

Eficiencia de la transferencia de elementos aleantes en fundentes durante el proceso de soldadura automática por arco sumergido^(*)

R. Quintana*, A. Cruz*, L. Perdomo*, G. Castellanos*, L.L. García**, A. Formoso***
y A. Cores***

Resumen Se realizó un estudio de la transferencia de cromo, manganeso y carbono durante el proceso SAW (*Submerged Arc Welding*) de diferentes fundentes aglomerados constituidos por 18,75 % de carga aleante y 81,25 % de matriz. En horno eléctrico de arco, mediante la fusión de mezclas de minerales, se obtuvo una matriz básica vítrea, correspondiente al sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(CaO+MgO)}$. La proporción en que se encuentran los componentes de la carga aleante (FeCr, FeMn y grafito) se estableció a través de un diseño de experimentos del tipo *McLean Anderson*. Los fundentes correspondientes a cada punto experimental se obtuvieron por rodadura, utilizando vidrio líquido como aglomerante. A los fundentes obtenidos se les determinaron los coeficientes de transferencia para un régimen de soldadura invariable, utilizando para ello una expresión de cálculo basada en las leyes de conservación de masa y de reparto.

Palabras clave Metalurgia de la soldadura. Fundentes para la SAW. Transferencia de elementos químicos aleantes.

Study of the transfer efficiency of alloyed elements in fluxes during submerged arc welding process

Abstract It is assessed the transfer of chromium, manganese and carbon of different agglomerate fluxes constituted by 18.75 % of alloyed load and 81.25 % of matrix during the SAW process (*Submerge Arc Welding*). A vitreous basic matrix corresponding to the system $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(CaO+MgO)}$ was obtained from minerals by fusion in the electric arc furnace. The current proportions of the alloyed load components (FeCr, FeMn and graphite) were carried out using a *McLean Anderson* experiment design. The corresponding fluxes to each experimental point were obtained by granulation with liquid glass; afterwards, their transfer coefficient for a given regimen of welding was determined. The transfer coefficients were calculated by means of a formula based on the laws of mass conservation and of distribution.

Keywords Welding metallurgy. Fluxes for SAW. Transfer of alloyed chemical elements.

1. INTRODUCCIÓN

Es frecuente que para la obtención de recubrimientos metálicos con complejas composiciones químicas y de fases, así como propiedades mecánicas diferentes se utilice el proceso de Soldadura con Arco Sumergido (SAW), empleando una gran variedad de tipos de fundentes aglomerados, que se comercializan por unas pocas firmas multinacionales, que dominan más del 90 % del mercado mundial^[1].

Todo fundente aglomerado está constituido por dos partes fundamentales: la matriz y la carga aleante. La relación entre matriz y carga aleante se encuentra en un amplio intervalo, que se extiende desde 9:1 hasta 2:1 ^[2 y 3]. Ambos constituyentes del fundente se agregan entre sí, por diversos procesos, con la ayuda de aglomerantes. La aglomeración por rodadura (pelletización) empleando vidrio líquido de sodio y/o potasio es la más común y extendida para este tipo de fundentes a pesar de su carácter higroscópico.

(*) Trabajo recibido el día 20 de noviembre de 2002 y aceptado en su forma final el día 12 de febrero de 2003.

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

(**) Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME), Avda. 51, No. 23611, esq. 240, La Lisa Marianao, Ciudad de La Habana, Cuba.

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

Entre las características de rentabilidad más sobresalientes de un fundente aglomerado, se encuentra la eficiencia de la transferencia de los elementos químicos de la carga aleante del fundente al metal depositado, para determinados sistemas alambre-fundente y regímenes de soldadura. Los elementos de la carga aleante pueden llegar a constituir hasta el 85 % del costo de producción del fundente^[4]. Entre los sistemas aleantes más extendidos y económicos, para fundentes destinados al recargue de piezas sometidas al desgaste por abrasión y leve impacto, así como al desgaste metal-metal, se encuentra el sistema constituido por FeCr, FeMn y grafito^[3 y 4]. La actividad química y las características estructurales de la matriz del fundente aglomerado, influyen en la eficiencia de la transferencia de los elementos químicos aleantes al metal depositado durante la SAW^[5 y 6].

Desde el punto de vista químico, el proceso SAW se puede considerar como una reacción muy heterogénea, que se desarrolla en diferentes etapas y rangos de temperatura y concentración, y cuyos componentes reaccionantes son: alambre-electrodo, fundente y material base. Esta reacción origina como producto final una aleación (cordón de soldadura) de composición química, microestructura y propiedades mecánicas determinadas, que pueden ser modificadas en función de los parámetros tecnológicos, y como productos secundarios escoria y gases^[5 y 6]. La cinética de esta reacción compleja se efectúa en un tiempo relativamente corto (~ 0,1-0,45 s) en función de la energía suministrada y a una alta temperatura (~ 2.000-3.500 °C), dependiendo de la intensidad y polaridad de la corriente^[7].

El objetivo de este trabajo consiste en evaluar la capacidad de varios fundentes aglomerados de transferir al cordón de soldadura los elementos Cr, Mn y C de las cargas aleantes formadas por relaciones diferentes de FeCr, FeMn y grafito. Para ello, se sintetizó una matriz vítrea fundida en un horno eléctrico de arco a partir de una formulación de minerales y se formaron cargas aleantes con diferentes relaciones de los componentes, establecidas a partir de un diseño de experimentos de tipo McLean Anderson.

2. CARACTERÍSTICAS DE FUNDENTES AGLOMERADOS PARA SOLDADURA AUTOMÁTICA

El proceso SAW (Soldadura por Arco Sumergido), consiste en cubrir la zona a soldar con una capa de fundente, introduciéndose a través de éste el alambre que actúa como electrodo, de tal modo que el

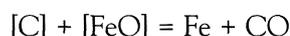
arco eléctrico queda cubierto bajo la capa de escoria fundida.

Una peculiaridad del proceso SAW es que, al encontrarse el arco eléctrico y la zona de soldadura cubiertos por la escoria, se logra, con bastante eficiencia, la protección del baño de soldadura y del cordón del medio ambiente. Esto limita la oxidación de los elementos metálicos aleantes, con pérdidas relativamente pequeñas de fundentes aglomerados con matrices vítreas, vitrocerámicas, cerámicas y cuasicerámicas, que sean fusibles a 1.350 °C y poco volátiles en las condiciones del arco eléctrico. Además, durante este proceso se deposita el 95-98 % del alambre-electrodo, un alto porcentaje de la carga aleante y, casi, la totalidad (> 96 %) de la matriz contribuye a la formación de la escoria. Por tanto, estos materiales son los que ofrecen el mayor aporte metálico al cordón de soldadura y la contribución principal a la formación de la escoria^[2 y 8]. Por lo anterior, el proceso SAW puede considerarse un sistema semicerrado desde el punto de vista material, donde el balance de masa sufre poca alteración, comparando el estado inicial con el final.

Una de las características más importantes del SAW es el elevado aprovechamiento que se hace de la energía del arco eléctrico, al no existir pérdidas de éste por radiación y proyecciones. Se ha establecido que el rendimiento calórico es del 80 al 90 %^[6 y 8].

En todo proceso SAW para el recargue, se determina un tipo de sistema metalúrgico alambre-electrodo-fundente, siendo el fundente el principal responsable de la composición del cordón de soldadura. Los fundentes aglomerados cumplen con esta premisa ya que están constituidos por una carga aleante activa y una matriz, cuya actividad química depende de su basicidad y concentración. Los elementos de la carga aleante interactúan intensamente, tanto con la gota del metal del alambre-electrodo y el baño de soldadura, como con los componentes de la fase gaseosa de la columna del arco y los de la escoria (óxidos), resultando una distribución de elementos aleantes acorde a la solubilidad de cada elemento metálico y de sus respectivos óxidos entre las dos fases líquidas: baño de soldadura y escoria. Durante la soldadura, tanto la matriz como la carga aleante cumplen funciones metalúrgicas, pero sus responsabilidades son diferentes. Respecto a los elementos de la carga aleante, deben cumplir dos funciones: alea, eficazmente y de forma estable, el baño de soldadura y ser un desoxidante activo.

Es conocido que el hierro puro fundido puede disolver hasta el 0,22 % de oxígeno en forma de wustita [FeO]. Por lo general, la presencia de óxido de hierro [FeO] en los cordones de soldadura disminuye en la medida que el contenido de carbono aumenta^[2 y 7]:



La oxidación de los elementos de la carga aleante puede efectuarse de forma intensa en la columna del arco eléctrico, donde el oxígeno se encuentra en forma atómica, y, también, durante la interacción de estos con el FeO disuelto en el baño de soldadura. La presencia de oxígeno en el metal del cordón de soldadura, en forma de solución sólida o de inclusión de óxidos diversos, provoca una disminución en casi todas las propiedades mecánicas del metal depositado y, además, influye negativamente sobre la resistencia a la corrosión y eleva la tendencia al envejecimiento. Todo esto puede reducirse con la eliminación del oxígeno presente en el metal depositado, mediante la adición en la carga aleante de elementos que posean mayor reactividad con el oxígeno que el hierro y, además, que sus óxidos sean mucho menos solubles en el baño de soldadura que el propio FeO. Gracias a la interacción de estos elementos con el oxígeno y a la protección segura del baño de soldadura de la atmósfera por medio de la escoria formada por la matriz del fundente (> 96 %), el contenido de oxígeno en el cordón de soldadura puede reducirse desde un 0,057 hasta 0,005 %^[6 y 8].

La composición del metal del cordón de soldadura obtenido por el proceso SAW depende de la distribución elemental del alambre-electrodo, el metal base, los componentes de la carga aleante y la matriz del fundente.

Para determinar la capacidad de aleación del sistema alambre-electrodo-fundente, durante la soldadura por SAW, no basta, solamente, la determinación analítica de la composición química del cordón, sino que hace falta cuantificar cuánto aporta el metal base y cada componente del sistema alambre-electrodo-fundente a la composición del cordón. Un criterio para cuantificar el grado de aleación de los elementos aleantes de los fundentes aglomerados en la composición del cordón de soldadura, sería los coeficientes de transferencia K_t ^[9 y 10]. Sin embargo, las bases de cálculo de los K_t , para cada elemento aleante, pueden ser diferentes y dependen de las características del proceso de soldadura, la preparación del metal base y de la

composición química de todos los componentes del sistema inicial: alambre-electrodo-fundente y metal base, así como de las características geométricas del cordón de soldadura, que definen el efecto de solubilidad por zona: refuerzo y penetración.

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. Matriz del fundente aglomerado

En la elaboración del fundente aglomerado para recargue se consideró, como primer objetivo, abaratar el costo de la matriz del fundente sin afectar su comportamiento. Para ello, se emplearon minerales de bajo coste, que constituyeron la mayor parte del fundente. En este trabajo, los minerales empleados constituyen un 85 % de la formación de la matriz (Tabla I).

Con los minerales, se preparó una mezcla, que permitía obtener una matriz fundida vítrea que se enmarcaba en la zona de la pseudowollastonita del sistema ternario: SiO₂-Al₂O₃-CaO para conformar, con ésta, un fundente aglomerado (Fig. 1).

Se fundieron 6 kg de mezcla mineral, cuya composición se ofrece en la tabla II, en un horno eléctrico de arco, a 1.600 °C. El fundido presentaba una composición correspondiente a la relación SiO₂:Al₂O₃:(CaO+MgO) = 1:0,2:1, que se sitúa

Tabla I. Composición química de los minerales empleados en la obtención de la matriz vítrea, % en masa

Table I. Chemical composition of minerals employed in the obtaining of the vitreous matrix, % in mass

Óxidos	Feldespatos	Calcita	Dolomía	Arena Rutilo	Fluorita	sílice
SiO ₂	66,30	0,34	0,84	90,32	-	2,87
TiO ₂	0,03	0,08	-	-	99,50	-
Al ₂ O ₃	20,80	0,23	0,40	-	-	-
Fe ₂ O ₃	1,20	0,17	0,13	-	-	-
MnO	0,02	-	-	-	-	-
CaO	1,94	55,20	33,82	-	-	1,12
MgO	0,50	0,63	18,78	-	-	-
Na ₂ O	4,20	-	-	-	-	-
K ₂ O	4,00	-	-	-	-	-
CaF ₂	-	-	-	-	0,25	95,00
CO ₂	-	42,76	46,01	-	-	0,88
SO ₃	0,02	0,13	-	-	0,10	0,10
P ₂ O ₅	0,04	0,07	-	-	-	0,03

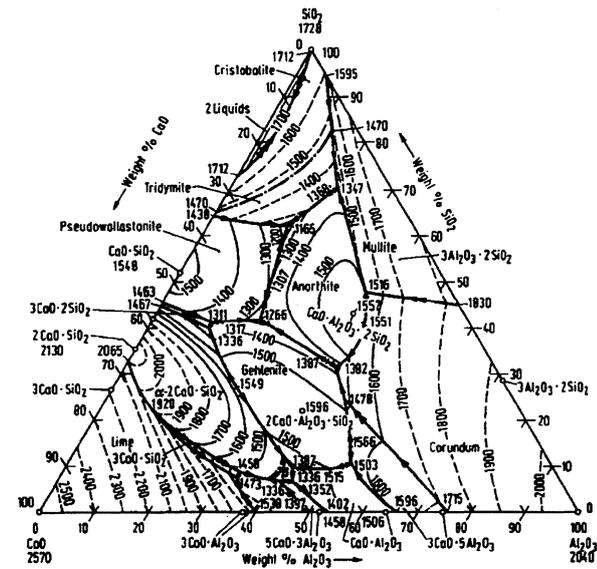


Figura 1. Diagrama de fase SiO₂-Al₂O₃-CaO.

Figure 1. Diagram of phase SiO₂-Al₂O₃-CaO.

Tabla II. Composición de la mezcla de la matriz del fundente, % en masa

Table II. Mineral composition of the matrix formulation of the fluxes, % in mass

Minerales	Composición
Feldespato	25,41
Arena sílice	11,20
Calcita	29,15
Dolomita	19,66
Rutilo*	5,67
Fluorita*	8,91

* minerales de importación

en la zona de isoterma de 1.400 °C, en la región de la pseudowollastonita, muy próxima a la composición de la wollastonita sobre la línea SiO₂-CaO que define el sistema SiO₂-Al₂O₃-CaO [11 y 12].

La masa fundida se vertió sobre agua a temperatura ambiente (28 °C), provocando un fuerte choque térmico con una fragmentación tal, que el 87 % de los granos formados poseían una granulometría de tamaño entre 3 y 10 mm.

Los granos vítreos, de gran fragilidad, se molieron hasta un tamaño de grano menor de 140 mallas (< 0,105 mm), que es el idóneo para ser utilizado como matriz de los fundentes aglomerados [13].

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de la matriz durante la soldadura se elaboró un

“prefundente” sin carga aleante, empleando 1 kg del polvo obtenido, al que se añadió un 30 % (0,3 kg) de vidrio líquido de modulo 2,75 a dicha masa, obteniendo una masa granulada por rodamiento, cuyos granos se encuentran entre tamaños de 0,20 y 2,5 mm. A partir de la composición química del “prefundente” (Tabla III), se puede calcular la basicidad (B) según la ecuación:

$$B = \frac{0,018 \text{ CaO} + 0,025 \text{ Mg} + 0,013 \text{ CaF}_2 + 0,016 \text{ Na}_2\text{O} + 0,0106 \text{ K}_2\text{O} + 0,007 (\text{MnO} + \text{FeO})}{0,017 \text{ SiO}_2 + 0,5 (0,01 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0,0125 \text{ TiO}_2)} \quad (1)$$

dando un valor de B = 1,08 (B > 1, ligeramente básica), mientras la actividad química presenta un valor de A_f = 0,43 (A_f > 0,35), según la ecuación:

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

que puede catalogarse de activa.

El “prefundente”, secado a 350 °C durante 1 h, se sometió a un proceso de evaluación en la soldadura, empleando alambre-electrodo EL12 (3 mm) y descargado sobre un acero base CT3 (Tabla IV).

Tabla III. Composición química de la matriz y del “prefundente” y sus valores de basicidad (B) y actividad química (A_f), % en masa

Table III. Chemical composition of the matrix and the “pre-flux” and its values of basicity (B) and chemical activity (A_f), % in mass

Óxidos	Matriz	Prefundente
SiO ₂	35,81	39,83
TiO ₂	7,36	6,57
Al ₂ O ₃	7,09	6,33
Fe ₂ O ₃	0,49	0,44
MnO	0,01	0,00
CaO	30,22	26,98
MgO	5,18	4,63
Na ₂ O	1,39	4,10
K ₂ O	1,32	1,18
CaF ₂	10,97	9,80
P ₂ O ₅	0,044	0,040
SO ₃	0,076	0,070
Suma	99,96	99,97
B	1,24	1,08
A _f	0,35	0,43

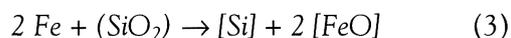
Tabla IV. Composición química del alambre-electrodo, metal base y del tercer cordón obtenido con el "prefundente", % en masa

Table IV. Chemical composition of the wire-electrode, basis metal and of the weld obtained with the "pre-flux", % in mass

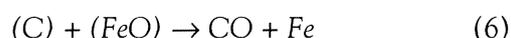
Material	Mn	C	Si	S	P
Alambre-electrodo EI-12	0,50	0,08	0,01	0,025	0,025
Metal base CT3	0,53	0,18	0,21	0,055	0,045
3 ^{er} . cordón de soldadura	0,45	0,06	0,13	0,015	0,020

El comportamiento del prefundente durante la soldadura, al obtener tres capas sucesivas de cordones (eliminación de la influencia del metal base), se calificó de bueno debido al excelente desprendimiento de la escoria, la buena estabilidad del arco eléctrico y al buen aspecto del cordón para los parámetros de soldadura empleados: Tensión, $U_s = 30$ V; Intensidad, $I_s = 400$ A; Velocidad, $v_s = 30$ m/h.

A partir de la composición del tercer cordón (Tabla IV) se llegó a la conclusión de que, durante el proceso de soldadura existen pérdidas de un 10 % del manganeso y un 25 % del carbono respecto al alambre-electrodo, mientras que el contenido de silicio se incrementa en 13 veces a costa del contenido de sílice de la matriz fundida del "prefundente". La variación del contenido de estos elementos se debe a que, en la zona de altas temperaturas (la punta del alambre-electrodo, las gotas del alambre-electrodo y la zona anódica del baño de soldadura), se desarrollan, de forma intensa, reacciones endotérmicas que provocan la oxidación del metal del baño de soldadura por la sílice del "prefundente" y el oxígeno atómico.

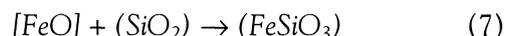


Además una parte del $[FeO]$ disuelto en el baño de soldadura reacciona con el $[Mn]$ y el $[C]$ contenidos en el baño metálico según las reacciones siguientes:



Como resultado de la interacción de la escoria fundida con el metal del baño metálico se extrae

una cantidad considerable del (FeO) restante disuelto en el mismo acorde a:



3.2. Carga aleante del fundente

En la elaboración de la carga aleante, se empleó ferrocromo, obtenido a partir de cromitas refractarias, en el Centro de Investigaciones de Soldadura de Cuba^[4, 14 y 15]. También se empleó manganeso obtenido de minerales cubanos^[16].

Para poder valorar la transición de los elementos aleantes, cromo, manganeso, carbono y silicio del fundente hacia el baño de soldadura, se analizaron cada uno de los componentes de la carga aleante: $FeCr$, $FeMn$ y grafito (C_{gr}) (Tabla V).

Las ferroaleaciones se molieron en un molino con bolas de acero hasta la granulometría $< 0,25$ mm. A partir de los polvos de estos tres componentes, se confeccionaron las cargas aleantes del fundente aplicando un diseño experimental del tipo *McLen Anderson*, donde se consideraron tres variables de entrada: X_1 -contenido de $FeCr$, (40,47-89,58 %); X_2 -contenido de $FeMn$, (5,62-45,10 %); X_3 -contenido de grafito, (4,80-14,43 %), (Tabla VI).

El número de formulaciones de cargas aleantes que describe el diseño viene calculado por la ecuación $N = q^{q-1} = 3 \cdot 2^{3-1} = 12$. De este número, solo cuatro, cumplieron la condición de normalidad y de frontera que representan los vértices de un paralelogramo, al cual se añadió un punto en el centroide para un total de cinco experimentos (Tabla VI). Las variables respuestas a evaluar son: $Y_1 - K_t(Cr)_{dep}$, $Y_2 - K_t(Mn)_{dep}$ y $Y_3 - K_t(C)_{dep}$. A partir de estas cinco formulaciones de las cargas aleantes se confeccionaron mezclas homogéneas de polvo, constituidas por 79 % de matriz fundida y 21 % de carga aleante que, luego, se aglomeraban por rodadura con vidrio líquido en la misma proporción que en el "prefundente", obteniéndose, después de

Tabla V. Composición química de los componentes de la carga aleante del fundente, % en masa

Table V. Chemical composition of the alloyed load components of the flux, % in mass

Componentes	Cr	Mn	Fe	C	Si	S	P
$FeCr$	54	-	38,98	4	3	0,014	-
$FeMn$	-	75	18,25	6	0,3	-	0,45
Grafito	-	-	-	99	-	-	-

Tabla VI. Conformación porcentual de los componentes en las cargas aleantes (C_{ca}) expresadas en gramos para cada fundente

Table VI. Perceptual conformation of the components in the alloyed loads (C_{ca}) expressed in grams for each fluxes

Fundente	Componentes, % en masa			Cca Masa, g
	FeCr	FeMn	Grafito	
1	89,58	5,62	4,80	22,22
2	79,95	5,62	14,43	22,66
3	50,10	45,10	4,80	22,31
4	40,47	45,10	14,43	23,08
5	65,00	25,38	9,62	23,68

una calcinación a 350 °C, una nueva relación entre la matriz y la carga aleante de los correspondientes fundentes, cuya carga aleante es, ahora, el 18,75 % (Tablas VI y VII). Estos cinco fundentes se sometieron al proceso SAW con los mismos parámetros seleccionados para el “prefundente”.

4. RESULTADOS

4.1. Balance de masa

Para realizar el balance de masa, se pesaron los consumibles antes de la soldadura (fundente, alambre y metal base) y los productos finales (fundente residual, escoria y metal base + cordón de soldadura), que son los que constituyen la base del balance material, utilizado en el cálculo de los coeficientes de transferencia que se plantean en este trabajo^[17].

En la tabla VII se recoge el balance de masa de los consumibles y productos finales. Estos últimos representan una cantidad media 2,59 % mayor que el conjunto de los consumibles, debido a la oxidación de los elementos metálicos de la carga aleante durante la soldadura, formando los óxidos FeO,

Cr₂O₃ y MnO que a su vez, se absorben por la escoria, en gran parte, incrementando su masa (Tabla VIII).

Por otro lado, el alambre contribuye en un 90 %, como promedio, en la formación del cordón y hasta un 8 % en la carga aleante, que representa hasta un 40 % de la carga aleante del fundente (Tablas VI y IX).

4.2. Coeficientes de transferencia

El proceso SAW se considera regido por la ley de conservación de la masa, y la transferencia de los elementos químicos se puede calcular de acuerdo a la ecuación desarrollada por Castellanos-Hernández y Quintana-Puchol^[9]:

$$K_t (El)_{dep(esc)} = \frac{C_{dep(esc)} \cdot M_{dep(esc)}}{C_{fte} \cdot M_{fte} + C_{al} \cdot M_{al}} \cdot \frac{\sum M_{si}}{\sum M_{sf}} \cdot 100 \quad (8)$$

donde;

- $K_t (El)_{dep(esc)}$ es el coeficiente de transferencia del elemento aleante $(El)_{dep(esc)}$ que se transfiere desde el fundente hacia el depósito metálico (dep) o hacia la escoria (esc), %
- C_{al} , C_{fte} y $C_{dep(esc)}$ representan la concentración del elemento aleante en cuestión, en el alambre (al), fundente (fte) y depósito (dep) o en la escoria (esc), %.
- M_{al} , M_{fte} , representan las masas del alambre y fundente que se funden durante la soldadura, g.
- $M_{dep(esc)}$ es la masa del depósito o de la escoria formada, g.
- $\sum M_{sf}$ constituye la suma de las masas del sistema final (sf): masas del depósito (M_{dep}) y escoria (M_{esc}), g.
- $\sum M_{si}$ es la suma de las masas de los componentes del sistema inicial (si): masas del alambre (M_{al}) y fundente (M_{fte}), g.

Tabla VII. Cuantificación de los consumibles y productos de la deposición durante el proceso SAW

Table VII. Quantification of the consumable and products of the deposition during the SAW process

Fundente	Consumibles iniciales, g		Producto final, g		Relación Fund./Alamb.
	Fundente	Alambre-Eléct.	Escoria	Depósito	
1	118,5	81,7	113,2	92,5	1,45
2	120,8	83,9	112,9	94,3	1,44
3	119,0	82,1	113,7	92,6	1,45
4	123,1	85,4	116,8	95,7	1,44
5	126,3	87,2	117,9	97,4	1,45

Tabla VIII. Composición química de las escorias del tercer cordón de soldadura, % en masa

Table VIII. Chemical composition of the slag of the respective fluxes, % in mass

Óxidos	Escoria				
	1	2	3	4	5
SiO ₂	35,05	33,83	36,31	34,46	34,40
TiO ₂	5,77	5,58	5,99	5,69	5,67
Al ₂ O ₃	5,57	5,38	5,77	5,48	5,47
Fe ₂ O ₃	0,39	0,37	0,40	0,38	0,38
Cr ₂ O ₃	11,79	13,22	4,35	3,16	7,31
FeO	1,24	1,69	2,02	2,76	2,46
MnO	0,14	0,14	2,47	7,54	3,86
CaO	23,75	22,92	24,59	23,33	23,30
MgO	4,07	3,93	4,22	4,00	4,00
Na ₂ O	3,61	3,48	3,74	3,55	3,54
K ₂ O	1,03	1,00	1,08	1,02	1,02
CaF ₂	7,46	8,33	8,93	8,48	8,46
P ₂ O ₅	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03
SO ₃	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06
Suma	99,95	99,96	99,97	99,94	99,96

Tabla IX. Composición química del tercer cordón de soldadura, % en masa

Table IX. Chemical composition of the third welding cord, % in mass

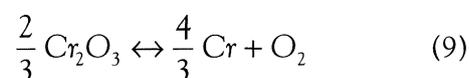
Fundente	Cr	Mn	C	Si
1	2,90	1,05	0,83	0,62
2	3,45	1,10	1,23	0,85
3	3,30	2,35	1,04	1,01
4	3,01	2,46	1,61	1,38
5	3,40	2,05	1,47	1,23

Los coeficientes de transferencia están relacionados con la capacidad que tienen los elementos de transferirse según las características estructurales y químicas de la matriz, p. ej., el grado de vitrificación; así como de su carácter ácido-básico y actividad química y, por supuesto, el régimen de soldadura. También puede referirse a la afinidad por el oxígeno, que presentan los elementos a oxidarse, y la solubilidad de los óxidos formados, tanto en la escoria líquida como en el baño de soldadura.

La afinidad de un elemento por el oxígeno puede expresarse por su capacidad a retenerlo, es decir, por la reacción de descomposición del óxido. Para poder comparar esta afinidad entre varios elementos químicos, es conveniente expresar la reacción de descomposición referida a un mol de O₂.

Durante la soldadura, la oxidación de los elementos de la carga aleante se puede expresar mediante la energía libre de Gibbs (ΔG°), que determina la posibilidad de que se efectúe dicho proceso. Esta afinidad de los elementos aleantes con el oxígeno está vinculada a la capacidad de transferir los elementos químicos, desde el fundente aglomerado hacia el baño metálico.

La afinidad del cromo por el oxígeno a altas temperaturas está dada por la ecuación,



y se expresa termodinámicamente por^[2]:

$$\begin{aligned} \Delta G_{\text{Cr}_2\text{O}_3}^\circ &= 752286 - 141T = \\ &= -nRT \ln P_{\text{O}_2}, [\text{en J / mol}] \end{aligned} \quad (10)$$

donde, P_{O_2} es la presión parcial del oxígeno en la reacción de descomposición del óxido de cromo.

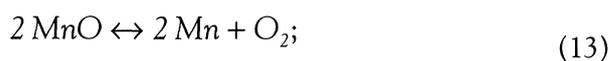
Para las mismas condiciones, la afinidad por el oxígeno de otros elementos presentes en la carga aleante del fundente y el alambre-electrodo (Mn, Si, C y Fe) puede expresarse según las reacciones siguientes:



$$\Delta G_{\text{SiO}_2}^\circ = 859.300 - 181 T = -nRT \ln P_{\text{O}_2}$$



$$\Delta G_{\text{CO}}^\circ = 221.000 - 178,29 T = -nRT \ln P_{\text{O}_2}$$



$$\Delta G_{\text{MnO}}^\circ = 769.860 - 148,0 T = -nRT \ln P_{\text{O}_2}$$



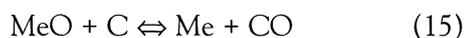
$$\Delta G_{\text{FeO}}^\circ = 527.360 - 114,75 T = -nRT \ln P_{\text{O}_2}$$

En todas las ecuaciones, n toma el valor 1, debido a que la cantidad de oxígeno está referida a un mol^[2].

De estas ecuaciones, se deduce que el cromo reaccionará con mayor intensidad con el O₂ que aquellos elementos que tengan menor afinidad por el oxígeno que el cromo. A medida que el cromo se oxida, su concentración en el baño metálico disminuirá y la velocidad de oxidación se moderará. Entonces, comenzarán a oxidarse, con mayor intensidad, aquellos elementos químicos de la carga aleante según su afinidad por el oxígeno y a su concentración en el baño de soldadura. La afinidad del cromo por el oxígeno depende de la presencia de otro elemento (Me) que compita por el oxígeno y de la temperatura a la que ocurre el proceso. Para una temperatura dada, en el caso que $\Delta G_{Cr_2O_3}^o > \Delta G_{MeO}^o$, las presiones parciales del oxígeno en el equilibrio serán: P_{O_2} (para el Cr₂O₃) < P_{O_2} (para el MeO) y el cromo actuará como reductor oxidándose.

Analizando la afinidad por el oxígeno del cromo y manganeso a partir de las ecuaciones (10) y (13), se observa que, a temperaturas superiores a 2.400 K, el cromo actúa como reductor y, a temperaturas inferiores a ésta, el manganeso es el reductor.

En el caso del grafito, debido a la poca cantidad de oxígeno atmosférico y a las altas temperaturas en el arco bajo el fundente, se supone que la reacción (15) sea la predominante, con los óxidos:



También es muy probable que una parte del grafito reaccione con los metales, formando carburos, fundamentalmente, con aquellos metales que presenten, en el orbital 3dⁿ, electrones desapareados {Cr(d⁵) y Mn(d⁵)}.

En la tabla X se dan los valores de coeficientes de transferencia del cromo, manganeso y carbono. A partir de estos resultados, para $Y_1-K_t(Cr)_{dep.}$, $Y_2-K_t(Mn)_{dep.}$ y $Y_3-K_t(C)_{dep.}$ (considerados como variables dependientes) y los valores de X₁, X₂ y X₃, planteados en la tabla VI, se realizó el cálculo estadístico, utilizando el software *Statgraphics*, versión Plus 2.1, obteniéndose las ecuaciones de regresión:

$$Y_1=0,1607 X_1 + 0,7116 X_2 + 0,8719 X_3 \quad R_{aj.}^2 = 99,9 \% \quad (16);$$

$$Y_2=0,7215 X_1 \quad R_{aj.}^2 = 98,45 \% \quad (17);$$

$$Y_3=0,3745 X_1 + 0,5126 X_2 \quad R_{aj.}^2 = 99,27 \% \quad (18).$$

Como se observa en la ecuación (16) y en la tabla X, el coeficiente de transferencia del cromo al

depósito {K_t(Cr)_{dep.}} está menos influenciado por el contenido de FeCr-X₁ (contenido de Cr) en la carga aleante que por los contenidos en ésta de FeMn-X₂ (contenido de Mn) y grafito-X₃. En los casos en que el FeCr se encuentre en concentraciones superiores a la suma de FeMn y grafito (C_{gf}), la oxidación del cromo se hace más intensa y su transferencia menor, en relación con su contenido inicial. En la medida que la suma de las concentraciones del FeMn + C_{gf} en el fundente se incrementa, la transferencia del cromo será más efectiva. Tanto el FeMn como el C_{gf} realizarán, en conjunto, un efecto de apantallamiento contra la oxidación del cromo, permitiendo una mayor eficiencia en la transferencia del cromo. Esto se debe a que se van oxidando, paralelamente, con el cromo, manganeso y C_{gf}, pero con diferentes intensidades, de acuerdo al rango de temperatura y a cómo disminuye la concentración del cromo con respecto a las concentraciones de manganeso y C_{gf} en la carga aleante y, por ende, en el baño metálico, produciéndose un efecto de afinidad por el oxígeno. Este efecto será denominado índice de apantallamiento oxidativo del cromo.

4.3. Índice de apantallamiento oxidativo

Este índice, para el cromo, se expresa por la ecuación:

$$I_{ap}(Cr)_{Mn,C} = \frac{(FeMn) + (C_{gf})}{(FeCr)} \quad (19)$$

donde, (FeMn), (FeCr) y (C_{gf}) son los contenidos, en g, de los que constituyen la carga aleante de los fundentes aglomerados.

En la figura 2 se expone la dependencia entre $I_{ap}(Cr)_{Mn,C}$ y $K_t(Cr)_{dp}$, que viene dada por la ecuación:

$$K_t(Cr)_{dp} = 9,452 + 40,689 \sqrt{I_{ap}(Cr)_{Mn,C}} \quad (20)$$

$$R_{aj.}^2 = 97,00 \%$$

Esta dependencia se ajusta bien, en los rangos y relaciones de concentración estudiados de FeCr, FeMn y C_{gf}, ya que es posible que, para relaciones diferentes entre la carga aleante y la matriz y, de ésta, con otras características estructurales y químicas, puedan existir otras dependencias entre $I_{ap}(Cr)_{Mn,C}$ y $K_t(Cr)_{dp}$. Sin embargo, todas deben presentar un nivel de saturación, que se expresa por un posible desarrollo asintótico respecto al eje de las abscisas.

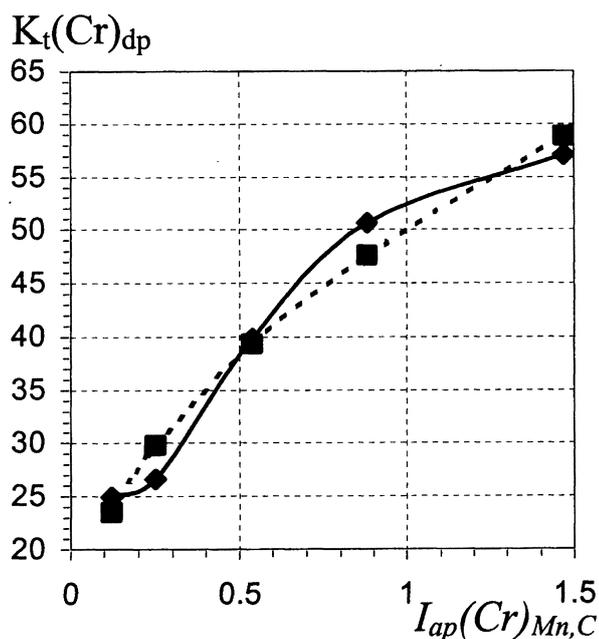


Figura 2. Dependencia del coeficiente de transferencia del cromo $K_t(Cr)_{dp}$ respecto al índice de apantallamiento $I_{ap}(Cr)_{Mn,C}$. Línea de punto: valores ajustados de $K_t(Cr)_{dp}$ según la ecuación (20).

Figure 2. Dependence of the transfer coefficient of chromium $K_t(Cr)$ regarding the Screening Index $I_{ap}(Cr)_{Mn,C}$. Point line: value adjusted of $K_t(Cr)$ according (20) equation.

Para el caso Y_2 del manganeso, como se puede apreciar en la ecuación (17) y la tabla X, éste, solo muestra dependencia significativa del contenido de FeCr (X_1) en la carga. Ello encuentra explicación en lo planteado sobre la influencia del FeCr al aumentar su contenido y sobre la función de apantallamiento del manganeso. El grafito (X_3), aunque su efecto es no significativo, muestra una tendencia a influir, positivamente, sobre

$K_t(Mn)_{dep.}$ (Tablas VI y X), lo que se relaciona como la acción del carbono frente a los elementos formadores de carburos.

El coeficiente $K_t(C)_{dep.}$ de Y_3 , según la ecuación (18), depende de los contenidos de FeCr (X_1) y FeMn (X_2) en la carga, lo que se puede relacionar con el aporte de carbono de las ferroaleaciones (Tabla V), que se encuentra en forma de carburos, los cuales son más estables frente al oxígeno que el carbono en forma de grafito. Por tanto, este último, se oxidará primero, pasando al depósito, relativamente y en mayor medida, cromo de las ferroaleaciones. El contenido de grafito (X_3), a pesar de no ser significativo, muestra una tendencia a disminuir el coeficiente de transferencia, lo que puede explicarse a partir de lo planteado sobre la acción de apantallamiento reductor de este elemento.

5. CONCLUSIONES

- El "prefundente" obtenido a partir de una matriz vítrea y mezclado con 30 % de vidrio líquido respecto a la masa seca de la matriz, presenta una basicidad de $B = 1,08$, una actividad química de $A_f = 0,43$ y buenas características tecnológicas durante el proceso SAW. Ello permite obtener una composición química del cordón, en la tercera deposición, con pérdidas de un 10 % para el manganeso y un 25 % para el C_{gf} referidas al alambre-electrodo, mientras que el contenido de silicio se incrementa en 13 veces.
- Las proporciones seleccionadas de FeCr, FeMn y C_{gf} , en la carga aleante, permitieron estudiar el efecto conjunto, del manganeso y C_{gf} , regulador de la oxidación del cromo transferido al

Tabla X. Valores de los coeficientes de transferencia $K_t(Cr)_{dp}$, $K_t(Mn)_{dp}$ y $K_t(C)_{dp}$ calculados para el 3er. cordón de soldadura(1) y los dos primeros para la escoria (2), así como el valor del apantallamiento oxidativo $I_{ap}(Cr)_{Mn,C}$

Table X. Value of the transfer coefficients $K_t(Cr)$, $K_t(Mn)$ and $K_t(C)$ calculated for the 3er. welding cord (1) and both first for the slag (2), as well as the value of the oxidative screening $I_{ap}(Cr)_{Mn,C}$

Fundente	Coeficientes de transferencia, K_t							$I_{ap}(Cr)_{Mn,C}$
	Cordón de soldadura (1)			Escoria (2)		Suma (1+2)		
	$K_t(Cr)_1, \%$	$K_t(Mn)_1, \%$	$K_t(C)_1, \%$	$K_t(Cr)_2, \%$	$K_t(Mn)_2, \%$	$\Sigma K(Cr)$	$\Sigma K(Mn)$	
1	24,96	74,87	38,61	74,24	24,43	99,2	99,3	0,12
2	26,60	77,29	28,16	72,90	22,41	99,5	99,7	0,25
3	50,61	27,49	44,36	48,79	72,01	99,4	99,5	0,88
4	57,09	28,69	35,14	42,21	71,01	99,3	99,7	1,47
5	39,84	40,76	44,54	59,56	58,84	99,4	99,6	0,54

cordón de soldadura, que se expresa por el índice del efecto de apantallamiento oxidante ($I_{ap}(Cr)_{Mn,C}$), el cual, a su vez, presenta una dependencia multiplicativa con el coeficiente de transferencia del cromo $K_t(Cr)$, para el rango de concentraciones de los elementos estudiados: Cr = 21,8–48,4 %, Mn = 4,2–33,8 %, C_{gf} = 4,8–14,3 %.

- Los fundentes aglomerados, elaborados con 18,75 % de carga aleante (FeCr, FeMn y C_{gf} en diferentes relaciones) y con 81,25 % de constituyente de la matriz (70,54 % de matriz y 10,71 % de silicato de sodio) presentan, para unos parámetros de soldadura constante ($U_s = 30$ V, $I_s = 400$ A, $V_s = 30$ m/h.), capacidades diferentes de transferencia de los elementos aleantes: $K_t(Cr)_{dep} = 25,0-57,1$ %, $K_t(Mn)_{dep} = 27,5-77,3$ %, $K_t(C)_{dep} = 28,2-44,5$ %, que, a su vez, dependen de su capacidad de oxidarse en presencia de concentraciones altas de hierro y en las condiciones energéticas del arco.
- La determinación de los coeficientes de transferencia, basada en las leyes de conservación de la masa y del reparto, junto con el cálculo del índice de apantallamiento oxidante, $I_{ap}(Cr)_{Mn,C}$, permiten establecer mezclas de cargas aleantes del sistema FeCr-FeMn- C_{gf} de fundentes aglomerados con matriz vítrea del sistema $SiO_2-Al_2O_3-(CaO+MgO)$ acorde a la composición química del cordón de soldadura que se desea obtener y definir los costos de su producción.

REFERENCIAS

- [1] J. BEN-DAK, Discurso de clausura del Taller Internacional de Cooperación Técnica de Países en Desarrollo (CTPD), "Reacondicionamiento" '93, La Habana, 1993.
- [2] J.F. LANCASTER, *Metallurgy of welding*, 5th Edition, Chapman and Hall, London, 1993.
- [3] O. PÉREZ-BOLLÓN, Tesis de Maestría, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 1997.
- [4] L. PERDOMO-GONZÁLEZ *et al.*, *II Foro Internacional de Soldadura*, METANICA '98, Ciudad Habana 13-15 Julio, 1998.
- [5] R. QUINTANA-PUCHOL y G. CASTELLANOS-HERNÁNDEZ, *Rev. Minería Geología*, XV-2 (1998) 69-74.
- [6] R.M. NUGENT, J.E. DYBAS, D.W. MEYER y D.R. AMOS, *Welding Handbook*, R.L. O'Brien (Editor), 8th Edition, Vol. 2, Miami, 1992, pp. 192-232.
- [7] T.W. EAGER, *Weld. J.* 57-3 (1978) 76-80.L.
- [8] J.F. LANCASTER, *The Physics of welding*, 2nd Edition, Pergamon Press, London, 1986.
- [9] C. CASTELLANOS-HERNÁNDEZ, R. QUINTANA-PUCHOL, E. PÉREZ-MARTÍNEZ, E. ALBA-FERNÁNDEZ y G. PORTAL-DEPESTRE, *Rev. Construcción Maquinaria*, 19 (1994) 46-55.
- [10] Y. KUCHUK y S.I. YASENKO, *Weld. J.* 8-12 (1998) 87-95.
- [11] C. CICUTTI, 2^o Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales ABM, Sao Paulo, 1997.
- [12] I. ALVERDIN, *Propiedades físicas de los sistemas fundidos $SiO_2-Al_2O_3-CaO-MgO-CaF_2$* , Editorial MIR, Moscú, 1987.
- [13] G. PORTAL-DEPESTRE y R. QUINTANA PUCHOL, *Rev. Construcción Maquinaria* 1 (1994) 10-16.
- [14] G. JIMÉNEZ, P. TORRALBA, E. ARRATE, L. GARCÍA, A. CORES y M. FERNÁNDEZ, *Rev. Metal. Madrid* 27 (1991) 75-84.
- [15] G. JIMÉNEZ, L. GARCÍA, A. FORMOSO, C. CUBILLO y A. CORES, *Rev. Metal Madrid* 30 (1994) 38-43.
- [16] G. JIMÉNEZ, E. SOLER, A. FORMOSO y A. CORES, *Rev. Metal Madrid* 28 (1992) 111-118.
- [17] G. CASTELLANOS-HERNÁNDEZ, R. QUINTANA-PUCHOL, C.R. GÓMEZ-PÉREZ y Z. FLEITES-MARTÍ, *Rev. Minería Geología* 1 (2001) 78-82.