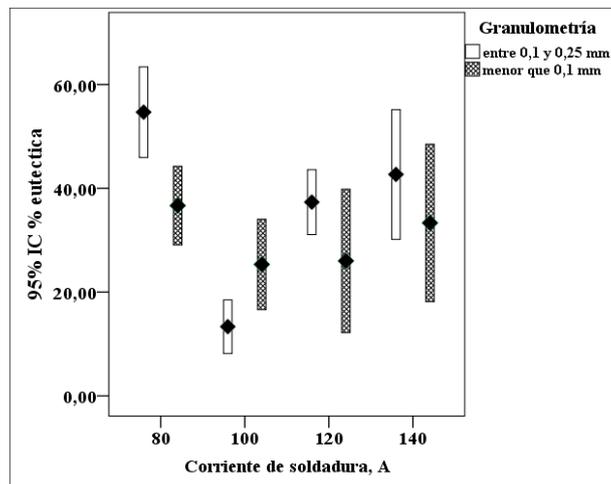


Figura 3. Variación de la cantidad porcentual de eutéctica para los diferentes niveles de intensidad de la corriente de soldadura (80, 100, 120 y 140 A) y granulometría (entre 0.1-0.25 mm y menor que 0,1 mm), expresada por el intervalo de confianza de la media para un 95 % de significación estadística

Se plantea que las modificaciones microestructurales que ocurren durante la solidificación de depósitos de soldadura, provienen de las variaciones de la composición química y de la velocidad de solidificación; en el primer caso implican cambios de fase

y cantidad de región interdendrítica, mientras que en el segundo implican refinamiento microestructural, Kuo (2002) y (Danielle et al., 2011). Por tanto, la composición química y las condiciones de enfriamiento son los aspectos fundamentales a tener en consideración para explicar las diferencias microestructurales observadas en las figuras 1 y 2.

En este sentido, con el análisis de varianza se verifica que la composición química de la eutéctica interdendrítica (figura 4) no muestra diferencias estadísticamente significativas bajo el efecto de la corriente de soldadura y de la granulometría ($p > 0,01$), confirmando la formación en todos los depósitos de una eutéctica interdendrítica compuesta por 2,4% de Si, 23,9% de Cr y 8,9% de Mn, como elementos de aleación fundamentales.

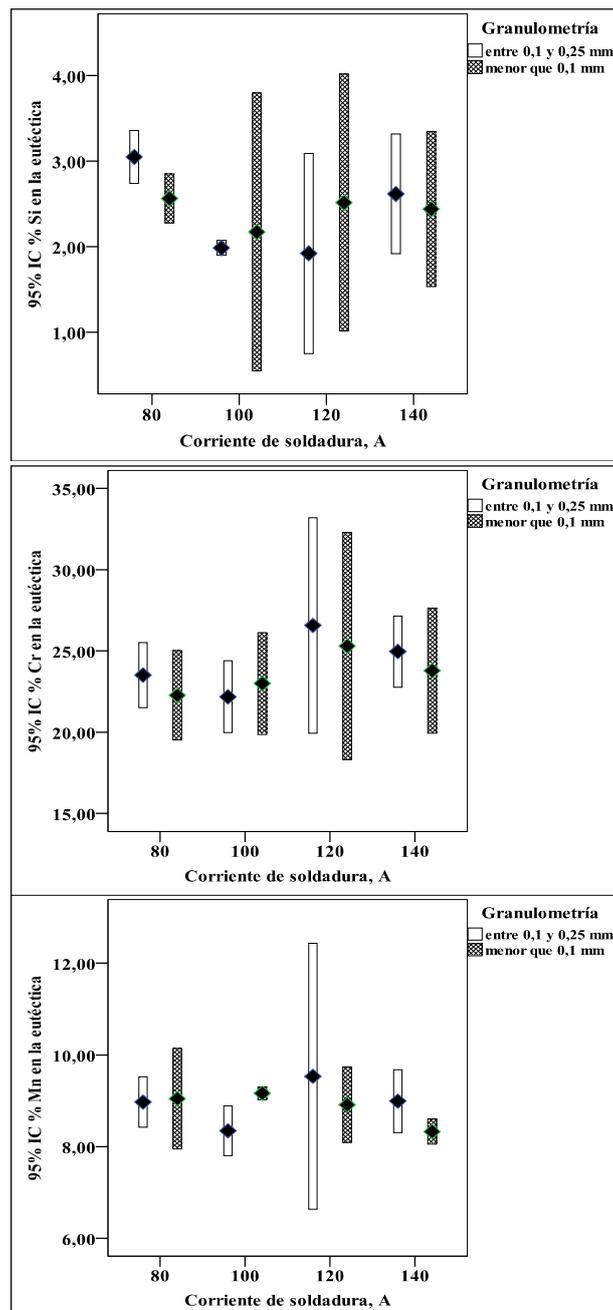


Figura 4. Variación de la cantidad de Si, Cr y Mn en la eutéctica, para los diferentes niveles de intensidad de la corriente de soldadura y granulometría, expresada por el intervalo de confianza de la media para un 95 % de significación estadística

Para el caso de las dendritas, por el contrario, sí se evidencia un efecto estadísticamente significativo ($p < 0,001$ y $\eta^2 \geq 0,77$) de la corriente de soldadura y de su interacción con la granulometría sobre la composición química (figura 5).

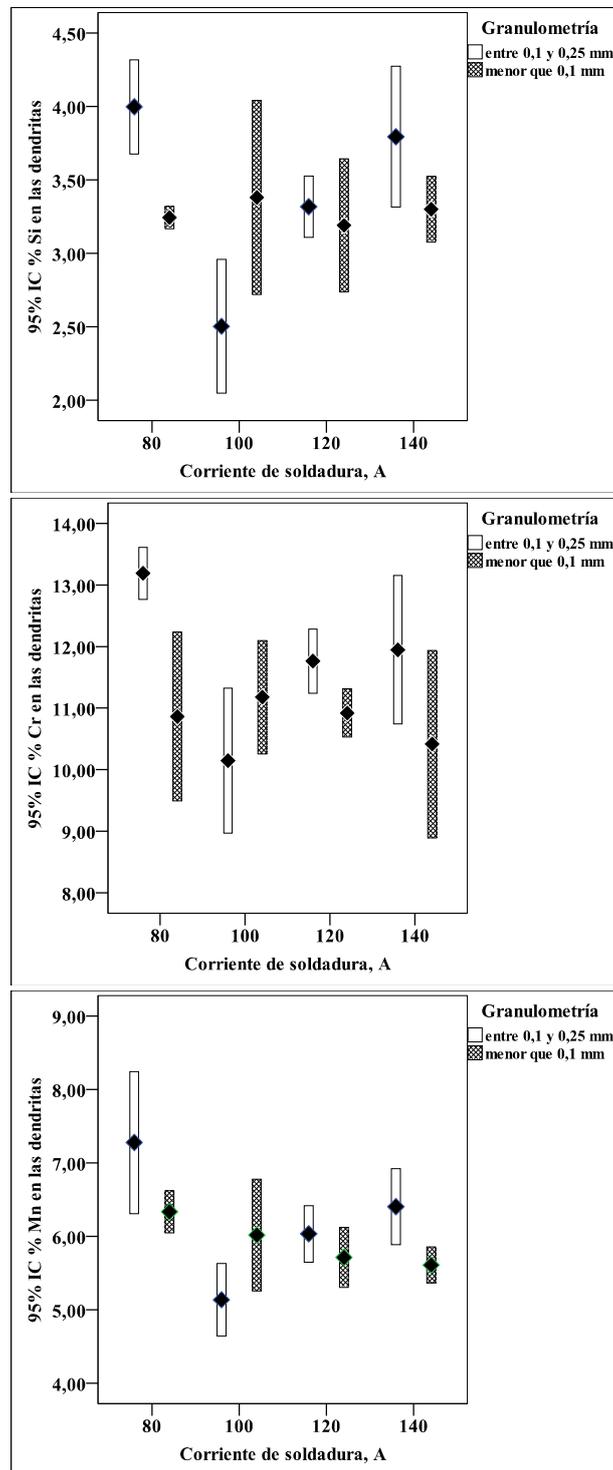


Figura 5. Variación de la cantidad porcentual de Si, Cr y Mn en las dendritas para los diferentes niveles de intensidad de la corriente de soldadura y granulometría, expresada por el intervalo de confianza de la media para un 95 % de significación estadística

De acuerdo con los resultados descritos anteriormente, que muestran que la composición química de la eutéctica es similar en todas las condiciones, mientras que la composición química de las dendritas primarias y la proporción de micro-constituyentes es diferente, permite establecer que sobre la microestructura existe una influencia predominante de la composición química de la aleación, con efecto no significativo de las condiciones de enfriamiento. De esta manera se puede plantear que la corriente de soldadura y su interacción con la granulometría tienen una influencia significativa sobre la microestructura de los depósitos obtenidos.

Los resultados de la variación de la dureza en función de la intensidad de la corriente de soldadura para ambos electrodos se muestran en la figura 6. En correspondencia con el efecto de refinamiento microestructural y el incremento en constituyente eutéctico observado para el electrodo ETR-1 con corriente de soldadura de 80 A (figuras 1a y 3, respectivamente), se tiene el mayor valor de dureza (527 HV), observándose una considerable caída de dureza para la corriente de soldadura de 100 A (384 HV), seguida de un ligero incremento paulatino de la misma para corrientes de soldadura de 120 y 140 A (425 y 468 HV). Para el electrodo ETR-2 (granulometría menor que 0,1 mm) se aprecia un ligero incremento de la dureza al pasar de los menores valores de la intensidad de la corriente de soldadura (80 – 100 A) a valores mayores (120 - 140 A). Como se aprecia del análisis detallado de las figuras 3 y 6, el comportamiento del porcentaje de eutéctica en la microestructura y de la dureza en función de la corriente de soldadura muestran tendencias relativamente similares. Por tanto, es un hecho evidente que la presencia de la eutéctica juega un papel gobernante sobre la dureza y consecuentemente, tal como se plantea en la literatura (Buchanan et al., 2007), sobre el desempeño al desgaste para depósitos de este tipo de aleación.

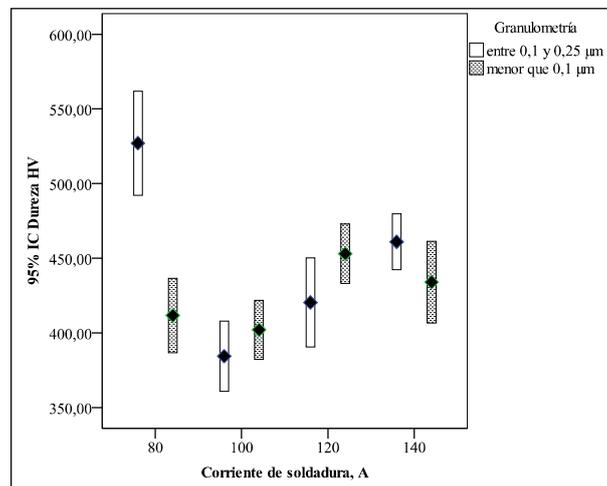


Figura 6. Variación de la dureza con la intensidad de la corriente de soldadura, para los electrodos ETR-1 y ETR-2

Toda vez que la condición de servicio fundamental a que se destinan los depósitos de los electrodos estudiados es al recargue para enfrentar el desgaste abrasivo, la condición mejor, dentro de las estudiadas, corresponde al electrodo con carga de aleación de granulometría entre 0,1 y 0,25 mm con una corriente de soldadura de 80 A, ya que

propicia mayor cantidad de eutéctica y mayor valor de dureza, parámetros que influyen favorablemente sobre la resistencia al desgaste abrasivo (Buchanan et al., 2007).

4. CONCLUSIONES

En depósitos obtenidos mediante soldadura SMAW con electrodos tubulares revestidos que contienen ferroaleación del tipo FeCrMn como carga aleante con dos rangos de granulometría (uno entre 0,1 y 0,25 mm y otro menor de 0,1mm), las variaciones de la intensidad de la corriente de soldadura, en los niveles de 80, 100, 120 y 140 A, manteniendo la tensión entre 26 y 28 V con velocidad de soldadura de 10 cm/min, no conducen a cambios significativos en el tipo de microestructura; la cual es fundición blanca aleada de tipo hipoeutéctica, siendo más fina y dispersa con dureza notablemente incrementada para la condición de soldadura con corriente de 80 A y carga de aleación de granulometría entre 0,1 y 0,25 mm, que se considera la mejor condición dentro de las estudiadas para enfrentar el desgaste.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a LAPROSOLDA-UFU, CCDM-UFSCar, así como a CAPES de Brasil y al MES de Cuba por el apoyo brindado en el marco del convenio CAPES/MES.

REFERENCIAS

- ASTM E3-01, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, USA
- ASTM E92-82, Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials, ASTM International, USA.
- Bálsamo, P., Scotti, A., Mello, J., Interpretación de la Microestructura de Recarques Duros Depositados por Soldadura Utilizando la Superficie de Líquidus de Diagramas Fe-Cr-C., *Revista de Soldadura*, Vol. 25. No. 4, 1995, pp. 199-207.
- Buchanan, V., Shipway, P., McCartney, D., Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacing used in the sugarcane industry., *Wear*, No. 263, 2007, pp. 99-110.
- Cruz, A., Perdomo, L., Rodríguez, M., Fernández, A., Ortiz, T., Obtención de un fundente aglomerado aleado y un electrodo tubular revestido con el empleo de FeCrMn y escoria de la reducción carbotérmica de minerales, En: *Congresso Brasileiro de Soldagem*, ABS, Belo Horizonte, Brazil, 2006.
- Cruz, A., Scotti, A., Rodríguez, M., Estudio comparativo de los parámetros de consumo y geometría de los depósitos de electrodos tubulares revestidos para recargue., En: *8vo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, CIBIM, Lima, Perú, 2007.
- Cruz, A., Scotti, A., Rodríguez, M., Operacional behaviour assesment of coated tubular electrodes for SMAW hardfacing., *Journal of Materials Processing Technology*, No. 199, 2008, pp. 265-273.
- Cruz, A., Fernández, A., Scotti, A., The influence of calcite, fluorite and rutile on the fusion-related behaviour of metal cored coated electrodes for hardfacing., *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 5, july, 2010, pp. 685-692;
- Cruz, A., Fernández, A., Scotti, A., Efecto sobre la dilución de la granulometría de la ferroaleación en el alma de electrodos tubulares revestidos bajo la influencia de la composición del revestimiento., *Soldagem e Inspeção*, Vol. 16, No. 1, 2011, pp. 79-85.

- Danielle, B., Sueli, F., Sofia, A., Evaluation of Deposition Current and Powders Grain Size During PTA Welding., *Soldagem e Inspeção*, Vol. 16, No. 1, 2011, pp. 53-61.
- Image J1.44. User Guide. En sitio web: <http://imagej.nih.gov/ij/docs/user-guide.pdf>; consultado agosto 2012.
- Kuo, S., *Welding metallurgy*. Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2002, 461.
- Product Selection Guide: Build-Up and Hardfacing Electrodes and Wires. Form No 2102A (1/03). STOODY Company, USA, 200, 40.
- Rodríguez, M., Electrodo tubular revestido para el relleno superficial de centralizadores, estabilizadores y piezas sometidas a condiciones de desgaste similares, Tesis en opción al grado científico de doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 1992.