

Relationship of coating factor of coated tubular electrodes for hardfacing by SMAW process, with the consumption parameters and the geometry of the deposited metal

**Amado Cruz-Crespo¹, Américo Scotti², Rafael Fernández Fuentes¹,
Tamara Ortiz Méndez¹**

¹Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. acruz@uclv.edu.cu; rfernandez@uclv.edu.cu; tamaraom@uclv.edu.cu

²Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (LAPROSOLDA), Universidade Federal de Uberlândia, Brasil. ascoti@ufu.br

Abstract

At the present paper it is reported the relationship of coated factor in the behavior of coated tubular electrodes for hardfacing, using SMAW process, as to consumption parameters and the geometry of the deposited metal. The tubular electrodes were made with two coating thickness for a fixed diameter of the metal tube and coating composition, in order to value the exclusive influence of the coating thickness. Each coating factor (relation between the total diameter of the electrode and the diameter of the metal tube) was evaluated as a function of the variation in welding current. Deposits over the metal plate were made, letting evaluate the geometrical dimensions of the welding bead and the consumption parameter of electrodes. Based on the obtained results was concluded that for those electrodes the value of the coating factor have to be 1,2 and showing the best integral performance around an average welding current of 100 A.

Key words: hardfacing, tubular coated electrode, dilution, deposition efficiency, coated factor.

Relación del factor de revestimiento de electrodos tubulares revestidos para recubrimiento duro por SMAW con los parámetros de consumo y la geometría del depósito

Resumen

En el presente trabajo se reporta el vínculo del factor de revestimiento sobre el comportamiento de electrodos tubulares revestidos para revestimiento duro por SMAW, en cuanto a parámetros de consumo y geometría de los depósitos. Los electrodos fueron fabricados con dos espesores de revestimiento para un diámetro del alma y composición de revestimiento invariables, a fin de valorar la influencia exclusiva del espesor de revestimiento. Cada factor de revestimiento (relación entre el diámetro del revestimiento y el diámetro del alma del electrodo) fue evaluado en función de la variación de la corriente. Fueron realizados depósitos sobre chapa, evaluándose las dimensiones geométricas del cordón y los parámetros de consumo de los electrodos. En base a los resultados obtenidos se concluye que para estos electrodos el valor de factor de revestimiento debe ser de 1,2, mostrando su mejor desempeño integral en el entorno de una corriente media de 100 A.

Palabras clave: recargue duro, electrodo tubular revestido, dilución, eficiencia de deposición, factor de revestimiento.

Introducción

La influencia del factor de revestimiento sobre el comportamiento operacional de electrodos ha sido abordada por varios autores, que en su mayor parte la vinculan al efecto cañón. Existe vínculo entre el efecto cañón y el comportamiento de la transferencia metálica, que sin dudas se manifiesta en la geometría y aspecto externo del cordón [1-3]. Además del comportamiento operacional propiamente dicho, la relación metal/escoria en el baño de soldadura influye metalúrgicamente sobre los procesos de oxidación-reducción y, consecuentemente, sobre la transferencia de elementos de aleación y afino del metal [4]. A. Mazel [5], al analizar la posibilidad de aumentar la productividad de electrodos, define el factor de revestimiento como uno de los recursos de intensificación: Aumentando el factor de revestimiento se incrementa la masa posible de material que interacciona en relación al núcleo metálico y con ello la deposición de elementos aleantes. O sea, la variación del factor de revestimiento es un aspecto de vital importancia en la conducción exitosa del proceso de soldadura o recargue con un electrodo revestido.

La presencia de mayor o menor masa de escoria (sin que sea alterada la composición del revestimiento) influye directamente en el comportamiento operacional, mediante varios aspectos:

1. el efecto cañón, sobre el cual ya fue comentado;
2. una mayor masa de material está demandando energía para su calentamiento como tal y para procesos disociativos endotérmicos como lo experimentan la caliza y la dolomita [6-8];
3. se altera el volumen de gases que se incorpora a la columna del arco que influyen sobre la estabilidad del proceso [1, 9];
4. un mayor volumen de gases puede alterar las dimensiones de las gotas y el modo de transferencia, al provocar con mayor facilidad la explosión de las gotas por presión interna de los gases [1, 9];
5. participa una mayor cantidad de elementos aleantes y desoxidantes presentes en el revestimiento que al poseer diferentes ener-

gías de ionización también alteran la columna del arco [2];

6. la transferencia en gotas cubiertas de una película de escoria, si varía la relación núcleo/revestimiento puede alterarse el espesor de esta película y con ello las propiedades físicas y dimensiones de las gotas que se transfieren [1].

De otro lado, cabe señalar que el efecto del factor de revestimiento se ha estudiado principalmente en electrodos revestidos para soldadura, siendo un campo inexplorado efecto de este sobre el comportamiento operacional de electrodos tubulares revestidos para recubrimiento duro por SMAW, lo cual constituye el objetivo central de este trabajo.

El hecho de ser un alma tubular hace diferir significativamente de los electrodos macizos para igual diámetro nominal del alma, pues evidentemente la conductividad y en consecuencia la densidad de corriente son menores. Para la realización del presente trabajo fue tomado como premisa una publicación precedente de los autores sobre el estudio comparado del comportamiento operacional de electrodos tubulares revestidos frente a un electrodo comercial de alma maciza de aplicación similar [10].

Parte experimental

Para el presente estudio fueron fabricados electrodos tubulares revestidos de 4 mm (valor nominal, referente al diámetro externo del alma tubular metálica) y 350 mm de longitud. La obtención de la ferroaleación FeCrMn, aplicada en el alma del electrodo (el tamaño de grano de la ferroaleación en el alma fue $\leq 0,1$ mm) fue descrita en un trabajo precedente [11]. El revestimiento aplicado al electrodo fue de tipo básico, compuesto de fluorita, caliza, grafito y utilizando silicato de sodio (29,39% SiO_2 , 10,10% Na_2O , 60,51% H_2O) como aglutinante.

Los electrodos fueron revestidos por inmersión, variando el espesor del revestimiento a través del número de capas aplicadas. Fueron elaborados dos grupos de electrodos (dos factores de revestimiento), que responden a los valores medios de factores de revestimiento siguientes: 1,2 y 2,1.

Para la obtención de los depósitos fueron realizados cordones, sobre planchas de acero AISI 1020 de 200×30×9,2 mm, en posición plana. Para evitar la interferencia del soldador, los depósitos fueron realizados por un simulador (sistema automatizado que mantiene relativamente invariables la velocidad de avance, 10 cm/min, y la longitud del arco [12]. Para cada factor de revestimiento (*FR*) fueron realizados depósitos con diferentes valores de corriente de soldadura (I_s). Los altos valores de corriente de soldadura para un factor de revestimiento pequeño muestran un sobrecalentamiento del electrodo por efecto Joule, al tiempo que para relativamente baja corriente, cuando el factor de revestimiento es grande, hay dificultades para mantener el arco estable. En correspondencia con lo anterior, el rango de corriente de soldadura para evaluar cada electrodo fue obtenido mediante ensayos preliminares.

Las chapas de metal base y los electrodos fueron pesados antes de la realización de los ensayos. Después de cada ensayo fue pesada la colilla del electrodo y la plancha con el depósito, para de este modo determinar la masa de metal depositada y la de electrodo consumida. A los depósitos obtenidos le fueron realizados cortes transversales con disco abrasivo para la determinación de la geometría de los cordones. Las secciones cortadas (2 por cordón) fueron preparadas y atacadas con Nital al 3% para revelar sus dimensiones. Dichas dimensiones fueron determinadas en un microscopio óptico con cámara de adquisición de imagen, acoplado a un computador. A partir de las áreas determinadas de los cordones fue calculada la dilución.

Resultados y discusión

Comportamiento del consumo y la deposición

Las Figuras 1, 2 y 3 muestran el comportamiento de las tasas de fusión y deposición y el rendimiento de deposición en función del factor de revestimiento y la corriente. Del análisis de la Figura 1 se hace visible algo esperado, que al aumentar la corriente de soldadura aumenta la tasa de fusión. De otra parte, se percibe que al aumentar el factor de revestimiento aumenta la tasa de fusión, lo cual es también algo esperado, ya que el factor de revestimiento representa la relación

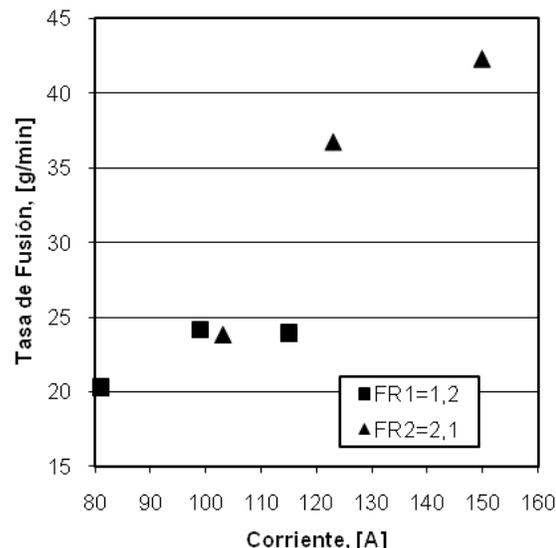


Figura 1. Comportamiento de la tasa de fusión con la corriente de soldadura y con el factor de revestimiento.

del diámetro del revestimiento y el diámetro del alma del electrodo y por tanto si crece esta relación crece la masa total por unidad de longitud del electrodo.

En un análisis más detallado se percibe que para el electrodo de menor factor de revestimiento ($FR1=1,2$) la tasa de fusión ha crecido y luego muestra una leve caída, lo cual coincide con resultados reportados por los autores con anterioridad en el estudio del efecto de la corriente en electrodos tubulares revestidos con un factor de revestimiento constante, igual a 1,5. Por tratarse de factores de revestimiento diferentes, en aquel y este caso, el cambio de dirección de la pendiente ocurre en valores diferentes de corriente [10].

De manera relativamente análoga, el electrodo de $FR2=2,1$ ha mostrado un crecimiento drástico y luego, aunque ha crecido, experimenta una desaceleración (Figura 1). Tal comportamiento de caída o desaceleración de la tasa de fusión respecto a la corriente de los electrodos con factor de revestimiento 1,2 y 2,1 se atribuye a que por efecto Joule se alcanza la temperatura de descomposición fuertemente endotérmica del $CaCO_3$ en una mayor longitud del electrodo. Ello hace que se consuma parte de la energía en este proceso, a la vez que se desprotege el electrodo, aumentando el intercambio de calor con el medio. Tal pérdida de energía hace que se funda me-

nos masa total de electrodo para altas corrientes de soldadura.

En el caso del comportamiento de la tasa de deposición frente a la corriente (Figura 2), se percibe que hay una tendencia a disminuir con el aumento del factor de revestimiento. Esto se explica a partir del hecho que, aunque sea mayor la corriente para los mayores factores de revestimiento, el incremento de energía se consume en el calentamiento, disociación fuertemente endotérmica de CaCO_3 y fusión de una mayor masa de revestimiento, a la vez que el alma del electrodo es invariable, o sea el incremento de energía no se invierte en metal fundido a depositar en el cordón. Es apreciable en la Figura 2 que los dos electrodos muestran un crecimiento con una caída posterior de la tasa de deposición al aumentar la corriente, lo cual coincide con el comportamiento de la tasa de fusión en función de la corriente (Figura 1), coincidiendo también con resultados precedentes reportados por los autores en el estudio del efecto de la corriente en electrodos tubulares revestidos con un factor de revestimiento constante, igual a 1,5 [10].

Si se analizan de conjunto las Figuras 1 y 2 vemos que hay una tendencia a aumentar la tasa de deposición con el aumento de la tasa de fusión para un factor de revestimiento dado, al tiempo que disminuye con el aumento del factor de revestimiento. Ello se fundamenta en que, al aumentar el factor de revestimiento se incrementa la masa del sistema de escoria del electrodo, para una condición invariable de la masa de la carga aleante del alma, entonces se consume más electrodo, mientras potencialmente la masa de metal que se deposita es la misma. Lógicamente, esto no es la única razón de diferencia, pues es visible que hay variaciones significativas en el efecto de la tasa de fusión sobre la tasa de deposición para un mismo factor de revestimiento, ya en este caso porque ha variado la corriente. El hecho que en un electrodo con factor de revestimiento dado, a partir de determinado valor de tasa de fusión, la tasa de deposición no crezca cuando ha sido aumentada la corriente, se atribuye a que son aumentadas también las probabilidades de pérdidas por oxidación de elementos, relacionado ante todo a un mayor calentamiento por efecto Joule que condiciona a su vez a una mayor interacción (mayor probabilidad de procesos oxidativos con

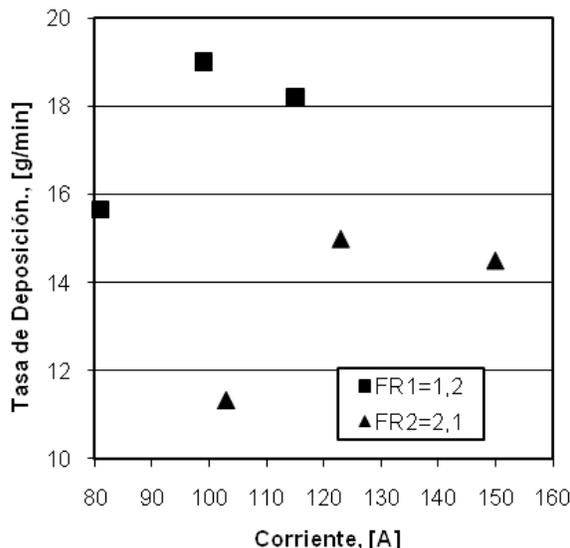


Figura 2. Comportamiento de la tasa de deposición con la corriente de soldadura y con el factor de revestimiento.

generación de calor) y al aumentar la temperatura del electrodo aumenta su resistividad, enfatizando el propio efecto Joule y las pérdidas por oxidación [6].

En el caso del rendimiento de deposición (Figura 3), es visible la tendencia general de disminución con el aumento del factor de revestimiento, lo cual es reflejo de los comportamientos de las tasas de fusión y deposición de las Figuras 1 y 2. Ello se explica por lo ya planteado de que aumenta la masa del sistema de escoria en la unidad de longitud de electrodo para una masa invariable del sistema aleante del alma del electrodo tubular (material a depositar).

De la observación de la Figura 3 se percibe que para el factor de revestimiento 1,2 las variaciones del rendimiento son imperceptibles. Al comparar con valores reportados por los autores en un trabajo precedente para un factor de revestimiento de 1,5, permite observar que los valores de rendimientos para el factor de revestimiento de 1,2 (Figura 3) son superiores a los valores reportados para el factor de revestimiento de 1,5 [10]. O sea que con el aumento del factor de revestimiento el rendimiento disminuye.

Para el caso del electrodo con factor de revestimiento 2,1 se aprecia una clara disminución del rendimiento al aumentar la corriente, lo cual

como se puede apreciar en la propia Figura 3 pudiera responder a un mayor rango de variación de la corriente, comparado con factores de revestimiento menores. Este descenso continuo del rendimiento con el aumento de la corriente es también coincidente con lo reportado en el trabajo precedente recién referido [10]. El hecho que disminuya el rendimiento a partir de determinado valor de corriente para un factor de revestimiento dado, es explicable por lo ya abordado sobre el aumento de las probabilidades de pérdidas por oxidación. O sea, que podemos sintetizar que es gobernante el factor de revestimiento sobre el rendimiento; mientras que la corriente solo puede influir si su rango de variación es amplio para un factor de revestimiento dado.

De otra parte, es casi una conclusión evidente que la capacidad potencial de producción de los electrodos es mayor para menores factores de revestimiento por dos razones a un mismo tiempo: Mayor deposición por una mayor masa depositada respecto a la consumida y la posibilidad de trabajar con menor valores de corriente (menor energía).

Comportamiento de la geometría de los depósitos

Para un proceso de recubrimiento duro el aspecto más importante, desde el punto de vista de la geometría de los depósitos, es la dilución. Esta define la calidad del material que se deposita, siendo establecido como criterio que una menor dilución es siempre favorable para la calidad del recubrimiento, ya que hay un mayor aprovechamiento del material de aporte.

En la Figura 4 se muestra el comportamiento de la dilución con la variación de la corriente de soldadura y el factor de revestimiento. En dicha figura se advierte que el comportamiento de la dilución frente a la corriente no se manifiesta igual para los electrodos con diferentes factores de revestimiento (FR1=1,2 y FR2=2,1). Por otra parte, el comportamiento del electrodo con factor de revestimiento de 2,1 coincide plenamente con resultados anteriores reportados por los autores para electrodos tubulares con factor de revestimiento de 1,5, donde se advierte un aumento de la dilución con el aumento de la corriente [10]. En el referido trabajo el intervalo de los valores de corriente fue muy superior al del presente para el

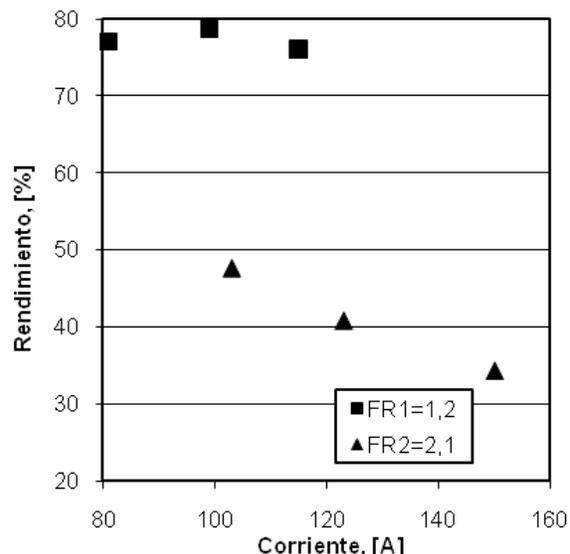


Figura 3. Comportamiento del rendimiento con la corriente de soldadura y con el factor de revestimiento.

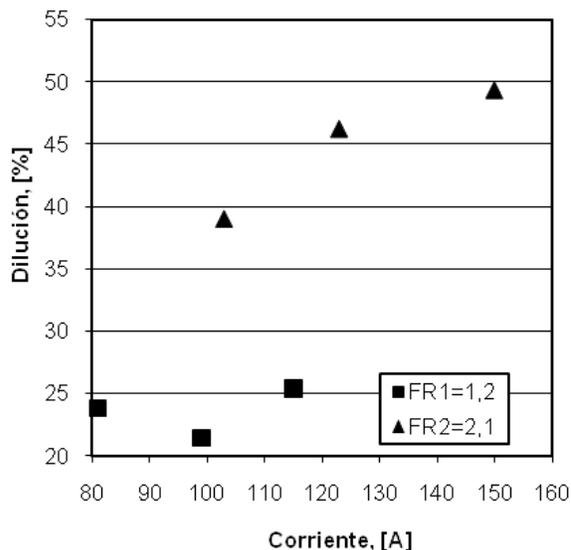


Figura 4. Comportamiento del coeficiente de dilución en función de la corriente de soldadura y del factor de revestimiento.

electrodo con factor de revestimiento de 1,2. Ello explica por qué en la Figura 4 la dilución se ha mantenido prácticamente constante.

En la Figura 4 se advierte que la dilución aumenta en función del factor de revestimiento. La causa de tal comportamiento fue abordada al analizar la tasa de deposición de la Figura 2. Al aumentar el factor de revestimiento una mayor

masa de electrodo esta demandando energía, frente a una masa potencial a depositar constante (masa del alma invariable), conduciendo a una menor deposición y alterando consecuentemente la relación volumétrica de metal depositado y metal base fundido. En un trabajo previo de los autores para un factor de revestimiento de 1,5 se obtuvo, para los mejores resultados de tasa de deposición (en el intervalo de 15-19 g/min), un coeficiente de dilución de alrededor de 30-35% [10]. En el presente trabajo, de acuerdo a las Figuras 2 y 4, para el electrodo con factor de revestimiento de 1,2 y para aproximadamente el mismo rango de variación de valores de la tasa de deposición se obtiene un coeficiente de dilución inferior, de alrededor del 25%.

Se puede resumir que los electrodos con menor factor de revestimiento (factor de revestimiento 1,2) presentan el mejor comportamiento al mostrar la menor dilución (Figuras 4), la cual se comporta para este electrodo con poca variación dentro del intervalo de corrientes de soldadura estudiado.

Al particularizar en los parámetros geométricos lineales, se aprecia en la Figura 5 que el menor factor de revestimiento se vincula a una menor penetración. A modo de ejemplo, en la Figura 6 se muestran las macrografías correspondientes a los depósitos de los electrodos con factor de revestimiento 1,2 y 2,1 para una corriente de alrededor de 100 A. Una mayor penetración para un mayor factor de revestimiento se relaciona a que el aumento de este último condiciona el aumento del efecto cañón que conduce a una ma-

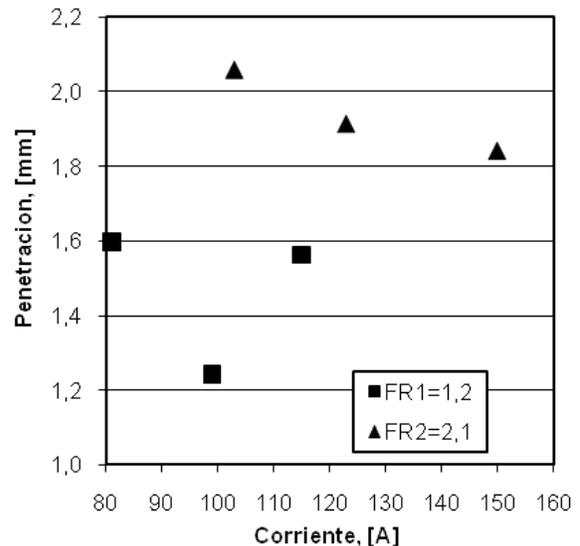


Figura 5. Comportamiento de la penetración del cordón en función de la corriente de soldadura y del factor de revestimiento.

yor presión del arco, incidiendo más directamente sobre la poza de fusión.

En el caso del ancho del depósito, en la Figura 7 se advierte que crece con el aumento del factor de revestimiento y también crece para un factor de revestimiento dado en función de la corriente. La Figura 6 ilustra, a modo de ejemplo, como para un mayor factor de revestimiento se obtiene un ancho mayor. La tendencia de comportamiento para un electrodo dado en función de la corriente es clásicamente abordada en la literatura, asociado con la energía del arco, y es a su vez coincidente con el comportamiento obteni-

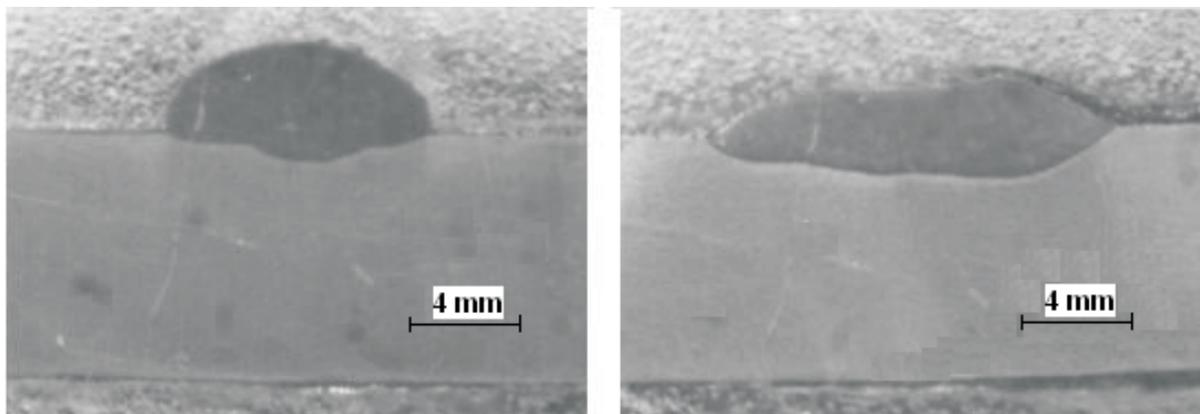


Figura 6. Macrografías de los depósitos obtenidos con una corriente de 100 A.
a) Electrodo con factor de revestimiento 1,2 y b) Electrodo con factor de revestimiento 2,1.

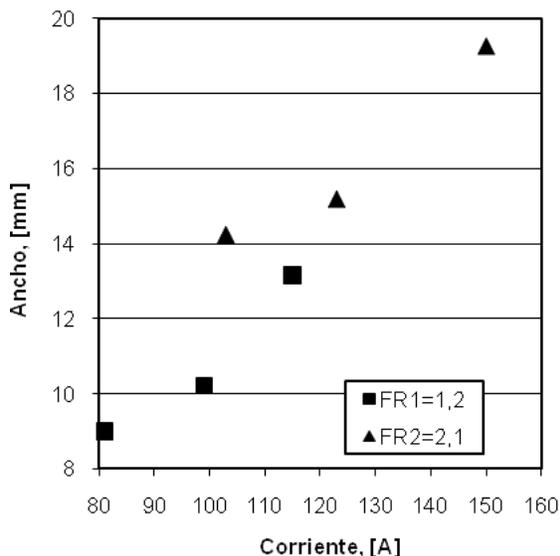


Figura 7. Variación del ancho de los depósitos con la variación de la corriente de soldadura y el factor de revestimiento.

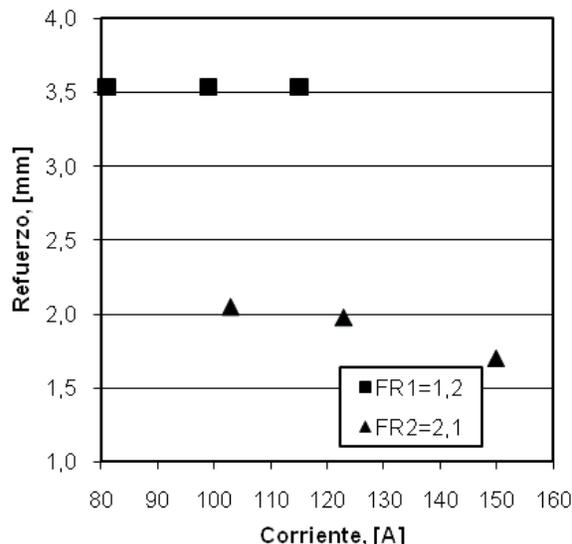


Figura 8. Variación del refuerzo con la variación de la corriente y el factor de revestimiento.

do por los autores en un trabajo precedente para un electrodo con un factor de revestimiento igual a 1,5 [13]. La causa principal de mayor ancho para un mayor factor de revestimiento está asociada a un mayor efecto cañón que condiciona un mayor aprovechamiento de la energía, ya que limita el intercambio de calor con el medio, tanto del arco como de la gota que está siendo transferida.

El refuerzo de los depósitos, frente a la corriente y al factor de revestimiento (Figura 8), muestra una tendencia a la disminución con el aumento de este último (Figura 6), mientras que la corriente para un electrodo de factor de revestimiento dado no ejerce un efecto apreciable. La poca variación del refuerzo frente a la corriente para un factor de revestimiento dado coincide con los resultados obtenidos con precedencia por los autores para un electrodos con factor de revestimiento igual a 1,5 [13]. Los resultados de refuerzo reportados en dicho trabajo están en el entorno de 3 mm, insertándose entre los valores de refuerzo para los factores de revestimiento de 1,2 y 2,1, respectivamente (Figura 7). Lo anterior es una cierta evidencia de la regularidad obtenida del efecto del factor de revestimiento sobre el refuerzo.

Pese a los efectos observados del factor de revestimiento sobre la geometría, en particular

sobre la dilución, no se han producido cambios significativos en la microestructura del metal depositado, ya que el alma tubular del electrodo que contiene el sistema aleante se mantuvo invariable. La microestructura en todos los depósitos fue de tipo hipoeutéctica, constituida por dendritas de austenita y eutéctica interdendrítica fina (Figura 9). Pese a ello, como se ha expresado, una menor dilución conduce siempre a un mayor aprovechamiento del material de aporte que es una condición deseada.

Conclusiones

La capacidad potencial de producción de los electrodos es mayor para el factor de revestimiento de 1,2, a causa de una mayor masa depositada respecto a la consumida. La tasa de fusión crece con el factor de revestimiento, en cuanto que la tasa de deposición decrece, a la vez que para un factor de revestimiento constante la tasa de deposición tiende a crecer con la corriente.

Los electrodos con menor factor de revestimiento, igual a 1,2, presentan mejor comportamiento desde el punto de vista de la geometría que el de factor de revestimiento de 2,1 al mostrar menor dilución. A su vez, el electrodo de factor de revestimiento 1,2 brinda los mejores resultados (la menor dilución) para un valor intermedio de

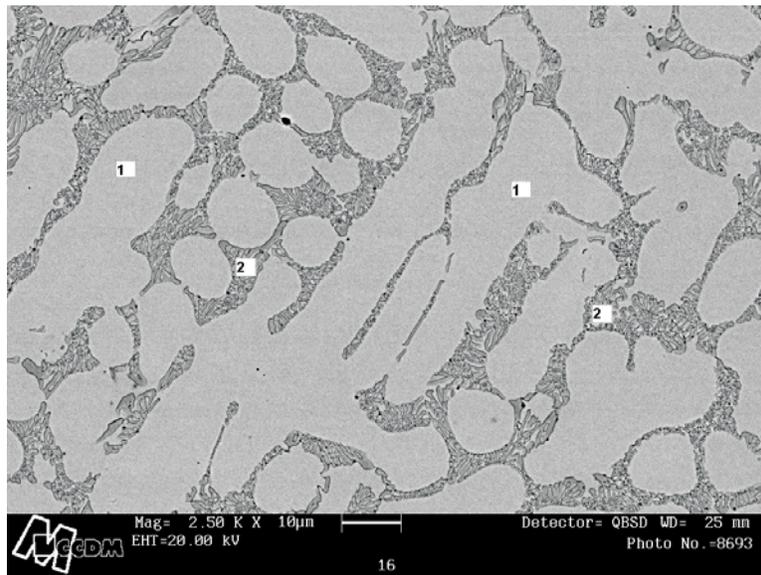


Figura 9. Microestructura representativa de los depósitos (Depósito obtenido con 100 A con electrodo de factor de revestimiento 1,2). El 1 representa la austenita y el 2 la eutéctica.

corriente, de alrededor de 100 A. Con respecto a la corriente, la dilución muestra un comportamiento irregular, tendiendo a crecer con el factor de revestimiento. Las diferencias en la dilución no imprimen cambios significativos en la microestructura, representada en todos los casos por una aleación hipoeutéctica con dendritas de austenita y eutéctica interdendrítica. La penetración tiende a crecer con el factor de revestimiento, al igual que el ancho, mientras que el refuerzo decrece. Para un factor de revestimiento dado el ancho crece con la corriente, mientras el refuerzo y la penetración no muestran un comportamiento regular.

Los criterios unificados de parámetros de consumo y geometría, permiten concluir que el menor factor de revestimiento, igual a 1,2, ofrece los mejores resultados, al brindar la mayor eficiencia de deposición (rendimiento) con la menor dilución, manifestando el mejor desempeño en el entorno de 100 A.

Agradecimientos

Los autores agradecen a CAPES (Brasil) y al MES (Cuba) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo cooperativo, en el marco del Proyecto CAPES/MES CUBA 59/2009.

Referencias bibliográficas

1. Brandi S., Taniguchi C. and Liu S.: "Analysis of metal transfer in shielded metal arc welding" *Welding Journal*, N° 10 (1991) 261-270.
2. Farias J. P., Quites A. M. and Surian E. S.: "The effect of magnesium content on the arc stability of SMAW E7016-C2L/8016-C2 covered electrodes". *Welding Journal*, N° 6 (1997) 245-250.
3. De Rissone N. M. R., Farias J. P., De Souza Bott I. and Surian E. S.: "ANSI/AWS A5.1-91 E6013 rutile electrodes: The effect of calcite". *Welding Journal*, N° 7 (2002) 113-124.
4. Vornovitsky N., Semendiaev B.V., Kucherova M.I. and Arsyukov D.V.: "Regulating splashing of electrode metal in manual arc welding". *Welding Internacional*, Vol. 21, N° 2 (2007) 157-159.
5. Amazel Yu.: "Development of high-productivity high-alloyed electrodes". *Welding International*, Vol. 20, N° 11 (2006) 913-917.
6. Bracarence A. Q. and Liu S.: "Chemical composition variation in shielded metal arc welds". *Welding Journal*, N° 12 (1993) 529-536.
7. Quinn T. P., Bracarence A. Q. and Liu S.: "A melting rate and temperature distribution

- for shielded metal arc welding electrodes". *Welding Journal*, N° 12 (1997) 532-538.
8. Bracarense A. Q. and Liu S.: "Chemical composition and hardness control by endothermic reaction in the coating of covered electrodes". *Welding Journal*, N°12 (1997) 509-516.
 9. Pistorius P. G. H. and Liu S.: "Changes in metal transfer behaviour during shielded metal arc welding". *Welding Journal*, N° 8 (1997) 305-315.
 10. Cruz-Crespo A., Scotti A., and Pérez M. R.: "Operational behaviour assessment of coated tubular electrodes for SMAW hardfacing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 199 (2008) 265-273.
 11. Cruz-Crespo, A., Perdomo L., Pérez M. R., Fernandez R., Ortiz T. M.: "Obtención de un fundente aglomerado aleado y un electrodo tubular revestido con el empleo de FeCrMn y escoria de la reducción carbotérmica de minerales". Congreso da Sociedade Brasileira de Soldagem, Belo Horizonte, Oct. (2006).
 12. Souza M.S., Gadotti I., Scotti A. "Um banco de ensaio para avaliar eletrodos revestidos". XIII Cong. Brasileiro de Engenharia Mecânica -COBEM- II Cong. IberoAmericano de Engenharia Mecânica- CIDIM, Belo Horizonte, Brasil, Dez (1995).
 13. Cruz-Crespo A., Scotti A., Pérez M.R.: "Estudio comparativo de los parámetros de consumo y geometría de los depósitos de electrodos tubulares revestidos para recargue". 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, Perú, Oct (2007).

Recibido el 5 de Septiembre de 2011

En forma revisada el 10 de Septiembre de 2012