

## **Efecto de la pirolusita, la caliza+fluorita y el ferrocromomanganeso sobre el desempeño de un electrodo básico con revestimiento periférico**

Amado Cruz-Crespo  
Eduardo Manuel Díaz-Cedré  
Americo Scotti

### **Resumen**

Se evaluó el comportamiento de electrodos revestidos AWS E 7018, en función del contenido de los componentes en el revestimiento periférico aplicado, con el objetivo de mejorar su desempeño. Las proporciones en las mezclas para los revestimientos se establecieron con base en un diseño experimental de tipo Mc Lean Anderson, donde las variables de entrada son: X1- la pirolusita, X2- la caliza+fluorita (para relación caliza: fluorita=1) y X3- el FeCrMn. Las mezclas homogenizadas fueron aglomeradas con silicato de sodio y agua para conformar las pastas que se aplicaron por inmersión sobre el revestimiento básico de los electrodos de 3,2 mm de diámetro del núcleo metálico. Para evaluar los electrodos fueron obtenidas las isóneas de comportamiento de las tasas de fusión y deposición, de la eficiencia de deposición y de la geometría de los cordones. Se concluye que la composición del revestimiento de mejor desempeño condiciona cambios favorables frente al electrodo sin revestimiento periférico, ya que aumenta la profundidad de penetración del cordón, el cual adquiere un perfil más estrecho.

**Palabras clave:** soldadura manual; electrodo revestido; tasas de fusión y deposición; eficiencia de deposición; geometría del cordón.

## Effects of pyrolusite, limestone and fluorite and ferrochrome manganese on the performance of basic electrodes with peripheral coating

### Abstract

This investigation presents the evaluation of AWS E 7018 coated electrodes based on the content of the peripheral coating components in order to improve their performance. Proportions for the coatings were estimated based on an McLean Anderson experimental design where the input variables are: X1- pyrolusite, X2- limestone+fluorite (for limestone: fluorite=1) and X3- FeCrMn. The homogenized blends were agglomerated with sodium silicate and water to form the pastes that were applied by immersion on the basic coating of the 3,2 mm diameter electrodes of the metal core. The isolines of the melting and deposition rates as well as the deposition efficiency and the bead geometry were generated for the evaluation of the electrodes. The results indicate that the composition of the coating with a better performance contributes to favorable changes compared to the electrode without peripheral coating as this increases the depth of the bead penetration, thus providing a narrower profile.

**Keywords:** shielded metal arc welding; coated electrode; fusion and deposition rates; deposition efficiency; weld geometry.

## 1. INTRODUCCIÓN

La complejidad de los revestimientos de electrodos para proceso SMAW es tal que pequeñas modificaciones de componentes pueden imprimir apreciables variaciones en el comportamiento en la soldadura y en la calidad de la unión o el depósito, por lo que, a pesar de la larga historia de este proceso, aun siguen teniendo vigencia las investigaciones sobre el desarrollo, perfeccionamiento y desempeño de estos tipos de consumibles (Yavdoshchin et al. 2005; Cruz-Crespo, Fernández-Fuentes & Scotti 2010; Rahimi et al. 2011; Sharma, Sharma & Sharma 2014; Sham & Liu 2014).

Dentro de los tres grandes grupos de revestimientos de electrodos (rutílico, básico y celulósico), el mayor consumo corresponde a los rutilicos, sustentado en sus excelentes propiedades operacionales y su costo. A su vez, cuando se pretende responder a una alta calidad de las uniones son los electrodos básicos la opción más aconsejable.

Dada la diversidad de componentes de los revestimientos y de materias primas contentivas de estos son múltiples los estudios reportados, siendo dentro de ello una tendencia abordar el efecto de adiciones metálicas y componentes minerales sobre los procesos de oxidación-reducción y las consecuencias térmicas de estos (Bracarense & Liu 1997; Allen, Olson & Frost 1998; Yarovchuk 2005). Por otra parte, algunos autores han estudiado el efecto de componentes minerales y adiciones metálicas sobre el comportamiento de la estabilidad del arco (Farias et al. 2004; De Rissone et al. 2002; Sharma, Sharma & Sharma 2014; Sham & Liu 2014).

Se reporta, además, la aplicación de dos capas de revestimiento con relaciones variables de  $\text{CaF}_2/\text{CaCO}_3$  con el objetivo de mejorar el comportamiento operacional de los electrodos (Pokhonya et al. 1991).

De acuerdo a lo planteado, el presente trabajo se enfoca hacia la mejora del desempeño de electrodos básicos AWS E 7018, a partir del estudio de su comportamiento, bajo un revestimiento periférico aplicado con variaciones en la composición.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Obtención de los electrodos

A electrodos básicos AWS E 7018 de 3,2 mm de diámetro de núcleo le fueron aplicados diferentes revestimientos periféricos con variaciones de pirolusita ( $X_1$ ), (caliza+fluorita) ( $X_2$ ) y FeCrMn ( $X_3$ ), en un rango que se enmarca dentro de las fronteras:  $0 \leq X_1 \leq 50$  %;  $25 \leq X_2 \leq 100$  %

y  $0 \leq X_1 \leq 75$  %, donde se cumple que caliza: fluorita=1:1 y que la suma de los tres componentes representa el 100 %.

Para la definición de los revestimientos a aplicar fue utilizada una planificación de experimentos, donde el rango de variación de las variables  $X_1$ ;  $X_2$  y  $X_3$  son las condiciones de fronteras de la región experimental dentro de un triángulo de composición, cuyos vértices corresponden al 100 % de  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$ , respectivamente (Figura 1). De las 12 posibles combinaciones de variables ( $N=q^{q-1}$ ; N-Número de experimentos, q-número de variables independientes), solo cuatro cumplen la condición de normalidad ( $\sum X_i=100$  %) y no presentan variables fuera de rango. De este modo, se obtiene una región experimental enmarcada por un trapecio, cuyos vértices denotamos como: (a), (b), (c) y (d). En el centro de las aristas y en el centroide del trapecio fueron añadidos cinco nuevos puntos experimentales, denotados como: ac, cd, db, ba y abcd. De este modo se obtuvieron nueve composiciones de revestimientos.

Los componentes utilizados para la obtención de los revestimientos responden a las composiciones siguientes: pirolusita (Mn-76,86 %; SiO<sub>2</sub>-8,6 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2,06 %; CaO-2,0 %; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1,17 %; MgO-0,32 %; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-0,27 %; H<sub>2</sub>O-5,22 %), caliza (CaCO<sub>3</sub>- 98,57 %; MgO-0,68 %; SiO<sub>2</sub>-0,34 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0,23 %; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0,17 %), fluorita (CaF<sub>2</sub>-96,10 %; SiO<sub>2</sub>-2,24 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0,43 %; CaO-0,22 %; MgO-0,10 %) y FeCrMn (Cr-15,31 %; Mn-69,88 %; Si-2,67 %; Fe-9,61 %), reportadas en trabajos previos (Cruz-Crespo *et al.* 2003).

Previo al conformado de las mezclas de los revestimientos, la caliza y la fluorita fueron llevadas a un tamaño de grano  $\leq 0,1$  mm, mediante un proceso de molienda y clasificación, mientras que el FeCrMn y la pirolusita fueron llevados a un tamaño de grano en un rango de 0,1-0,25 mm. Las mezclas de componentes fueron preparadas mediante pesaje en una balanza técnica y mezclado para su homogenización en un tambor rotatorio durante 30 min.

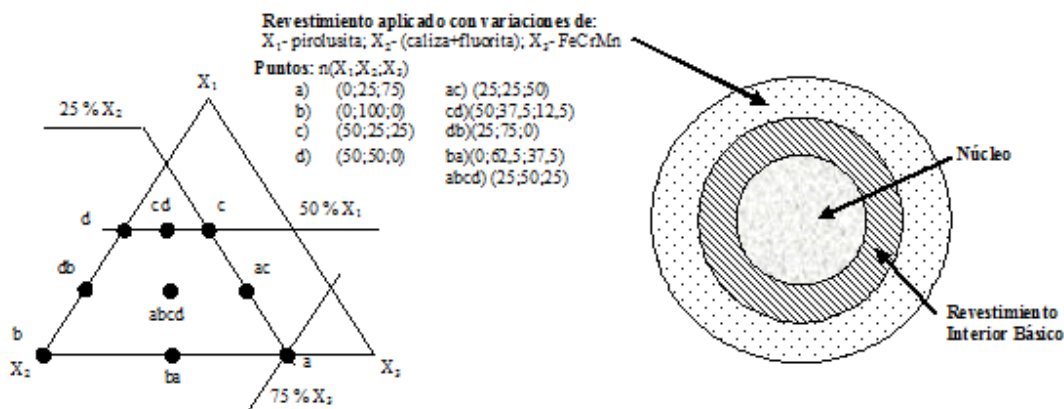


Figura 1. Revestimientos periféricos a aplicar a los electrodos.

Luego de mezclada la masa seca esta fue aglutinada con un 40 % (referido al 100 % de dicha masa seca) de silicato de sodio (29,39 %  $SiO_2$ , 10,10 %  $Na_2O$ , 60,51 %  $H_2O$ ) y con adiciones complementarias de agua para dar la textura adecuada a la pasta para su aplicación al revestimiento de los electrodos. Cada uno de los revestimientos preparados fue aplicado por inmersión como revestimiento periférico a electrodos AWS E 7018, con alma de 3,2 mm, de modo que se obtuvieron nueve grupos de electrodos con núcleo de acero y revestimiento básico interior común para todos, pero con revestimientos exteriores diferentes (Figura 1).

Los electrodos revestidos fueron secados al aire durante 24 horas y luego calcinados a 160 °C en una estufa, por un intervalo de dos horas. Se obtienen de este modo electrodos con la siguiente relación de revestimientos:  $d_{Rext}:d_{Rint}=1,19$ ;  $d_{Rext}:d_n=2,03$ ; donde  $d_{Rext}$ ,  $d_{Rint}$  y  $d_n$  son los diámetros del revestimiento externo aplicado, del revestimiento interno y del núcleo, respectivamente.

## 2.2 Evaluación del comportamiento de los electrodos

Para la evaluación del comportamiento de los electrodos experimentales con revestimiento periférico fueron realizados cordones sobre planchas de acero AISI 1020 de 200x50x6 mm en posición plana. Para evitar la interferencia del soldador los depositos fueron realizados por un simulador (sistema automatizado que procura mantener invariable la velocidad de avance y la longitud de arco), desarrollado en LAPROSOLDA, de la Universidad Federal de Uberlandia (Souza & Scotti 1996). La velocidad de avance (15 cm/min) fue prerregulada previo a la realización de todos los ensayos, al tiempo que la tensión del arco fue prerregulada para cada electrodo, de modo que la longitud del arco se mantuviera similar (arco corto en todos los casos). La corriente de soldadura fue

de 100 A, corriente continua con polaridad inversa (CC+). El electrodo fue colocado con un ángulo de 105° en relación a la línea de soldadura, en la dirección halando el cordón.

Para la determinación de los parámetros de consumo, en correspondencia con la norma ISO 2401-72 (1972), las chapas de metal base y los electrodos fueron pesados antes de la realización de los ensayos en una balanza técnica. 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 masa de electrodo consumida.

A los depósitos obtenidos le fueron realizados cortes transversales con disco abrasivo para la determinación de la geometría de los cordones. La preparación de las muestras se realizó tomando como referencia la norma ASTM E3-01 (2001). Se prepararon las secciones cortadas y se atacaron con nital al 3 %. Mediante un microscopio óptico acoplado a un computador se adquirieron las macrográficas y con ayuda del programa Sigma Scan se determinaron las dimensiones.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. Comportamiento operacional del electrodo**

En la Figura 2 se muestran las isolíneas de comportamiento de las tasas de fusión (en g/min) dependientes de los contenidos de pirolusita ( $X_1$ ), (caliza+fluorita) ( $X_2$ ) y FeCrMn ( $X_3$ ). En la Figura 2 se advierte que el mayor efecto sobre las tasas de fusión lo ejerce la pirolusita ( $X_1$ ), lo cual es claramente explicado por el comportamiento de este mineral con la temperatura. Durante el calentamiento del revestimiento, la pirolusita ( $MnO_2$ ) sufre un proceso disociativo endotérmico irreversible con liberación de oxígeno, pasando de manera gradual por sus diferentes óxidos ( $MnO_2 \rightarrow Mn_2O_3 \rightarrow Mn_3O_4 \rightarrow MnO$ ), lo cual se verifica por las siguientes reacciones:  $4MnO_2 \rightarrow 2Mn_2O_3 + O_2$  ( $\Delta G = 9661 - 12T$ );  $6Mn_2O_3 \rightarrow 4Mn_3O_4 + O_2$  ( $\Delta G = 10513 - 7,4T$ );  $2Mn_3O_4 \rightarrow 6MnO + O_2$  ( $\Delta G = 26256 - 15T$ ).

Para el caso particular del mineral de manganeso utilizado (pirolusita del yacimiento Margarita de Cambute) los procesos de disociación, evidenciados por análisis térmico diferencial y termogravimétrico y difracción de rayos X, se verifican a 730 °C, 1 145 °C y 1 447 °C (Cruz-Crespo *et al.* 2003).

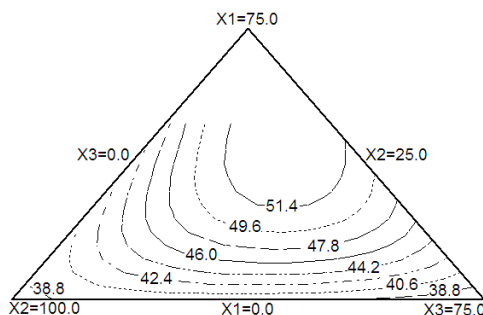


Figura 2. Efecto de la composición del revestimiento sobre las tasas de fusión.

Los productos resultantes de la disociación ( $O_2$  y  $MnO$ ) pasan a los gases y la escoria, respectivamente. El oxígeno liberado participa en la oxidación con carácter exotérmico de los elementos químicos presentes en el sistema aleante del electrodo, formando óxidos que pasarían a formar parte del sistema de escoria ( $2Mn+O_2=2MnO$ ;  $2Fe+O_2=2FeO$ ;  $Si+O_2=SiO_2$ ;  $Cr+O_2=Cr_2O_3$ ), entre otras. Ello explica por qué en la Figura 2 los mayores valores de tasas de fusión se enmarcan en la región donde se combinan los más altos contenidos de pirolusita ( $X_1$ ), con los mayores valores posibles de sistema de aleación; o sea, valores de máxima pirolusita, tendientes a la arista  $X_1$ - $X_3$ . Este efecto de la oxidación de elementos coincide con lo planteado por diversos autores acerca de la influencia de adiciones metálicas en el revestimiento sobre las tasas de fusión (Yarovchuk 2005; Bracarense & Liu 1997; Allen, Olson & Frost 1998). La presencia de  $SiO_2$  en el sistema hace muy probable que este interactúe con el  $MnO$  resultante de la disociación y de los procesos oxidativos, formando silicatos estables mediante reacciones exotérmicas ( $MnO+SiO_2 \rightarrow MnSiO_3$  ( $\Delta G = -1467 + 0,85T$ );  $2MnO+SiO_2 \rightarrow Mn_2SiO_4$  ( $\Delta G = -2920 + 0,7T$ )) (Podgayeskii & Kuzmienko 1988).

La calcita, adicionada en nuestro caso al revestimiento en forma de caliza junto a la fluorita (caliza+fluorita) ( $X_2$ ), aporta  $CO_2$  a la atmósfera gaseosa ( $CaCO_3=CaO+CO_2$  ( $\Delta G = 9614 - 8,22T$ ) que, a su vez, aumenta el potencial de oxígeno en la columna del arco ( $CO_2=CO + \frac{1}{2}O_2$ ;  $[P_{O_2}]^{1/2} = (P_{CO_2}/P_{CO}) \exp(-(\Delta G^0/RT))$ , donde  $\Delta G^0$  es la energía libre de disociación del  $CO_2$ ,  $R$  es la constante universal de los gases,  $T$  es la temperatura y  $P_{O_2}$ ,  $P_{CO_2}$  y  $P_{CO}$  son las presiones parciales del oxígeno, del dióxido de carbono y el monóxido de carbono, respectivamente) como lo refieren Bracarense & Liu (1997) y Pokhonya *et al.* (1991). En las condiciones particulares de este trabajo, la concurrencia frente a altos contenidos de  $MnO_2$  no manifiesta el efecto de aporte al potencial de oxígeno del  $CaCO_3$ , razón por la cual hacia la arista  $X_2$ - $X_3$  (Figura 2) las tasas de fusión disminuyen.

En la Figura 3 se muestran las isolíneas de comportamiento de la tasa de deposición (en g/min), en dependencia de los contenidos de pirolusita ( $X_1$ ), (caliza+fluorita) ( $X_2$ ) y FeCrMn ( $X_3$ ) en el revestimiento aplicado. Se hace evidente que la tendencia de comportamiento de la tasa de deposición tiene, de modo general, una tendencia inversa a las tasas de fusión de la Figura 2 y que, por tanto, la disociación de la pirolusita ( $X_3$ ) juega también aquí un papel gobernante.

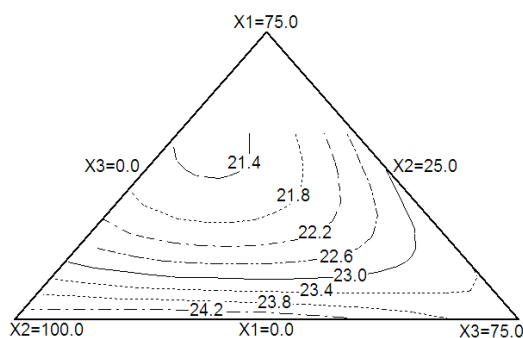


Figura 3. Efecto de la composición del revestimiento sobre la tasa de deposición.

Las menores tasas de deposición hacia los mayores valores de pirolusita ( $X_1$ ), cuando  $X_3$  (FeCrMn) tiende a su valor mínimo, se explican por la posible alta pérdida por oxidación ( $2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$ ), al tiempo que no se verifican las reacciones de desoxidación ( $2\text{Mn} + \text{O}_2 = 2\text{MnO}$ ,  $\text{Si} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$ ) con su consecuente mayor aporte de energía, ni la aleación del metal con Cr y Mn, fundamentalmente. Para los mayores valores de tasa de deposición en la Figura 3, tendientes hacia la arista  $X_2$ - $X_3$ , la explicación está ante todo por los menores valores de pirolusita ( $X_1$ ), que de un lado lleva a menores pérdidas por oxidación a causa de un menor potencial de oxígeno y de otro el efecto endotérmico es menor por lo que hay un aprovechamiento más efectivo de la energía. De otra parte, los altos niveles de caliza y fluorita en esta región contribuyen a un mayor índice de basicidad que favorece la transferencia más efectiva de elementos químicos al baño de soldadura.

El comportamiento del rendimiento (en %), en función de los contenidos de pirolusita ( $X_1$ ), (caliza+fluorita) ( $X_2$ ) y FeCrMn ( $X_3$ ) en el revestimiento aplicado, se muestra en la Figura 4 y, además, se advierte que, de modo general, el rendimiento tiene una tendencia relativamente definida de carácter inverso al comportamiento de las tasas de fusión de la Figura 2, lo cual es un indicio de que aquí también el papel gobernante lo desempeña la pirolusita ( $X_1$ ). Toda vez que el rendimiento (Figura 4) es el resultado de la relación de las tasas de deposición y de fusión, este se



define por los mismos fenómenos arriba abordados en el análisis de las Figuras 2 y 3.

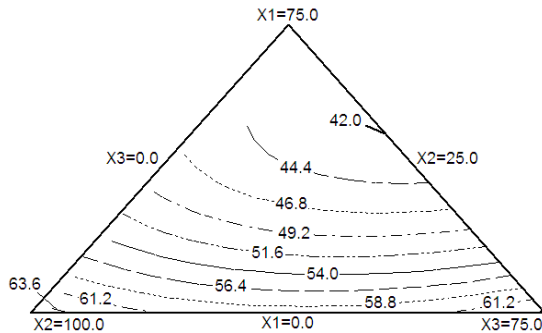


Figura 4. Efecto de la composición del revestimiento sobre el rendimiento.

### 3.2. Comportamiento de la geometría de los cordones

En las Figuras 5 y 6 se muestra la tendencia de comportamiento de la profundidad de penetración y el ancho del cordón (en mm), en función de los contenidos de pirolusita ( $X_1$ ), (caliza+fluorita) ( $X_2$ ) y FeCrMn ( $X_3$ ) en el revestimiento aplicado.

En la Figura 5 es visible la tendencia a disminuir la penetración con la disminución del contenido de pirolusita ( $X_1$ ) en el revestimiento, lo cual se asocia a una disminución del potencial de oxígeno y con ello del aporte térmico de las reacciones de oxidación exotérmicas abordadas en el análisis del comportamiento de las tasas de fusión.

Ello explica que en dicha figura los mayores valores de profundidad de penetración se enmarcan donde se combinan los más altos contenidos de pirolusita ( $X_1$ ), con los mayores valores posibles de FeCrMn ( $X_3$ ), para la condición de máxima pirolusita; o sea, tendiente a la arista  $X_1$ - $X_3$ .

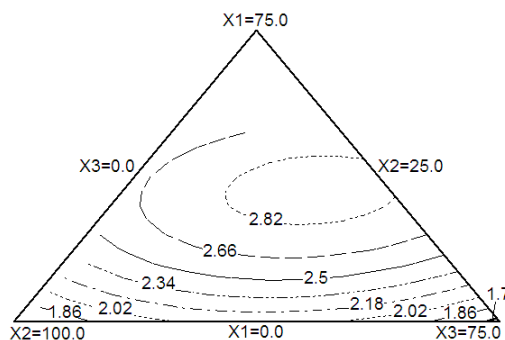


Figura 5. Efecto de la composición del revestimiento sobre la penetración del cordón.

En la Figura 2 las tasas de fusión presentan una tendencia similar a la de la penetración en la Figura 5, siendo esto un indicio de que los fenómenos que gobiernan la fusión son los que, al mismo tiempo, condicionan el comportamiento de la penetración. Tal correspondencia de

la tendencia de comportamiento de la penetración del cordón con las tasas de fusión coincide con lo reportado por Allen, Olson & Frost (1998). Otro hecho a considerar que podría esclarecer el comportamiento de la penetración es que según aumenta la tasa de deposición (en la dirección de disminución de la pirolusita ( $X_1$ )) en la Figura 3, la penetración en la Figura 8 disminuye, lo cual podría estar asociado a que en la medida que aumenta la masa de metal que se deposita en la unidad de tiempo se interfiere más la acción directa del arco en el fondo de la posa de fusión, similar al efecto que ejerce la velocidad de soldadura para el proceso MIG/MAG, claramente reflejado por Scotti & Ponomariev (2008).

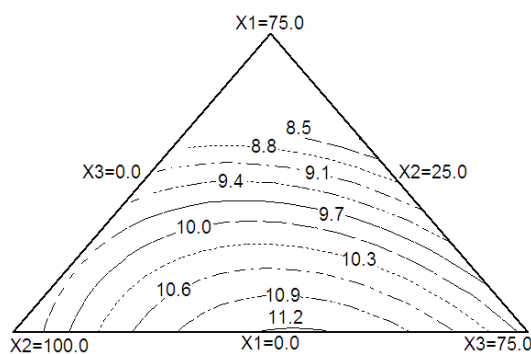


Figura 6. Efecto de la composición del revestimiento sobre el ancho del cordón.

Por su parte, el ancho del cordón en la Figura 6 muestra una tendencia contraria a la penetración; o sea, el aumento del contenido de pirolusita en el revestimiento ( $X_1$ ) lo hace disminuir, siendo los mayores valores de ancho en la región cuando  $X_1 \approx 0$  %,  $X_2 \approx 62,5$  % y  $X_3 \approx 37,5$  % y los menores en la región tendiente a la arista de 25 %  $X_2$ , cuando  $X_1$  y  $X_2$  se enmarcan en el entorno de 50 % y 25 %, respectivamente. El aumento del ancho con la disminución del contenido de pirolusita en el revestimiento ( $X_1$ ) en la Figura 6 coincide, de manera general, con el aumento de la tasa de deposición cuando aumenta el contenido de pirolusita ( $X_1$ ) (Figura 3), lo cual puede asociarse a que un mayor volumen de metal está siendo distribuido lateralmente. Sobre tal distribución lateral del metal depositado contribuye el hecho de que el arco incide directamente sobre dicho metal, favoreciendo su calentamiento y con ello su fluidez.

El comportamiento de la altura de refuerzo del cordón (en mm), en función de los contenidos de pirolusita ( $X_1$ ), (caliza+fluorita) ( $X_2$ ) y FeCrMn ( $X_3$ ) en el revestimiento aplicado, se muestra en la Figura 7. Este parámetro manifiesta una tendencia mucho menos nítida que la mostrada por la penetración y el ancho, lo cual, de modo general, coincide con lo reportado por De Rissone y colaboradores (2002) al abordar el efecto de

determinados componentes del revestimiento sobre la geometría del cordón.

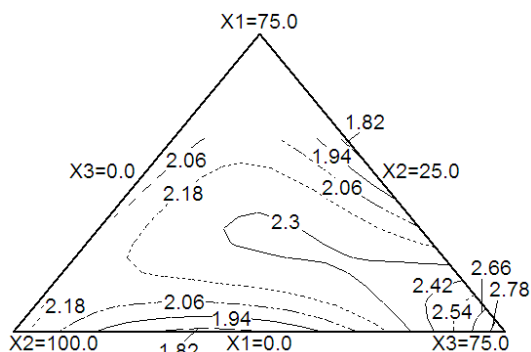


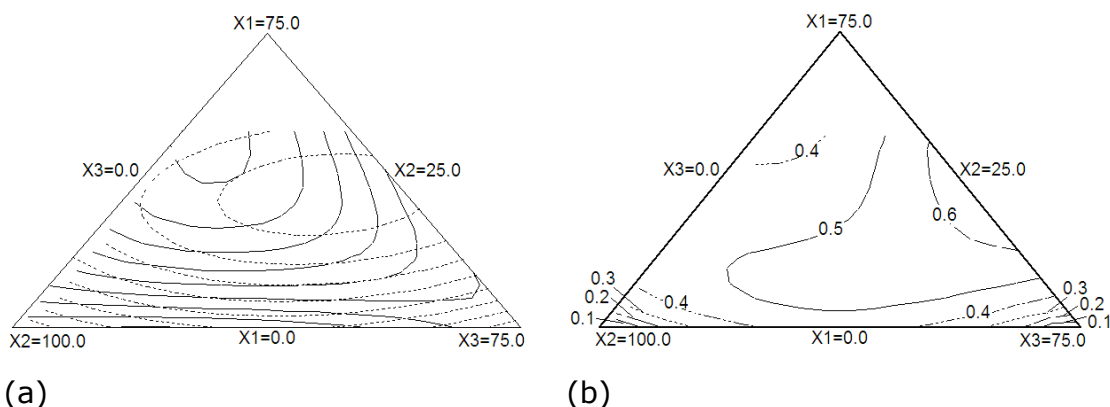
Figura 7. Efecto de la composición del revestimiento sobre la altura de refuerzo del cordón.

### 3.3. Selección de la región de mejores resultados

Se parte del hecho de que en el estudio del efecto de varias variables de composición del revestimiento periférico del electrodo (pirolusita ( $X_1$ ), caliza+fluorita ( $X_2$ ) y FeCrMn ( $X_3$ )), en el cual se evalúan diferentes respuestas, se dan tendencias de comportamientos de carácter contrario, o sea, que en la misma dirección que se favorece una respuesta dada puede afectarse el mejoramiento de otra. Por tanto, definir criterios que se integren para establecer la región de mejores resultados dentro del área experimental constituye la vía adecuada para definir en el entorno de qué zona estarían los resultados integrales más deseados.

Toda vez que la pretención fundamental de adición de la pirolusita ha estado dirigida hacia la búsqueda de mayores niveles de penetración por aumento del potencial de oxígeno, lo cual se ha vinculado a su vez a la adición de FeCrMn como aportador de desoxidante y de elementos de aleación, así como la adición de caliza+fluorita, un criterio de respuesta a jerarquizar debe ser la profundidad de penetración. De otra parte, la tasa de deposición constituye un criterio de relevancia para valorar la productividad cuando se suelda con un electrodo dado, la cual obviamente se vincula a los parámetros de transferencia metálica. Por tanto, se ha decidido también jerarquizar la tasa de deposición como criterio para la definición de la región de mejores resultados.

Tomando como partida las isolíneas de tendencia de la tasa de deposición y de la profundidad de penetración en función de los contenidos de pirolusita ( $X_1$ ), caliza+fluorita ( $X_2$ ) y FeCrMn ( $X_3$ ) en el revestimiento aplicado, se superponen las isolíneas de ambas propiedades (Figura 8a) y se obtiene el comportamiento de una "Función Deseo", que integra a ambas, tal como se muestra en la Figura 8b.



(a)

(b)

Figura 8. a) Superposición de isolíneas de tasa de deposición (líneas continuas) y de profundidad de penetración del cordón (líneas discontinuas). b) Isolíneas de comportamiento de la "Función Deseo".

En la Figura 8b se observa que la región de mejores resultados integrales se ubica hacia la arista  $X_2 \approx 25\%$ , en el rango aproximado de 25-50 % de pirolusita ( $X_1$ ) y 25-50 % de FeCrMn ( $X_3$ ) en el revestimiento periférico, hacia donde tienden los mayores valores de la "Función Deseo". En la Figura 3 se observa que la tasa de deposición en esta región, definida por la Figura 8b como de mejores resultados de la "Función Deseo", se mueve en el entorno de 22,0-23,0 g/min, que se corresponde con un valor medio dentro de los obtenidos para esta propiedad, como lo muestra la referida Figura 3. De otra parte, en la Figura 5 la profundidad de penetración muestra sus mayores valores (en el entorno de 2,82 mm) hacia la región definida por la Figura 8b como de mejores resultados de la "Función Deseo".

A manera de establecer un criterio comparativo fueron evaluadas la tasa de deposición y la profundidad de penetración (propiedades jerarquizadas para establecer la región de mejores resultados) del electrodo AWS E 7018 de igual diámetro de núcleo que de los electrodos experimentales, pero sin revestimiento periférico.

La tasa de deposición de 21,69 g/min (con un rendimiento de 70,28 %) obtenida para el electrodo AWS E 7018, sin revestimiento periférico aplicado, muestra valores levemente inferiores a los correspondientes con los obtenidos con los electrodos experimentales (en el entorno de 22,0-23,0 g/min) en la región de mejores resultados para la "Función Deseo" (Figuras 3 y 8b). El hecho de que el rendimiento del electrodo sin revestimiento aplicado sea superior es obvio, ya que la relación másica del revestimiento total (altamente representado por formadores de escorias y gases), en relación al núcleo metálico para estos electrodos, es menor.

La profundidad de penetración es de 1,82 mm para el cordón obtenido con el electrodo AWS E 7018 sin revestimiento periférico aplicado. En la Figura 9 (a y b) se muestran las macrografías de los depósitos para el electrodo AWS E 7018 sin revestimiento periférico, usado como referencia y para el electrodo con revestimiento periférico aplicado (c) (50 % de pirolusita, 25 % de caliza+fluorita y 25 % de FeCrMn (Figura 1) (se ha tomado el electrodo (c) para la comparación de las macrografías, ya que este revestimiento se enmarca dentro de la región definida como de mejores resultados por la "Función Deseo" en la Figura 8b). Como se hace visible en las Figuras 6 y 9, la profundidad de penetración del cordón muestra valores inferiores para el electrodo comercial sin revestimiento aplicado en comparación a los experimentales en la región definida de mejores resultados.

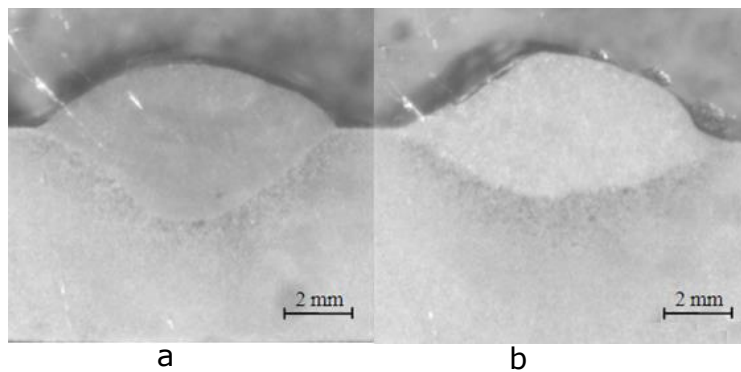


Figura 9. Macrografía de depósitos. a) Electrodo con revestimiento aplicado; b) electrodo AWS E 7018.

Otro elemento implícito en el factor profundidad de penetración es el "perfil de penetración". Como se muestra en la Figura 9, el perfil de penetración del electrodo AWS E 7018 sin revestimiento periférico aplicado es más redondeado si se le compara con el electrodo AWS E 7018 con revestimiento periférico aplicado, el cual tiene un perfil en forma de "pera". Tal diferencia podría estar vinculada a que en la medida que en la columna del arco se encuentran elementos que dificultan la conductividad térmica, el perfil de penetración se manifiesta más profundo en el centro y menos profundo en los extremos. La atmosfera del arco del electrodo AWS E 7018, con revestimiento periférico aplicado, presenta elementos como el cromo, el manganeso y el calcio en contenidos superiores al electrodo AWS E 7018 sin revestimiento periférico, lo cual afecta la conductividad térmica del arco y conduce a un perfil menos redondeado.

Lo planteado en relación a la comparación de la tasa de deposición y la profundidad de penetración del electrodo AWS E 7018 sin revestimiento

periférico aplicado, usado como referencia y los electrodos con revestimiento periférico, enmarcados en la región de mejores resultados de la "Función Deseo" (25-50 % de pirolusita, ~25 % de (caliza+fluorita) y 25-50 % de FeCrMn (Figura 8b), es un criterio de que se logra una mejora del desempeño con la aplicación del revestimiento periférico. El aumento de la profundidad de penetración garantiza la posibilidad de soldar espesores mayores con un mismo nivel de corriente sin riesgos de defectos de falta de penetración. También, el perfil en forma de "pera" del electrodo con revestimiento aplicado (Figura 9) se asocia a una menor zona de influencia térmica y una menor dilución en comparación al perfil redondeado del electrodo AWS E 7018 sin revestimiento periférico aplicado y, consecuentemente, a una mayor fiabilidad de las uniones soldadas y un mayor aprovechamiento del sistema de aleación del electrodo.

#### **4. CONCLUSIONES**

- La aplicación al electrodo AWS E 7018 de un revestimiento periférico (con una composición enmarcada en la región de 25-50 % de pirolusita, de 25 % de claiza+fluorita y 25-50 % de FeCrMn) modifica favorablemente su comportamiento, ya que aumenta la profundidad de penetración del cordón y hace que el perfil de este sea más estrecho, incidiendo positivamente sobre la fiabilidad de las uniones.
- Las tasas de fusión y deposición y el rendimiento son gobernadas por los procesos oxidativos exotérmicos, que son, a su vez, consecuencia de la relación entre la actividad de los elementos químicos presentes en el revestimiento y el potencial de oxígeno, relacionado este al contenido de pirolusita presente en el revestimiento.
- La profundidad de penetración y el ancho de los cordones manifiestan tendencias vinculadas a las tasas de fusión y deposición, siendo esto un indicio de que son también los procesos oxidativos exotérmicos los que gobiernan el comportamiento.

#### **5. AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a CAPES (Brasil) y al MES (Cuba) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo en el marco del convenio CAPES/MES. También agradecen a la M. Sc. Kenia Sota por su apoyo.

## 6. REFERENCIAS

- ALLEN, J. W.; OLSON, D. L. & FROST, R. H. 1998: Exothermically assisted Shielded Metal Arc Welding. *Welding Journal* 7: 277-285.
- ASTM E3-01. 2001: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.
- BRACARENSE, A. Q. & LIU, S. 1997: Chemical composition and hardness control by endothermic reactions in the coating of covered electrodes. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement* 76(12): 509-516.
- CRUZ-CRESPO, A.; QUINTANA, R.; PERDOMO, L.; GARCIA, L. L.; FORMOSO, A. & CORES, A. 2003: Caracterización de un mineral de manganeso para la utilización en la síntesis de fundentes para la soldadura automática. *Revista de metalurgia* 39(2): 114-122.
- CRUZ-CRESPO, A.; FERNÁNDEZ-FUENTES, R. & SCOTTI, A. 2010: 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* 19(5): 685-692.
- DE RISSONE, N. M. R.; FARIAS, J. P.; BOTT, I. S. & SURIAN, E. S. 2002: ANS/AWS A5.1-91 E6013 rutile electrodes: The effect of calcite. *Welding Journal* 81(7): 113-124.
- FARIAS, J. P.; SCOTTI, A.; BÁLSAMO, P. S. S. & SURIAN, E. S. 2004: The effect of wallastonite on operational characteristics of AWS E6013 Electrodes. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 26(3): 317-322.
- ISO 2401-72. 1972: Covered electrodes. Determination of the efficiency metal recovery and the deposition coefficient.
- PODGAYESKII, V. & KUZMIENKO, G. 1988: *Teoría de las escorias*. Ed. Naukova Dumka, Kiev, 255 p.
- POKHONYA, I. K.; GORPENCHYUK, V. N.; MILICHENKO, S. S.; PONOMARIEV, V. E.; STARODUBTSEV, L. V. & SHVANCHKOV, V. I. 1991: *Welding arc stability. metallurgy of arc welding. Vol 1. Arc stability and electrode melting*. Abington, Cambridge. 246 p.
- RAHIMI, E.; FATTAHI, M.; NABHANI, N. & VAEZI, M. R. 2011: Improvement of impact toughness of AWS E6010 weld metal by adding TiO<sub>2</sub> nanoparticles to the electrode coating. *Materials Science and Engineering: A* 528(27): 8 031-8 039.
- SCOTTI, A. & PONOMARIEV, V. 2008: *Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho*. Ed. Artliber, São Paulo, 284 p.

- SHAM, K. & LIU, S. 2014: Flux coating development for SMAW consumable electrode of high nickel alloys. *Welding Journal* 8: 271-281.
- SHARMA, C.; SHARMA, A. & SHARMA, P. 2014: Investigation of SMAW joints by varying concentration of rutile (TiO<sub>2</sub>) in electrode flux. *International Journal of Engineering Research and General Science* 2(5).
- SOUZA, S. M. & SCOTTI, A. 1996: Computerized characterization of coated electrode manufacturing defects. En: Proceedings of the XXII<sup>th</sup> National Meeting on Welding Technology. Blumenau, Brazil, ABS, July: 133-143.
- YAROVCHUK, A. V. 2005: Effect of ferrochrome content on the oxidation-reduction processes in welding slags based on titanium dioxide. *Welding International* 19(8): 651-656.
- YAVDOSHCIN, I. R.; SKORINA, N. V.; MARCHENKO, A. E.; VAKOLYUK, Y. D. & PALTSEVICH, A. P. 2005: New electrodes for welding of carbon and low-alloyed steels. *The Paton Welding Journal* 3: 36-37.

**Amado Cruz-Crespo** [acruz@uclv.edu.cu](mailto:acruz@uclv.edu.cu)

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar e Investigador Auxiliar.  
Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

**Eduardo Manuel Díaz-Cedré** [edcedre@yahoo.com](mailto:edcedre@yahoo.com)

Doctor en Ciencias Técnicas. Fabricación y Tecnología en Soldadura  
S.A de C.V. Queretaro, México,

**Americo Scotti** [ascoti@ufu.br](mailto:ascoti@ufu.br)

Philosophical Doctor. Profesor Titular. LAPROSOLDA,  
Universidad Federal de Uberlândia, Brasil.