

**CARACTERIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE UN ELECTRODO  
TUBULAR DEL SISTEMA Fe-Cr-Mn-Si-C DESTINADO AL  
RECARGUE DE PIEZAS SOMETIDAS A DESGASTE ABRASIVO**

**CHARACTERIZATION OF DEPOSITS OF A TUBULAR ELECTRODE OF Fe-Cr-  
Mn-Si-C SYSTEM USED FOR SURFACING WORK PIECES UNDER ABRASIVE  
WEAR CONDITIONS**

*Tamara Ortiz Méndez<sup>1\*</sup>, Amado Cruz Crespo<sup>1</sup> y Manuel Rodríguez Pérez<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Febrero 7, 2017; Revisado: Febrero 27, 2017; Aceptado: Abril 10, 2017

**RESUMEN**

En el trabajo se realiza la caracterización química y metalográfica del depósito sin dilución obtenidos con un electrodo tubular experimental (CIS 3) desarrollado para el recargue mediante soldadura manual con electrodo revestido (SMAW) de superficies sometidas a desgaste abrasivo, el cual utiliza una ferroaleación conjunta del sistema Fe-Cr-Mn-Si-C resultado del procesamiento piro-metalúrgico de minerales de cromita y pirolusita cubanos. El depósito se obtuvo según lo estipulado en la especificación AWS A5.13 para los electrodos de recargue SMAW. Como técnicas de caracterización se empleó microscopía óptica y electrónica, microanálisis de fases, estudios de dureza volumétrica y microdureza, así como análisis de composición química mediante espectroscopía de emisión atómica. Como resultado se determinó que el material del depósito sin dilución pertenece al sistema de las fundiciones blancas aleadas al Cr, Mn, Si, con una microestructura hipereutéctica. Esto lleva a plantear que este consumible bajo estudio se muestra con características favorables en cuanto a su aplicación como consumible de recargue de piezas sometidas a desgaste abrasivo como mecanismo principal de deterioro.

**Palabras clave:** soldadura, recargue duro, fundiciones blancas, electrodo tubular

Copyright © 2017. 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: Tamara Ortiz, Email: [tortiz@uclv.cu](mailto:tortiz@uclv.cu)

## **ABSTRACT**

In this work the chemical and metallographic characterization of the deposit without dilution obtained with an experimental tubular electrode (CIS 3), developed for hardfacing through manual welding with a coated electrode (SMAW) of surfaces under abrasive wear conditions, using a combined Fe-Cr-Mn-Si-C ferroalloy resulting from pyro-metallurgical processing of Cuban chromite and pyrolite minerals, is carried out. The deposit was obtained as specified in the AWS A5.13 standard, for hardfacing SMAW electrodes. As characterization techniques: optical and electron microscopy, phase microanalysis, volumetric hardness and micro hardness studies were used, as well as chemical composition analysis using atomic emission spectroscopy. As a result it was determined that the material of the deposit without dilution belongs to the white irons system, alloyed with Cr, Mn and Si. This material presents a hypereutectic microstructure. These results show the CIS 3 tubular electrode with favorable characteristics in terms of its application as a hardfacing consumable of pieces subjected to abrasive wear conditions as main mechanism of damage.

**Key words:** welding, hardfacing, white iron, tubular electrode

## **1. INTRODUCCIÓN**

Plantean (Ghasemi y Mehranfar, 2012) que del volumen de consumibles para recargue mediante soldadura, los que depositan materiales comprendidos en el sistema de las fundiciones blancas aleadas con Cr representan aproximadamente un 80 % del total, teniendo particular aplicación en las industrias minera, de la construcción, azucarera y de transporte, en piezas que requieren resistencia a la abrasión asociada a determinado nivel de tenacidad. La composición química de estas aleaciones se mueve en los rangos de 1,8 a 3,6 % de C y 11,0 a 30,0 % de Cr, acompañado generalmente de otros elementos de aleación entre los que se encuentran el Mn, el Si y el Mo. La microestructura de estos materiales se compone fundamentalmente de carburos primarios y/o carburos eutécticos en una matriz austenítica, martensítica, ferrítica, perlítica o bainítica (en dependencia de los elementos de aleación, sus contenidos y los ciclos térmicos a que se someta el material).

La excelente resistencia a la abrasión de las fundiciones blancas aleadas (entre 20 y 25 veces mayor que la de los aceros de bajo carbono) ha sido ampliamente documentada por un extenso número de investigadores, entre los que se encuentran (Zhi et al., 2014) y (Chung et al., 2013), los cuales apoyan su utilización cuando mecanismo de desgaste principal es el abrasivo y es necesario un bajo costo del procedimiento de recargue, a lo que se añadela efectividad de estas aleaciones en ambientes agresivos, donde se requiere resistencia a la corrosión del material.

El desarrollo de consumibles de alta aleación para el recargue de superficies sometidas a condiciones de desgaste ha sido un objetivo de trabajo por varias décadas en el Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS) adjunto a la Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, como resultado de lo cual se han desarrollado diferentes prototipos de electrodos tubulares de alta aleación, priorizándose en su composición el uso de materias primas y residuales cubanos. Tal es

el caso de los consumibles desarrollados en trabajos de Rodríguez (1992) y (Morales et al., 2006), entre otros, donde se demostraron sus características favorables para aplicaciones de recargue, tanto desde el punto de vista operacional como de las propiedades del depósito.

Paralelo a estos trabajos se han investigado y obtenido en el CIS varios tipos de ferroaleaciones, a partir del procesamiento de minerales y residuales industriales cubanos. Tal es el caso de la ferroaleación conjunta Cr-Mn-Si, obtenida en un proyecto vinculado con la Universidad Federal de Uberlandia, Brasil (Scotti et al., 2008), a partir del procesamiento piro metalúrgico de cromita y pirolusita cubanas, obteniéndose una ferroaleación con composición química de 41,54 % de Cr; 23,83 % de Mn; 18,32 % de Fe; 5,10 % de Si; 5,02 % de C; 0,02 % de P y 0,002 % de S. Este nuevo material ha sido utilizado por (Ortiz et al., 2015) como carga de aleación de un electrodo tubular nombrado CIS 3, de 4 mm de diámetro, con revestimiento básico, destinado al recargue de piezas sometidas a desgaste abrasivo. En el presente trabajo se persigue realizar la caracterización del depósito de dicho consumible, según la composición química y estructura metalográfica, con vistas a su evaluación como material de aporte para recargue.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Los depósitos de estudio fueron realizados con 80 A de corriente directa polaridad inversa, mediante un rectificador trifásico marca ESAB, modelo LHG 425 y por medio de un sistema automatizado, desarrollado por (Souza et al., 1995), que mantiene invariable la velocidad de avance (10 cm/min) y la longitud de arco. Las muestras para el análisis de composición química y estructura metalográfica del depósito sin dilución fueron elaboradas cumpliendo lo establecido por la norma AWS A5.13-2000. La caracterización química del depósito se efectuó mediante espectroscopía de emisión atómica, empleando un equipo marca "Spectrocast. A los depósitos de estudio se les realizó cortes transversales para posteriormente desbastarlos, pulirlos y atacarlos (reactivo Murakami), en correspondencia con las normas ASTM E3 – 11 (2011) y ASTM E407 (2015), lo cual permitió visualizar los microconstituyentes y las fases obtenidas en el depósito, con el uso de un microscopio óptico "NEOPHOT 132" y de un microscopio electrónico de barrido del modelo "FE-SEM, 200 Quanta FEI", con un espectrógrafo de energía dispersiva incorporado para el microanálisis de los constituyentes de la estructura. Las áreas estudiadas se ubican en la zona superior del depósito. La macrodureza fue medida con equipo "H-100 Rockwell", realizándose 9 mediciones, para calcular la media y la desviación estándar.

Los estudios de microdureza de los constituyentes y las fases se realizaron empleando un equipo marca "SHIMATSU" y mediantelas especificaciones ASTM E92 (2010) y NC 04-11(1972). Se realizaron 15 mediciones de microdureza en cada tipo de microconstituyente, usando como referencia los trabajos de (Chung et al., 2013), con 50 gf de carga, durante 15 s.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Composición química del depósito sin dilución obtenida con el electrodo tubular experimental CIS 3

A partir del análisis de los resultados de composición química del depósito sin dilución (tabla 1) y tomando como base lo establecido por (Ghasemi y Mehranfar, 2012) es posible afirmar que el material depositado pertenece al sistema metalúrgico de las fundiciones blancas aleadas.

**Tabla 1.** Composición química media del depósito del electrodo tubular CIS 3

<i>Elementos de aleación</i>	C	Cr	Mn	Si	P	S
<i>Contenido (en % de masa)</i>	3,27	12,34	4,09	2,78	0,018	0,009

En función de predecir el tipo de estructura metalográfica del material se utiliza el criterio del carbono equivalente (CE), calculado mediante una expresión analítica desarrollada por (Bazhenov y Pikunov, 2011), la cual se muestra a continuación:

$$CE (wt\%) = \%C + 0,3(\%Si) + 0,33(\%P) - 0,015(\%Mn) + 0,26(\%S) \quad (1)$$

El CE de manera analítica es de 4,05 %. Dicho valor es inferior a 4,3 %, punto este que, según (Morsy y El-Kashif, 2014), marca la composición de la mezcla eutéctica para este sistema de aleación. Dado lo anterior debe entonces esperarse que este depósito presente una estructura hipoeutéctica.

#### 3.2. Microestructura del depósito sin dilución obtenida con el electrodo tubular CIS 3

En la figura 1 se muestra una imagen representativa de la estructura metalográfica del depósito sin dilución obtenido con el electrodo CIS 3. En ella se observa la presencia de microconstituyentes con forma poligonal, que en algunos casos se asemeja a la configuración típica de los carburos primarios del tipo  $M_7C_3$ , tanto de su sección transversal (hexagonal) como en un corte longitudinal (tipo espina). Esta morfología ha sido descrita por (Méndez et al., 2014) como típica para este sistema de aleación. En otros casos la forma de estos microconstituyentes es poligonal, lo que coincide con lo descrito por Callister (2000) para la cementita, cuya presencia ha sido referida en aleaciones con contenidos de Cr menores al 15 % por (Chatterjee y Pal, 2003).

Es evidente que estos resultados de microestructura no se corresponden con el análisis previo basado en el carbono equivalente. La causa de esto está sin dudas relacionada a la metaestabilidad impuesta por el proceso de soldadura, tal como explican (Correa et al., 2007), dado por la relativamente alta energía de entrada de los procesos de soldadura por arco, lo que trae consigo altas velocidades de enfriamiento del metal del depósito. Esto conlleva a que la estructura del depósito no coincida con la de equilibrio. Un aspecto que apoya lo anterior es que, al observar la proyección del *liquidus* del sistema ternario Fe–Cr–C de (Raynor y Rivlin, 1988), puede verse que muy cercano al punto donde se ubicaría la composición de los depósitos sin dilución (tabla 1) se sitúan

dos zonas, una de ellas donde la fase de formación primaria es el carburo del tipo  $M_7C_3$  y la otra donde es la cementita ( $M_3C$ ).

En trabajos de (Kumar et al., 2016) se obtienen resultados similares a estos, es decir, para una composición química del depósito cercana a la obtenida en este trabajo (tabla 1), la microestructura es hipereutética, constituida por carburos primarios del tipo  $M_7C_3$  y mezcla eutética.

A partir de lo planteado anteriormente acerca de la morfología hipereutética de la estructura metalográfica obtenida puede inferirse que la zona oscura con mayor área (figura 1), que se observa rodeando los microconstituyentes tipo carburos, se corresponde con mezcla eutética.



**Figura 1.** Microestructura del depósito sin dilución

También puede apreciarse que estos microconstituyentes se encuentran circundados por una zona fina de coloración clara, aspecto este descrito por (Méndez et al., 2014) en depósitos de recargues de fundiciones blancas aleadas. Este autor plantea como causa para la aparición de dicha zona clara la disminución del contenido de Cr y C en el líquido que rodea al carburo primario, debido a que la formación del carburo empobrece de dichos elementos la zona, acompañado esto por altas velocidades de enfriamiento que limitan la difusión y homogeneidad de la composición química. Esto va en detrimento de la formación de carburos eutéticos y de ahí la coloración clara, típica de zonas donde predomina una sola fase, que dada la composición química del depósito, con elevados contenidos de Cr y Mn, es lógico pensar en la austenita como fase metaestable a temperatura ambiente, según explica Radzikowska (2004).

El estudio de macrodureza del depósito sin dilución arrojó un valor medio de 57 HRC, con una desviación estándar de 0,6 HRC. Estos resultados se encuentran en el rango de dureza de los depósitos de recargues estudiados por (Leite y Villani, 2009) para similar sistema de aleación y estructura. Este es un elemento más que apoya la predicción del tipo de microestructura del depósito sin dilución como hipereutética.

Para ampliar la caracterización del material se realizaron mediciones de microdureza en las distintas zonas observadas mediante microscopía óptica (tabla 2).

De este estudio se desprende que los mayores valores de dureza se obtienen en microconstituyentes con configuración típica de carburos, superiores en la zona correspondiente a la sección longitudinal de los mismos (1228 HV). Por otra parte la región eutética exhibe una dureza promedio de 864 HV, mientras la fina zona clara que circunda los carburos arroja un valor de 693 HV.

**Tabla 2.** Resultado de dureza de los microconstituyentes y fases presentes en el depósito sin dilución

<i>Zona</i> <i>Medición</i>	<i>Zona Clara</i>	<i>Zona oscura</i>	<i>Microconstituyente hexagonal o poligonal</i>	<i>Microconstituyente Alargado o tipo espina</i>
Dureza promedio HV)	693	864	1222	1228
Desviación estándar (HV)	178,89	123,09	179,03	252,21

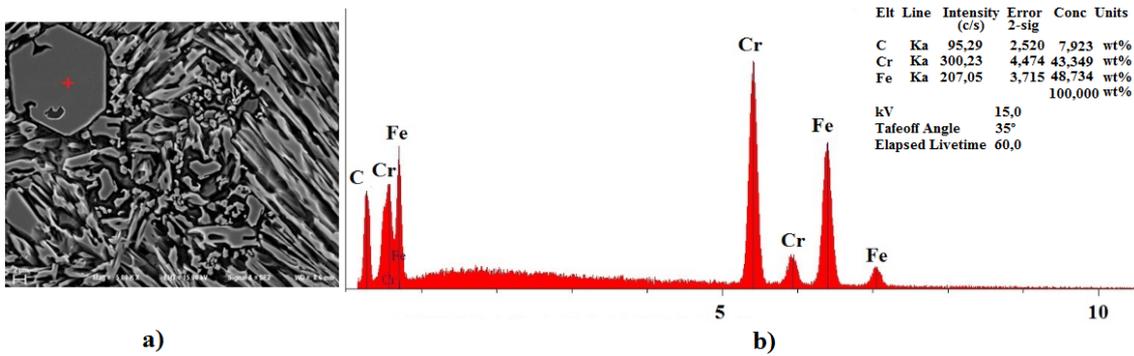
Los valores de microdureza promedio obtenidos en este estudio para los constituyentes tipo carburos y para la fase de morfología eutéctica se incluyen dentro de los rangos reportados por Méndez, et al. (2014) y (Chung et al., 2013), en depósitos de recargue de similares sistemas de aleación.

Por otra parte debe destacarse que la microdureza muestra una alta dispersión, lo cual puede ser una consecuencia de la cristalización heterogénea causada por las particulares condiciones de enfriamiento características de los depósitos de recargue por soldadura y de la composición de la aleación, que conlleva a un estado extremo de desequilibrio.

En la literatura son usualmente referidos altos valores de dispersión de la microdureza de los constituyentes de las fundiciones blancas aleadas al Cr depositadas mediante recargue por soldadura. Por ejemplo, (Stevenson y Hutchings, 1995), en un estudio de comportamiento frente al desgaste de varios depósitos de recargue, obtienen elevada variabilidad de los valores de microdureza de los carburos, con una desviación estándar de 210 HV; para la matriz eutéctica este parámetro toma un valor de 125 HV.

Se observa además en la tabla 2, que los valores de microdureza de las zonas claras también presentan una alta desviación (178,89HV), donde los valores son superiores a lo esperado para la fase austenita, tomando en consideración los resultados de (Yüksel y Sahin, 2014). Lo anterior lleva a concluir que esta fase tiene un elevado grado de aleación y que ella pueden encontrarse de forma dispersa partículas de carburos de pequeños tamaños, no apreciables mediante microscopía óptica.

En la figura 2 se muestra una imagen obtenida mediante microscopía electrónica de barrido al depósito sin dilución donde se observa con mayor detalle su morfología. Aquí se vuelven a apreciar microconstituyentes voluminosos con geometría hexagonal, identificados como carburos primarios del tipo  $M_7C_3$ . Estos presentan cavidades internas y discontinuidades en los bordes, las cuales son explicadas por (Kumar et al., 2016) debido a que cuando estos se forman la estructura primaria hexagonal que rodea al líquido hipereutéctico va engrosándose con el crecimiento del carburo. Este líquido fundido finalmente solidifica como estructura eutéctica y se convierte en un defecto dentro del carburo primario. Estos microconstituyentes se encuentran rodeados por una zona de morfología típica de la mezcla eutéctica descrita por Wiengmoon (2011), en la que los carburos secundarios constituyen una red en forma de colonia inmersa en la matriz metálica.



**Figura 2.** Imagen de microscopía electrónica de barrido del depósito sin dilución realizado con el electrodo tubular CIS 3 (a), resultado de microanálisis al carburo (b)

En función de comprobar la naturaleza de estos microconstituyentes tipo carburos primario, descritos antes desde el punto de vista morfológico y de dureza, se les realizó un análisis de la composición química mediante la técnica de microanálisis (figura 2 b). Dado los contenidos de los elementos y a partir de un estudio estequiométrico, puede inferirse que la fórmula cristalóquímica de este microconstituyente es aproximadamente la de un carburo aleado del tipo  $(FeCr)_7C_3$ , lo apoya lo planteado acerca de la presencia de este tipo de carburo primario dentro de la microestructura del depósito obtenido con el electrodo tubular experimental CIS 3.

#### 4. CONCLUSIONES

- 1- Según la composición química del depósito sin dilución obtenido con el electrodo tubular CIS 3, este material está constituido por una fundición blanca aleada con Cr, Mn y Si, cuya composición se enmarca dentro de los rangos empleados para los consumibles de recargue.
- 2- La microestructura del depósito sin dilución se corresponde con una fundición blanca hipereutéctica, con la presencia de carburos primarios aleados del tipo  $(FeCr)_7C_3$ , aunque no se descarta la presencia de cementita ( $M_3C$ ).
- 3- El consumible CIS 3 muestra características favorables para su aplicación como consumible de recargue de superficies sometidas a condiciones de desgaste abrasivo como mecanismo principal de deterioro.

#### REFERENCIAS

- AWS A 5.13-2000., Specification for surfacing electrodes for SMAW. Obtenido en Internet, en el sitio: <https://pubs.aws.org/Download.../A5.13-A5.13M-2010PV.pdf>, el 21 de Noviembre de 2014, 2000.
- Bazhenov, V. E., Pikunov, M.V., Determining the Carbon Equivalent of Cast Iron by the Thermo-Calc Program, Steel in Translation., Vol. 41, No. 11, 2011, pp. 896–899
- Callister, W.D., Materials Science and Engineering., Fifth Edition. ED, John Wiley & Sons, EUA, 2000, pp. 385-386.
- Chatterjee, S., Pal, T.K., Wear behavior of hardfacing deposits on cast iron., Wear 255, 2003, pp. 417–425.
- Chung, R.J., Tang, X., Li, D.Y., Microstructure refinement of hypereutectic high Cr cast irons using hard carbide-forming elements., Wear 301, 2013, pp 695–706.

- Correa, E.O., Alcantara, N.G., Tecco, D.G., Kumar, R.V., The Relationship between the Microstructure and Abrasive Resistance of a Hardfacing Alloy in the Fe-Cr-C-Nb-V System., *Metallurgical and Materials Trans A*, Vol. 38, 2007, pp. 1671-1679.
- Ghasemi B.S.S., Mehranfar, S., Wear Behavior of a Modified Low Alloy as Cast Hardening White Iron., *ISIJ International*, Vol. 52, No. 11, 2012, pp. 96-99.
- Kumar, Y., Chhibber, R., Arora, N., On the Microstructure and Wear Behavior of Fe-xCr-4Mn-3C Alloys., *Trans Indian Inst Met.*, 2016, pp. 58-69.
- Leite, R.V.M., Villani, P., Estudo Comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas., *S & I*, Vol. 14, No. 4, 2009, pp 329-335,
- Méndez, P.F., Barnes, N., Bell, K., Welding processes for wear resistant overlays., *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, 2014, pp. 4-25.
- Morales, F., Fernández, E., Perdomo, L., Rodríguez, M., Electrodo tubular desarrollado a partir de una ferroaleación del tipo FeCrV., *Centro Azúcar*, Vol. 33, No. 3, 2006, pp. 56-59.
- Morsy, M., El-Kashif, E., The effect of microstructure on high-stress abrasion resistance of Fe-Cr-C hardfacing deposits., *Weld World*, Vol .58, 2014, pp. 491-497.
- Ortiz, T., Cruz, A., Rodríguez, M., Procedimiento de diseño y evaluación de electrodos tubulares de recargue con vistas a optimizar la eficiencia de la recuperación de piezas., *Memorias del IX Conferencia Internacional Medio Ambiente Siglo XXI (MAS XXI)*, Cayo Santa María, Cuba, 2015, pp. 123-129.
- Radzikowska, J.M., Metallography and microstructures of cast iron., *ASM Handbooks*, ASM Int., Ohio, 2004, pp. 565-587.
- Raynor, G.V., Rivlin, V.G., *Phase Equilibria in Iron Ternary Alloys*, the Institute of Metals, The Bath Press, UK, 1988, pp. 88-91.
- Rodríguez, M., Electrodo Tubular revestido para el relleno superficial de centralizadores-estabilizadores y piezas que trabajen en condiciones similares. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, 1992.
- Scotti, A., Cruz-Crespo, A., Fernández, A.R., Oliveira, L., Coelho, A., Ferraresi, V.A., Relatório Final do Projeto de Intercâmbio Convênio CAPES/MÊS CUBA 15., 2008, pp. 18-29.
- Souza, M.S., Gadotti, I., Scotti, A., Um Banco de Ensaio para Avaliar Eletrodos Revestidos., *Memorias XIII Cong. Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM – II Cong*, CIDIM, Belo Horizonte, ABCM, Dez 1995, pp. 1-4.
- Stevenson, A.N.J., Hutchings, I.M., Wear of hardfacing white cast irons by solid particle erosion., *Wear*, Vol. 186-187, 1995, pp. 150-158.
- Yüksel, N., Sahin, S., Wear behavior-hardness-microstructure relation of Fe-Cr-C and Fe-Cr-C-B based hardfacing alloys., *Materials and Design*, Vol. 58, 2014, pp. 491-498.
- Zhi, X., Liu, J., Xing, J., Ma, S., Effect of cerium modification on microstructure and properties of high chromium cast iron., *Materials Science & Engineering A*, Vol. 603, 2014, pp. 98-103.