

Empleo de escorias de soldadura del sistema MnO-SiO_2 para la obtención de un nuevo fundente aglomerado aleado^(*)

A. Cruz*, R. Quintana*, L.L. García**, L. Perdomo*, G. Jiménez***, C.R. Gómez*,
F.J. Alguacil**** y A. Cores****

Resumen

El presente trabajo plantea la utilización de escorias de fundentes del sistema MnO-SiO_2 , procedentes del proceso de recuperación de rodillos de buldózer, mediante soldadura automática por arco sumergido, en la fabricación de fundentes aglomerado para relleno de soldadura con idénticos fines. Se realiza un estudio de conformación de la matriz del fundente mediante un diseño de experimentos de tipo *McLean Anderson* para una región restringida, estudiándose el comportamiento tecnológico de las diferentes mezclas, evaluándose, además, los resultados de las mejores variantes con carga aleante incluida, mediante una caracterización de los depósitos.

Palabras clave

Fundente. Relleno por arco sumergido. Escoria. Sistema MnO-SiO_2 .

Use of flux welding slag of the MnO-SiO_2 system for the obtaining of a new alloyed agglomerated flux

Abstract

This paper deals with the use of welding slags of the MnO-SiO_2 system fluxes, coming from the recovering by means of the submerged arc welding in the manufacturing of agglomerated fluxes for surfacing with the same propose. The composition of the matrix is studied by means of an experimental design in a restricted area of the *McLean Anderson* kind, the technological behaviour of the different mixtures is checked, and the results of the best types that have alloy charges included are analysed by a characterization of the weld.

Keywords

Flux. Submerged arc welding surfacing. Slag. MnO-SiO_2 system.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los procesos de recuperación de piezas por soldadura genera importantes cantidades de escorias que son desechadas por no tener un uso específico dentro de la industria. Entre estos procesos, la recuperación por soldadura automática por arco sumergido (SAW) produce volúmenes apreciables de escoria debido a las características específicas del proceso^[1 y 2].

La industria cubana ha utilizado para la soldadura SAW el fundente soviético AH - 348 y, en los últimos años, el sueco OK Flux 1040 y el alemán

F 103, los cuales están formados por un sistema de óxidos del tipo $\text{SiO}_2\text{-MnO}$ ^[3-5], por lo que, los mayores volúmenes de escorias producidos corresponden a estos tipos de fundentes. Estas escorias conservan el sistema de óxidos mayoritarios ($\text{MnO} + \text{SiO}_2$) > 60 %, lo que hace posible su aprovechamiento, a pesar de tener valores algo elevados de óxido de hierro, fósforo y azufre en relación con los fundentes de este sistema^[1].

La planta "Eduardo Reyes Canto", del sector de la construcción en Cuba, tiene el taller de recuperación de rodillos de *bulldózer*, donde se realiza el restablecimiento de la vida útil a los rodillos, que

(*) Trabajo recibido el 14 de julio de 2003 y aceptado en su forma final el día 15 de septiembre de 2004.

(*) Centro de Investigaciones de la Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Carretera a Camajuaní, km 51/2, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

(**) Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME), Avda. 51, 23611, esq. 240, La Lisa, Marianao, Ciudad de La Habana, Cuba.

(***) Centro de Investigaciones Siderúrgicas, La Pasa, Dique Norte, Nicaro, Holguín, Cuba.

(****) Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM/CSIC), Avda. Gregorio del Amo, 8, 28040 Madrid, España.

trabajan en condiciones de ligero impacto y alta abrasión [6].

Este taller almacena, desde hace varios años, las escorias de soldadura, contando en este momento con unas 20 toneladas, que se pueden aprovechar para el relleno superficial de piezas que trabajan bajo condiciones severas de desgaste abrasivo, como es el caso de los rodillos ya mencionados. Existen, además, otras empresas que han realizado operaciones similares y, en la actualidad, cuentan con volúmenes considerables de escorias de este sistema de óxidos. Por otra parte, en los minerales tipo óxido de manganeso tiende a predominar la pirolusita como fase mineralógica, lo cual implica dificultades en su empleo directo como materia prima para un fundente, ya que conlleva a la oxidación del baño de soldadura [7]. Ello exige, generalmente, un proceso de calentamiento de los minerales a unos 1.500 °C, para llevarlo, por disociación, a MnO (2MnO₂ = 2MnO + O₂), lo que comporta un consumo energético, y de un recurso natural que puede ser empleado en fines más estratégicos. Las escorias, son unos residuos sólidos que se adaptan más fácilmente para obtener fundentes aglomerados dadas sus características químico-físicas, constituyendo una materia prima ideal de bajo costo que solo requiere como operación previa una molienda [2 y 8].

La existencia de estos residuos da la posibilidad de valorar alternativas de uso en el propio proceso que les dio origen. Lo anterior puede lograrse realizando un reajuste de la composición química, con el objetivo de lograr propiedades adecuadas para el empleo en el relleno superficial por SAW de piezas que trabajan bajo condiciones severas de desgaste abrasivo.

En el presente trabajo continua la colaboración entre el Centro de Investigaciones de la Soldadura de Cuba y el CENIM para la utilización, en soldadura, de diversos minerales cubanos [9-12].

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Caracterización de la escoria

A una muestra de las escorias del taller "Eduardo Reyes Canto" se le determinó la composición química por vía húmeda (Tabla I), representada por los óxidos mayoritarios del sistema ternario SiO₂-MnO-CaO [13], con relaciones SiO₂ : MnO : CaO = 47,44 : 34,31 : 18,25 que lo ubican en la zona de la wollastonita entre las isoterms de 1.353 a 1.400 °C.

A partir de la composición química de la escoria se determinó su basicidad (B) y la actividad química relativa (A_f), mostrados en la tabla II, empleando para ello las expresiones (1) y (2) [14]:

De los resultados anteriores se calcularon las actividades químicas relativas (A_{MnO}, A_{SiO₂}) y termodinámicas (a_{MnO}, a_{SiO₂}) del MnO y SiO₂, respectivamente, según las ecuaciones (3) y (4) [15].

$$B = \frac{0,018\text{CaO} + 0,025\text{MgO} + 0,006\text{CaF}_2 + 0,014(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) + 0,007(\text{MnO} + \text{FeO})}{0,017\text{SiO}_2 + 0,005(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)} \quad (1)$$

$$A_f = \frac{(\text{SiO}_2) + 0,5(\text{TiO}_2) + 0,4(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2) + 0,42 B^2(\text{MnO})}{100 B} \quad (2)$$

donde, (SiO₂), (TiO₂), etc., representan los contenidos de los componentes del sistema, % en masa.

Los resultados de los valores obtenidos de la basicidad y actividades del sistema y los óxidos vienen reflejados en la tabla II.

En la composición química se observa que, de acuerdo al sistema ternario SiO₂-MnO-CaO (Fig. 1), la escoria presenta buenas propiedades de fusibilidad [13]. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el contenido de 7,66 % Al₂O₃ para un contenido tan bajo de CaF₂, asociado al valor de relación O:(Si + Al) = 3,614, que responde a un silicato influenciado por la presencia de aluminio, puede contribuir a la formación de aniones voluminosos de enlaces fuertes (puede aparecer [Si_xAl_yO_z]^{W-}). En este caso, puede estar debilitada la energía de atomización de los aniones por la presencia de cationes Ca²⁺ y Mn²⁺, ya que éstos se

$$A_{\text{SiO}_2} = (\text{SiO}_2)_F / (100B);$$

$$A_{\text{MnO}} = 0,42(\text{MnO})_F / 100B \quad (3)$$

$$a_{\text{SiO}_2} = 0,018 + 0,52 A_{\text{SiO}_2};$$

$$a_{\text{MnO}} = 0,0036 + 0,143 A_{\text{MnO}} \quad (4)$$

En la composición química se observa que, de acuerdo al sistema ternario SiO₂-MnO-CaO (Fig. 1), la escoria presenta buenas propiedades de fusibilidad [13]. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el contenido de 7,66 % Al₂O₃ para un contenido tan bajo de CaF₂, asociado al valor de relación O:(Si + Al) = 3,614, que responde a un silicato influenciado por la presencia de aluminio, puede contribuir a la formación de aniones voluminosos de enlaces fuertes (puede aparecer [Si_xAl_yO_z]^{W-}). En este caso, puede estar debilitada la energía de atomización de los aniones por la presencia de cationes Ca²⁺ y Mn²⁺, ya que éstos se

Tabla I. Composición química de las escoria de soldadura, % en masa

Table I. Chemical composition of the welding slag, % in mass

SiO ₂	MnO	CaO	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaF ₂	TiO ₂	K ₂ O + Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
34,78	25,15	13,38	7,66	5,66	3,88	1,31	1,43	1,41	0,11	< 0,1

Tabla II. Basicidad y actividades del sistema de óxidos de la escoria de soldadura

Table II. Basicity and activities of the oxides system of the welding slag

B	A	A _{MnO}	A _{SiO₂}	a _{MnO}	a _{SiO₂}
0,913	0,432	0,0964	0,3811	0,0171	0,2162

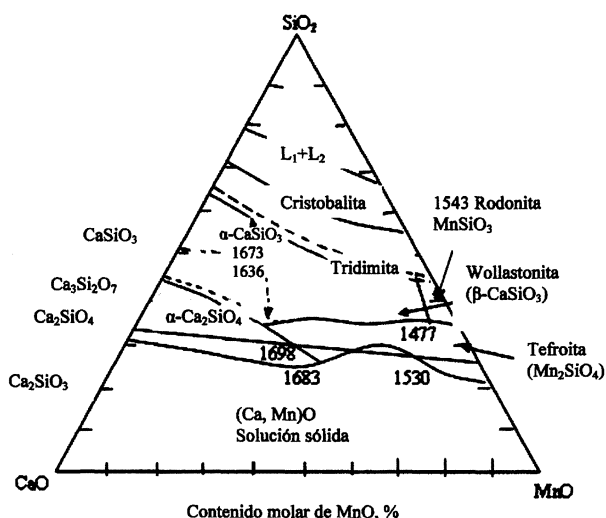


Figura 1. Sistema ternario de óxidos SiO₂-MnO-CaO.

Figure 1. Ternary oxides system SiO₂-MnO-CaO.

sitúan en los intersticios dispuestos en la vecindad de las agrupaciones.

Es importante, también, considerar los valores de basicidad y actividad. El sistema activo $A_f = 0,43$ (según Potapov, el sistema es activo^[14] cuando $0,3 \leq A_f \leq 0,6$) y de carácter ligeramente ácido ($B = 0,91 < 1$) presenta una actividad del manganeso limitada ($a_{MnO} = 0,0171$) y, en consecuencia, alta actividad del silicio ($a_{SiO_2} = 0,2162$), lo que define las condiciones de transferencia de los elementos al depósito de soldadura.

El alto contenido de FeO en la escoria es otro aspecto de sumo interés por su participación directa en los fenómenos de la interfase metal-escoria, provocando dificultades relacionadas con el desprendimiento de la costra de escoria^[3 y 5].

2.2. Diseño experimental de mezclas

Sobre la base de los razonamientos anteriores, se realizó una reformulación de la composición de la escoria, dirigida a obtener una nueva composición matricial por mezclado de polvos, para la obtención de un fundente con buenas propiedades tec-

nológicas y metalúrgicas, mediante la adición de caliza y fluorita.

La caliza, al aportar CaO, mejora la transferencia del manganeso y limita la del silicio, participando activamente en el afino (defosforación y desulfuración), mediante la reducción de los enlaces Si-O en el fundido de silicato, aumentando la tensión superficial del fundido. Sobre las dimensiones de las agrupaciones, si se tiene en cuenta la relación $O:(Si + Al) = 3,614$, la influencia del CaO puede tener un límite, justamente, cuando $O:(Si + Al) = 4$, pero su efecto positivo sobre la estabilidad del arco y sobre el coeficiente de dilatación lineal de la escoria pueden justificar su incremento más allá de tal circunstancia. Por otra parte, la fluorita (CaF₂) posee un efecto dual sobre los enlaces Si-O al aportar Ca²⁺ y F⁻; este último, con tamaño próximo al del O²⁻, por lo que lo sustituye en la estructura del silicato. El F⁻ al interactuar con el silicio forma fluoruros volátiles que disminuyen los enlaces Si-O. Todo ello, hace que se pueda controlar convenientemente la fluidez del fundido y contrarrestar los efectos de la alúmina sobre la viscosidad, mejorando la interacción metal-escoria. Además, se debe destacar que la fluorita ejerce influencia sobre la estructura, ya que el CaF₂ también contribuye a disminuir la temperatura de fusión.

El estudio de la influencia de estas adiciones se hace mediante un diseño experimental, del tipo *McLean Anderson*, para una región restringida, donde deben cumplirse las siguientes condiciones de contorno^[1 y 5], dirigidas a seleccionar la mejor mezcla para la soldadura:

$$\begin{aligned} X_1 - \text{Fluorita} & 0,05 \leq X_1 \leq 0,15 \\ X_2 - \text{Caliza} & 0,05 \leq X_2 \leq 0,15 \\ X_3 - \text{Escoria} & 0,70 \leq X_3 \leq 0,90 \end{aligned}$$

Las respuestas a evaluar son:

$$\begin{aligned} Y_1 - \text{Contenido de Mn en el depósito, \%} \\ Y_2 - \text{Contenido de Cr en el depósito, \%} \\ Y_3 - \text{Contenido de C en el depósito, \%} \end{aligned}$$

Para todas las mezclas debe cumplirse la condición de normalidad, es decir

$$\sum_{i=1}^q X_i = 1$$

La cantidad de experiencias a realizar se establece como $N = q * 2^{q-1} = 12$, siendo, "q" el

número de componentes^[16]. Como resultado de la aplicación de la condición de normalidad y las condiciones de contorno, la matriz original se reduce a cuatro experiencias que corresponden, geoméricamente, a los cuatro vértices del paralelogramo que define la región experimental, como muestran la figura 2 y la tabla III. Para completar el experimento se adicionan cuatro puntos en el centro de las caras y uno en el centroide de la región, de tal modo que deben realizarse nueve experiencias (Tabla III y Fig. 2).

2.3. Obtención de fundentes

Las mezclas se realizaron para una masa de 2.000 g ($X_1 + X_2 + X_3$) de carga total, con una carga aleante fija compuesta por 1 % grafito; 6,7 % FeMn, 6 % FeCr y 2,2 % FeSi^[2 y 6]. Se mezclaron los componentes en un tambor giratorio durante 30

Tabla III. Valores de las variables dependientes del diseño de experimento

Table III. Values of the dependents variables of the experimental design

Variante	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ , g	X ₂ , g	X ₃ , g
a	0,05	0,15	0,80	100	300	1600
b	0,15	0,15	0,70	300	300	1400
c	0,15	0,05	0,80	300	100	1600
d	0,05	0,05	0,90	100	100	1800
ab	0,10	0,15	0,75	200	300	1500
bc	0,15	0,10	0,75	300	200	1500
cd	0,10	0,05	0,85	200	100	1700
da	0,05	0,10	0,85	100	200	1700
abcd	0,10	0,10	0,80	200	200	1600

Tabla IV. Composición química de las matrices de los fundentes obtenidos, % en masa

Table IV. Chemical composition of the matrixes of obtained fluxes, % in mass

No	SiO ₂	MnO	CaO	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaF ₂	TiO ₂	K ₂ O+Na ₂ O	P ₂ O ₅
a	37,33	19,60	18,46	5,97	4,41	3,02	5,70	1,11	4,31	0,08
b	33,93	17,13	17,14	5,22	3,85	2,64	14,90	0,97	4,17	0,07
c	35,89	18,85	12,60	5,74	4,24	2,91	14,47	1,07	4,14	0,08
d	39,20	21,23	13,87	6,46	4,78	3,27	5,61	1,20	4,28	0,09
ab	35,62	18,36	17,80	5,59	4,13	2,83	10,30	1,04	4,24	0,08
bc	34,92	18,00	14,83	5,48	4,05	2,78	14,68	1,02	4,15	0,07
cd	37,54	20,04	13,24	6,10	4,51	3,09	10,04	1,13	4,21	0,08
da	38,28	20,43	16,12	6,22	4,60	3,15	5,65	1,16	4,29	0,08
abcd	36,60	19,21	15,47	5,85	4,32	2,96	10,17	1,09	4,22	0,08

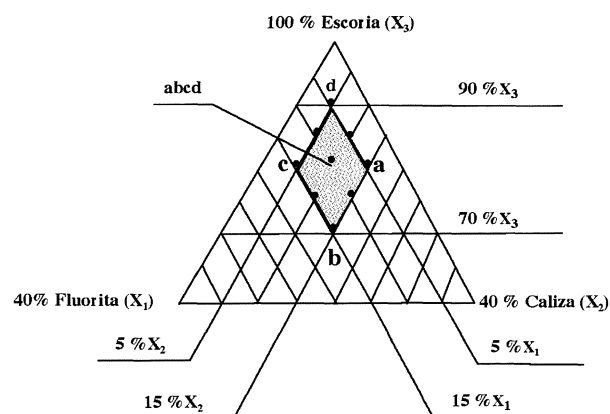


Figura 2. Representación gráfica de la zona experimental.

Figure 2. Graphic representation of the experimental zone.

min; posteriormente, la masa seca obtenida se aglomeró con un 30 % de silicato de sodio (módulo 2,5) y se peletizó. Los fundentes obtenidos se secaron a 120 °C, durante 2 h; se tamizaron a una granulometría de 0,25-2,5 mm y, luego, se calcinaron durante 2 h a 350 °C^[2, 6, y 17]. La composición química de las matrices de cada uno de los fundentes se muestra en la tabla IV.

A partir de los resultados de la composición química se determinaron las matrices, utilizando las expresiones (1), (2), (3) y (4), las basicidades y actividades químicas relativas de estas, así como las actividades químicas relativas (A_{MnO} , A_{SiO_2}) y termodinámicas (a_{MnO} , a_{SiO_2}) del MnO y SiO₂, cuyos valores aparecen en la tabla V.

2.4. Ensayos de soldadura

Con cada uno de los fundentes obtenidos se realizaron depósitos de tres cordones superpuestos, a fin

Tabla V. Basicidad y actividad química relativa de los fundentes obtenidos y actividades químicas relativas y termodinámicas de sus óxidos

Table V. Basicity and relative chemical activity of obtained fluxes and relative chemical and thermodynamic activities of their oxides

Fundente	B	A	A _{MnO}	A _{SiO₂}	a _{MnO}	a _{SiO₂}
a	1,00	0,49	0,0824	0,3736	0,0154	0,2123
b	1,10	0,50	0,0793	0,3736	0,0149	0,2123
c	0,94	0,43	0,0745	0,3376	0,0142	0,1936
d	0,86	0,42	0,0768	0,3377	0,0146	0,1936
ab	1,05	0,49	0,0809	0,3735	0,0151	0,2122
bc	1,02	0,46	0,0769	0,3552	0,0146	0,2027
cd	0,90	0,43	0,0757	0,3377	0,0144	0,1936
da	0,93	0,45	0,0797	0,3553	0,0150	0,2028
abcd	0,97	0,46	0,0783	0,3552	0,0148	0,2027

de atenuar el efecto de la dilución sobre planchas de acero al carbono. Se empleó una máquina *Mansfeld* de SAW, con un voltaje de arco de $U = 30$ V, intensidad $I = 350$ A y velocidad de soldadura $V_s = 20$ m/h [6]. Durante la soldadura se evaluó el comportamiento tecnológico según los criterios establecidos por D. Marcelo *et al.* [18]. El comportamiento de cada una de las mezclas (fundentes) no mostró variabilidad, siendo normal para este tipo de fundentes en todos los casos, tomando, en esta ocasión, como referencia el fundente comercial HF-600. Para evaluar el comportamiento metalúrgico en cada uno de los depósitos se determinó su composición química, que se muestra en la tabla VI. Sobre la base de la matriz experimental de la tabla III y los resultados de la tabla VI se realizó el procesamiento estadístico, obteniendo las ecuaciones de regresión siguientes:

$$Y_1 = 0,067X_2 + 0,364X_3$$

$$R^2_{(Ajustado)} = 99,93\%$$

$$Y_2 = 3,916X_1 + 4,316X_2 + 2,883X_3$$

$$R^2_{(Ajustado)} = 99,97\%$$

$$Y_3 = 0,0087X_1 + 0,0180X_2 + 0,059X_3$$

$$R^2_{(Ajustado)} = 99,92\%$$

A partir de los resultados de composición de los depósitos obtenidos y mostrados en la tabla VI, se seleccionó el fundente "b" como el que mejor respondía a los objetivos de este trabajo, al dar los mayores contenidos de Mn, Cr y C, a la vez que el

Tabla VI. Variables respuestas del comportamiento de las mezclas (fundentes) en la soldadura

Table VI. Answers variables of the behaviour of mixtures (fluxes) in the welding process

Variante	[Mn] Y ₁	[Cr] Y ₂	[C] Y ₃	[Si]	[P]	[S]
a	0,87	3,15	0,42	0,62	0,023	0,015
b	0,78	3,23	0,45	0,59	0,021	0,016
c	0,70	3,12	0,40	0,61	0,024	0,019
d	0,72	2,98	0,35	0,50	0,025	0,018
ab	0,85	3,20	0,44	0,59	0,021	0,015
bc	0,75	3,19	0,42	0,52	0,022	0,018
cd	0,72	3,05	0,35	0,50	0,025	0,019
da	0,84	3,10	0,41	0,55	0,024	0,016
abcd	0,78	3,15	0,42	0,52	0,023	0,017

fósforo y azufre se presentan con los valores más bajos.

Al depósito obtenido con el fundente de la mezcla "b", además de la composición química referida en la tabla VI, se le valoró la microestructura y determinó la dureza *Rockwell*. En la microestructura se observa martensita de agujas largas y la presencia de austenita residual. Las mediciones de dureza dieron como valor promedio 52 HRc. Los resultados de caracterización del depósito para el fundente "b" se corresponden, según [2 y 6], con un depósito para las condiciones de trabajo de desgaste abrasivo severo.

2.4.1. Ensayo de desgaste abrasivo de alto esfuerzo

Este ensayo se realiza para evaluar el comportamiento del depósito en condiciones severas de trabajo, lo que permite realizar valoraciones de cómo será su comportamiento en las condiciones de operación. La probeta se coloca en el brazo de la máquina de ensayo, asegurándose que la misma ejerza presión sobre la banda de goma del tambor que gira a velocidad constante. Un chorro de cuarzo cae, ininterrumpidamente, entre ambos elementos; este abrasivo provocará ralladuras y desgaste de las fases más blandas, concluyendo, por consiguiente, que se desprende por fractura la fase dura [2, 6 y 18].

El ensayo se realiza de forma comparativa entre el depósito obtenido con el fundente desarrollado y un depósito obtenido con el fundente comercial HF-600 [6].

Para conocer el desgaste se realiza un análisis gravimétrico, pesando la muestra antes y

después del ensayo y, por diferencia de masa, se estima la magnitud del desgaste. La prueba tiene una duración de 15 min, realizándose las pesadas a intervalos de 5 min. Al compararlo con la muestra obtenida con fundente HF-600, la resistencia al mecanismo de desgaste del depósito es 1,06 veces la resistencia del depósito obtenido con el fundente comercial.

Estos resultados permiten concluir que el depósito que se obtiene presenta características tribológicas para trabajar bajo condiciones de desgaste abrasivo, con buenos resultados en cuanto a durabilidad y fiabilidad^[6, y 18].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados de la tabla IV se observa que todos los fundentes obtenidos responden al sistema ternario SiO₂-MnO-CaO, incluido en la figura 1, con las relaciones presentadas en la tabla VII.

Como puede apreciarse, estas relaciones solo difieren de la relación para la escoria utilizada (Tabla I) como componente de mezcla en un contenido ligeramente menor de MnO y uno mayor de CaO. No obstante, su ubicación en el diagrama sigue enmarcándose en la región de la wollastonita, caracterizada por una baja temperatura de fusión, con una diferencia adecuada respecto al acero (menor en 250-300 °C)^[4]. Además, los valores de basicidad (Tabla V) de los fundentes se han mantenido prácticamente constantes. Sin embargo, las actividades han sufrido alteraciones, causadas por las variaciones de concentración. En ello, el aumento de CaO desempeña un papel fundamental por su influencia sobre la formación de compuestos más estables frente al SiO₂ con relación al MnO^[19], (Ec. (8)), lo que puede ser interpretado como una disminución de la actividad del SiO₂ y un aumento de la del MnO. Por otra parte, se han aumentado los contenidos de CaF₂, respecto a la escoria inicial, lo que también influye sobre las actividades del sistema y sus óxidos, al formar sili-

catos estables y fluoruros volátiles, según la ecuación (9). No obstante, al observar la composición de los fundentes (Tabla IV), en relación a la escoria utilizada como componente de mezcla (Tabla I), se observa que la adición de SiO₂, en forma de silicato de sodio, como aglutinante, presenta una tendencia al aumento del SiO₂, aunque atenuada por la presencia de CaO y CaF₂.



Lo expuesto, respecto a las relaciones de concentración, ha provocado variaciones apreciables en la estructura de los fundentes, con una tendencia clara a la formación de agrupaciones mayores respecto a la escoria según las relaciones O:(Si + Al), con valores entre 2,18 y 2,32 (para los fundentes) y 3,61 para la escoria, como ya se señaló. Se debe destacar, que al realizar la determinación de la relación O:(Si+Al) no se tuvo en cuenta la influencia que ejerce el CaF₂ sobre los enlaces Si-O. Éste, provoca la ruptura de un número apreciable de puentes de oxígeno, tipo Si-O-Al-SiO y Si-O-Si, o sea, una disminución del grado de conexión mediante el efecto dual anteriormente referido. En otras palabras, dichas relaciones difieren algo respecto a la escoria y la estructura real y, en consecuencia, las propiedades físicas de los fundidos se adaptan favorablemente.

El predominio de la escoria en todas las mezclas asegura un comportamiento tecnológico satisfactorio. No obstante, la adición de caliza y fluorita favorecen de modo general este comportamiento, por su influencia sobre las propiedades físicas del fundido.

Sobre el contenido de manganeso en los depósitos, (tabla Tabla VI y Ec. (5)), todos los componentes ejercen una influencia positiva, siendo mayor el efecto de la escoria (X₃) por las influencias multicomponentes ya mencionadas, sobre todo su participación directa en los procesos *redox* del

Tabla VII. Relaciones porcentuales de los fundentes para el sistema mayoritario de óxidos

Table VII. Percentual ratios of the fluxes for the oxides majority system

Óxido	a	b	c	d	ab	bc	cd	da	abcd
SiO ₂	51,34	51,16	53,02	51,54	49,62	52,76	53,30	49,74	49,51
MnO	26,95	27,30	28,30	26,57	25,58	28,57	27,99	25,12	26,00
CaO	21,71	21,55	18,70	21,88	24,80	18,67	18,71	25,14	24,49

manganeso, al aportar MnO , junto a otros óxidos básicos, que equivale a aumentar su actividad. La caliza (X_2) influye de manera positiva por su influencia sobre la basicidad y, en consecuencia, sobre la actividad del MnO . Esto último queda más claro si se tiene en cuenta la tendencia del calcio a formar silicatos más estables que el manganeso, según la ecuación (8). La fluorita (X_1), por su parte, no ejerce influencia significativa en el rango evaluado, por lo que no aparece en el modelo de regresión.

La relación entre el contenido de manganeso del depósito y la actividad termodinámica queda representada por la figura 3, donde se observa el carácter, casi lineal, de esta dependencia.

El contenido de cromo (Y_4) está influenciado positivamente por todos los componentes, (Tabla VI y Ec. (6)), lo que se puede atribuir a las influencias multicomponentes de la escoria (X_3) y a la acción de la caliza (X_2) y la fluorita (X_1) sobre la basicidad. En la figura 4 se muestra la dependencia del contenido de cromo del depósito con la basicidad. Todo aumento de la basicidad se puede interpretar como una disminución del grado de conexión y, en consecuencia, la formación de agrupaciones menores que facilitan la interacción en la interfase metal-escoria y, como resultado, un paso más fácil del cromo al cordón $[\text{Cr}]$.

El carbono, por su parte, (Tabla VI y Ec. (7)), muestra el mismo carácter que el $[\text{Cr}]$, por lo que se puede atribuir a razones similares (Fig. 5, que muestra la dependencia del carbono en el depósito

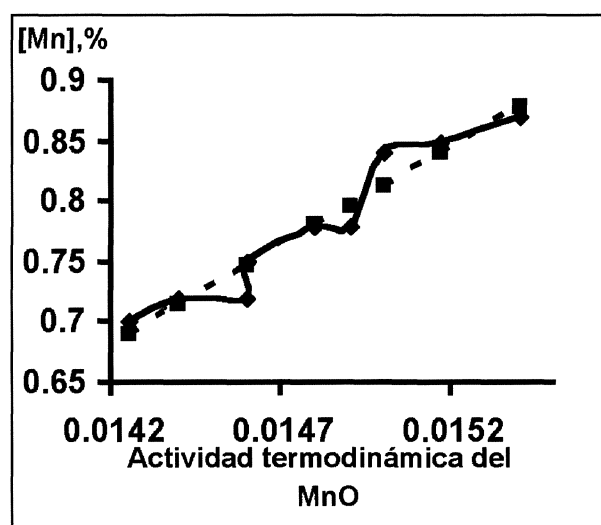


Figura 3. Contenido de Mn en el depósito vs actividad termodinámica del MnO (a_{MnO}).

Figure 3. Content of Mn in the deposit vs thermodynamic activity of the MnO (a_{MnO}). $[\text{Mn}] = -1,637 + 163,3 \cdot a_{\text{MnO}}$; $R^2 = 93,4 \%$.

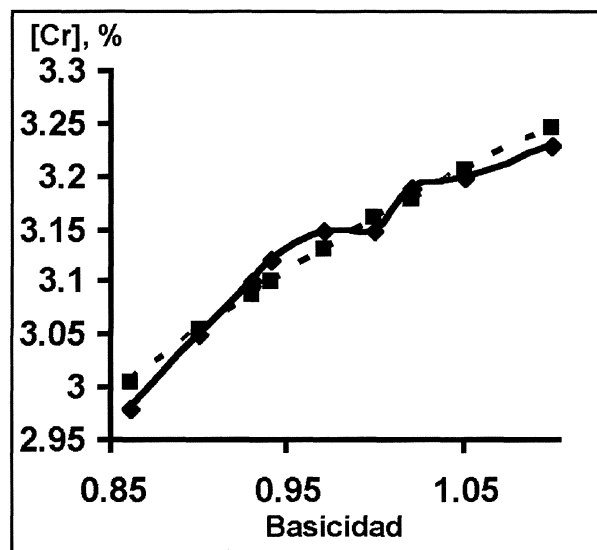


Figura 4. Contenido de cromo en el depósito vs basicidad del fundente.

Figure 4. Chromium content in the deposit vs basicity of the flux. $[\text{Cr}] = 4,118 - 0,957/B$; $R^2 = 95,7 \%$.

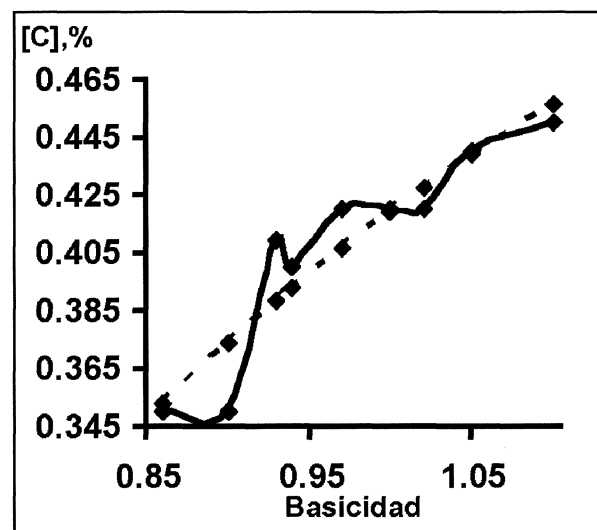


Figura 5. Contenido de carbono en el depósito vs basicidad del fundente.

Figure 5. Carbon content in the deposit vs basicity of the flux. $[\text{C}] = 0,830 - 0,410/B$; $R^2 = 86,4 \%$.

con la basicidad). Tanto el manganeso como el cromo, en las ferroaleaciones, aparecen en forma de carburos lo que hace que, éstos, al pasar al metal arrastren consigo al carbono favoreciendo su transferencia. Tal es así que, el fundente de mayor contenido de $[\text{Mn}] + [\text{Cr}]$ es el "b" (Tabla VI) y es, a su vez, el de mayor $[\text{C}]$. Esto, se muestra en la figura 6, donde el contenido de carbono en el depósito muestra un carácter creciente con el aumento de $[\text{Mn}] + [\text{Cr}]$.

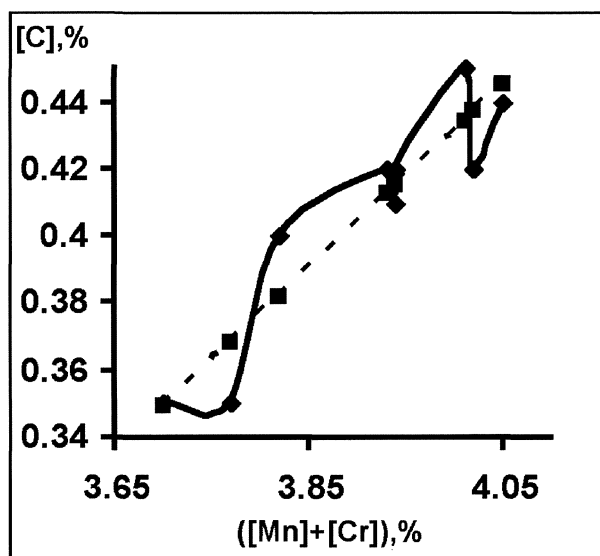
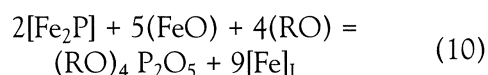


Figura 6. Contenido de carbono del depósito vs contenido de manganeso y cromo en el depósito.

Figure 6. Content of carbon of the deposit vs contained of manganese and chromium in the deposit. $[C] = -0,663 + 0,274 ([Mn] + [Cr])$; $R^2 = 86,7 \%$.

El contenido de silicio en el depósito se enmarca en los rangos aceptables, aunque no se aprecia una regularidad clara entre este elemento y la actividad de su óxido en el fundente. Esto se puede atribuir, por un lado, a su valor constante, no muy alto en el alambre, y al contenido de SiO₂, limitado a un rango estrecho, siempre elevado en todos los fundentes (33,93-39,2 %), que hacen que las condiciones de concentración en el sistema heterogéneo sean, prácticamente, invariables.

El fósforo en el depósito tiende a disminuir con el aumento de la basicidad del fundente, de acuerdo a los resultados de las tablas V y VI, como lo refleja la figura 7. Esto, se explica claramente por la ecuación (10), en la cual se advierte que la presencia de óxidos básicos juega un papel determinante en la defosforación.



donde, RO - óxidos básicos en el fundente.

Para el azufre en el depósito se observa una dependencia de la actividad del MnO (a_{MnO}) representada por la figura 8, obtenida a partir de los resultados de las tablas V y VI. Esta dependencia decreciente del contenido de azufre se explica por la ecuación (11) al mostrar la formación de MnS más estable que el FeS e insoluble en el acero, a diferencia de este último. La basicidad ejerce una

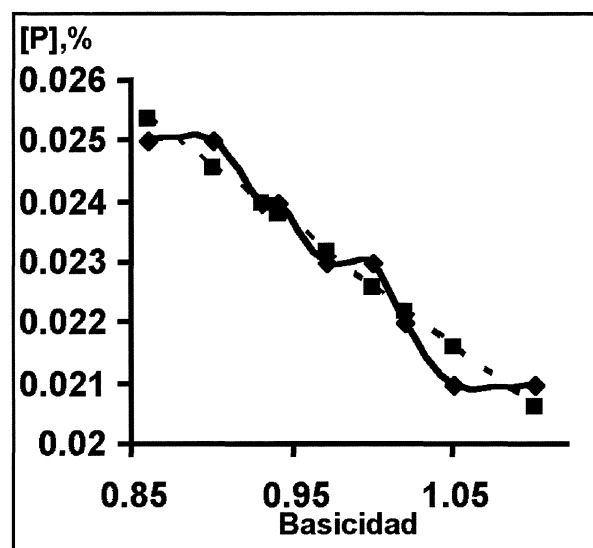


Figura 7. Contenido de fósforo en el depósito vs basicidad del fundente.

Figure 7. Phosphorus content in the deposit vs basicity of the flux. $[P] = 0,0423 - 0,0197 B$; $R^2 = 94,1 \%$.

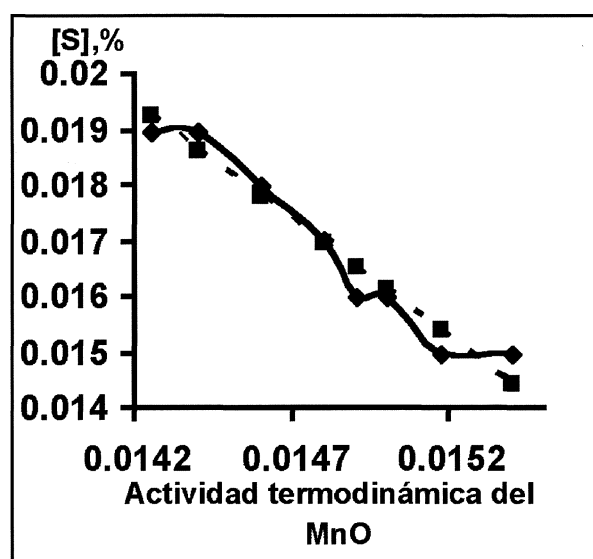
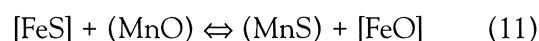


Figura 8. Contenido de azufre en el depósito vs actividad termodinámica del MnO (a_{MnO}) en el fundente.

Figure 8. Content of sulphur in the deposit vs thermodynamic activity of the MnO (a_{MnO}) in the flux. $[S] = 0,079 - 4,170 (a_{MnO})$; $R^2 = 94,66 \%$.

doble influencia sobre el azufre, por un lado, debido a su acción sobre la actividad del MnO favoreciendo el proceso de la ecuación (6) y, por otro, al actuar los óxidos básicos directamente como desulfurantes.



La resistencia relativa al desgaste (1,06), por su proximidad a 1, demuestra que es factible la aplicación del fundente obtenido en la recuperación de piezas que trabajan bajo desgaste abrasivo severo [2 y 20], es solo un 6 % inferior a la resistencia del fundente comercial HF-600.

4. CONCLUSIONES

- Las escorias residuales de fundentes del sistema MnO-SiO₂ son aprovechables como fuente de materias primas para la formulación de nuevos fundentes para la recuperación de piezas de soldadura por arco sumergido, al conservar los componentes mayoritarios del sistema MnO, SiO₂ y CaO, ubicándose en la región de la wollastonita en el sistema ternario de óxidos.
- La mezcla matriz, que contiene 15 % caliza, 15 % fluorita y 70 % escoria (fundente b) presenta las mejores propiedades de comportamiento metalúrgico, entre las estudiadas, para la recuperación de piezas que trabajan al desgaste abrasivo severo, formando un depósito con 0,78 % Mn, 3,23 % Cr y 0,45 % C, una dureza cercana a los 52 HRc y una adecuada resistencia al desgaste.
- Los contenidos de manganeso, cromo y carbono tienden a crecer con la basicidad del fundente, mientras que el fósforo y el azufre disminuyen. En los depósitos se observa una dependencia creciente del contenido de carbono carbono con el contenido de cromo y manganeso.

REFERENCIAS

- [1] T.K. POL Y S.K. MAJUMDAR, *Int. J. Joining Mater.*, 4 (1995) 104-109.
- [2] L. PERDOMO, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería Metalúrgica, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, 1999.
- [3] C.R. GÓMEZ, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería Mecánica, Univ. Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, 1995.
- [4] A. CRUZ, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería Metalúrgica, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, 2002.
- [5] L. PERDOMO, R. QUINTANA, A. CRUZ Y R. JEREZ, COMET'2000, Santa Clara, 2000.
- [6] G. PORTAL, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, 1994.
- [7] A.S. PISMENNYI, *Patton Welding Journal*, 2 (1996) 97-100.
- [8] V.P. KONDIPKA E I.B. PARAMONCHUK, V Conferencia "Metalurgia del manganeso", Ucrania, Nikopol, 1991, pp. 129-132.
- [9] R. QUINTANA, A. CRUZ, L. PERDOMO, G. CASTELLANOS, L.L. GARCÍA, A. FORMOSO Y A. CORES, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 25-34
- [10] A. CRUZ, R. QUINTANA, L. PERDOMO, L.L. GARCÍA, A. FORMOSO Y A. CORES, *Rev. Metal. Madrid*, 39 (2003) 114-122.
- [11] L. PERDOMO, R. QUINTANA, A. CRUZ, G. CASTELLANOS, L.L. GARCÍA, A. FORMOSO Y A. CORES, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 268-278.
- [12] N. KRIVIJ, E. ALFONSO, L.L. GARCÍA, J.A. VILLALONGA, A. FORMOSO Y A. CORES, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 289-297.
- [13] V. PODGAYESKII Y G. KUZMIENKO, *Teoría de las escorias*, Ed. Naukova Dumka, Kiev 1988,
- [14] N.N. POTAPOV, *Materiales para soldar. Tomo 1. Gases protectores y fundentes*, Ed. Mashinostroeniya, Moscú, 1989.
- [15] V. STUKALO, V.V. NESHIMIENKO, G.I. BATALIN, V.I. GALINICH Y V.V. PODGAYESKII, *Avtomaticheskaya Sbarka* 1 (1987) 40-42.
- [16] S. AKNAZAROVA Y V. KAFAROV, *Experimental optimization in chemistry and chemical engineering*. Ed. Mir, Moscow, 1982.
- [17] A.A. MAZUR, A.K. KARENUKH Y N.I. PANASHCHENKO, *Patton Welding Journal* 2 (1996) 116-119.
- [18] D. MARCELO, R. QUINTANA, L. PERDOMO Y A. CRUZ, *Rev. Energética* 22 (2001) 26-28.
- [19] O.P. MCHEDLOV-PETROSIAN, *Termodinámica de los silicatos*, Ed. Literatura po Stroitelstvu, Moscú, 1985.
- [20] S.B. XUE, H.M. HAO Y W. LIU, *China Weld.* 1 (1996) 22-27.