

Aprovechamiento de escorias de fundición de empresas del sector azucarero en la obtención de matriz de un fundente aglomerado para recuperación de piezas del propio sector

Autores: M.Sc. Rubén Jerez Pereira *

Dr.C. Amado Cruz Crespo**

Dr.C. Rafael Quintana Puchol**

Dr.C. Lorenzo Perdomo González**

Universidad de Granma. *

Centro de Investigaciones de Soldadura. (CIS-UCLV) **

Resumen:

Se presenta el aprovechamiento de escorias de la producción de hierro en hornos de cubilote en empresas de la industria azucarera para la obtención de una matriz de un fundente para recuperación de piezas por arco sumergido en el propio sector. A partir del análisis de las características de las escorias generadas en las citadas fundiciones se concibe su esquema de procesamiento para la adecuación a las características de la matriz de un fundente aglomerado para la recuperación de piezas que responda a una amplia gama de demanda, contribuyendo en ello a aumentar la durabilidad de los elementos de máquina y a la disminución de las escorias como residuales sólidos.

Palabras-clave: Escorias de horno de cubilote; soldadura por arco sumergido; fundente aglomerado,

(The use of foundry slag of sugar sector companies in obtaining the matrix of a flux agglomerate for recovery of pieces of this sector)

Abstract: The use of slag of iron production is presented in cupola furnace ovens in sugar industry companies for the obtaining of a matrix of a flux for recovery of pieces by submerged arch in this sector. From the analysis of the characteristics of the slag generated in the mentioned foundries their processing outline is conceived for the adaptation to the characteristics of the matrix of a flux agglomerate for the recovery of pieces that responds to a wide demand range, contributing to an increase in the durability of machine elements and to the decrease of the slag like residual solids.

Key- words: Cupola furnace slag; submerged arc welding; agglomerate flux.

1. Introducción

No se dispone de cifras exactas de la producción mundial de las escorias ni de sus reservas en el sector azucarero, sólo se refiere un estimado a partir de informes de la producción anual de hierro y del rendimiento del proceso de fundición, los valores reportados en este sentido están en el orden de 240 a 415 millones de toneladas. Sólo en los EE.UU. se generaron aproximadamente 20 millones de toneladas de escorias en la producción del hierro y acero, estas cifras se comportan entre 450-500 kg de residuos sólidos por tonelada del producto principal, más de 375 kg/t son escorias, es decir entre un 70 y un 80 %, cerca del 80 % fueron granuladas para usos posteriores.⁸

En Cuba la mayor cantidad de hierro que se produce se obtiene en hornos de cubilote, concentrándose la mayor parte de estas producciones en empresas del Ministerio del Azúcar. De otro lado la industria azucarera es la que más ampliamente aplica la recuperación de piezas por soldadura automática por arco sumergido (SAW), siendo entonces consumidor de materiales destinados a tales fines, solo que hasta ahora dichos insumos son de importación.

Las escorias constituyen entre un 3 y 4 % de la masa del metal procesado, pudiendo llegar este valor hasta un 7 %.⁸ Una vez molida puede tener varias aplicaciones, se reporta usos en el mejoramiento de los suelos, en pavimentación de carreteras, en proyectos de conducción civil, y algunas retornan al propio proceso de fundición.⁸ Los reportes de utilización de las escorias como materia prima alternativa en la obtención de consumibles de soldadura son escasos. Durante las Segunda Guerra Mundial se utilizaron mezclas de

escorias de Alto Horno con mármol en la obtención de fundentes fundidos.⁷ En una primera aproximación al tema⁵ desarrolla estudios dirigidos a la reutilización de las escorias de cubilote en fundentes para soldadura. En otros trabajos se aprovechan las escorias generadas en el propio proceso de soldadura en la obtención de un fundente aglomerado aleado del sistema MnO-SiO₂.³

El presente trabajo tiene la finalidad de obtener una matriz fundida a partir del procesamiento de escorias de cubilote de la industria azucarera para incorporarla como parte de un fundente aglomerado para la SAW en la recuperación de piezas por recargue del propio sector. En ello se busca una mayor eficiencia económica por el aprovechamiento de residuales, dando un paso a favor de la gestión ambiental en las ciudades industriales.

2. Materiales y métodos

2.1 Materias primas

Mediante la caracterización química de las escorias se puede trazar una estrategia en la conformación de la mezcla para sintetizar la matriz, y qué tratamiento se debe realizar a las materias primas para lograr las propiedades requeridas en dicha matriz.

La tabla 1 indica la composición química promedio de los materiales utilizados para conformar la carga, a través de fluorescencia de rayos X, en el caso del polvo de mármol y la fluorita se utilizó análisis por vía húmeda.

Tabla 1. Composición química promedio de los componentes de la matriz

Óxidos	Escoria de Cubilote	Mármol	Fluorita	Coque
SiO ₂	35,60	1,92	2,24	-
Al ₂ O ₃	13,86	0,59	0,43	-
CaO	27,39	54,72	0,22	2,17
FeO	14,18	-	-	-
MnO	3,66	0,02	-	-
MgO	0,73	1,04	0,10	1,54
Na ₂ O	0,62	0,06	-	4,42
K ₂ O	2,00	0,02	-	3,75
Cr ₂ O ₃	0,18	0,07	-	-
V ₂ O ₅	0,09	-	-	-
TiO ₂	0,91	-	-	-
CaF ₂	0,02	-	96,10	-
P ₂ O ₅ (P)	0,43 (0,18)	-	-	-
SO ₃ (S)	0,33 (0,13)	-	-	-
Fe ₂ O ₃	-	0,32	-	-
C	-	-	-	88,08
PPI	-	41,21	-	-

Como muestra la tabla 1, en la composición química de las escorias de cubilote se destacan tres óxidos, SiO₂, Al₂O₃ y CaO, cuya suma representan el 76.85 %.

De los resultados obtenidos en la caracterización química se puede establecer que las escorias están constituidas, mayoritariamente, por dos óxidos CaO:SiO₂ en una relación porcentual de 0,77. Sin entrar a considerar la influencia de otros óxidos, este valor le confiere a dicha escoria un carácter aparentemente ácido, lo cual permite emitir juicios del comportamiento metalúrgico de la matriz, y de cómo modificar las características del sistema a través de adiciones.² El alto contenido de FeO (14,18 %) 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 en el proceso SAW, producto a la tendencia a la formación de espinelas complejas del tipo (Me^I,Me^{II}) [Me_Z^{II,III} FexOy].⁴

El polvo de mármol que aporta fundamentalmente CaO y la fluorita que aporta CaF₂, son utilizados en calidad de modificadores. Por su parte el coque funge como reductor del óxido de hierro presente en la escoria.

2.2 Diseño experimental para la obtención de la matriz

El estudio de la influencia de las materias primas, descritas en el acápite anterior y que conforman la mezcla destinada a la obtención de la matriz fundida, se hace mediante un diseño experimental del tipo *McLean Anderson* para una región restringida, donde deben cumplirse la condición de normalidad (1):

$$\sum_{i=1}^q X_i = 100\%$$

(1)

y las siguientes condiciones de frontera:

- X₁ (%) - Escoria de cubilote 70 % ≤ X₁ ≤ 100 %
- X₂ (%) - Mármol 0 % ≤ X₂ ≤ 20 %
- X₃ (%) - Fluorita 0 % ≤ X₃ ≤ 10 %

Los rangos de las variables de entrada son definidos a partir de criterios de la literatura especializada y trabajos precedentes de los autores de este trabajo.^{3,9} La cantidad de experimentos, donde "q" el número de componentes, se establece por (2):

$$N = q * 2^{q-1}$$

(2)

En este caso, q es igual a tres, de lo cual se infiere un total de 12 experimentos.

Al aplicar la condición de normalidad y las condiciones de frontera, la matriz original de 12 experiencias se reduce a 4, que corresponden, geoméricamente, a los cuatro vértices del paralelogramo. Para completar el plan se adicionan cuatro puntos intermedios en las aristas y uno en el centroide del paralelogramo, quedando 9 experimentos a realizar (tabla 2), lo cual reduce en un 25 % el número de los experimentos.

Tabla 2. Plan experimental, composición de cargas y resultados de coladas

No	X ₁	X ₂	X ₃	Σ	X ₁ (kg)	X ₂ (kg)	X ₃ (kg)	Coque (kg)	Total (kg)	Matriz (kg)Y ₁	Metal (kg)Y ₂
1	70	20	10	100	2,8	0,8	0,4	0,06	4,06	3,16	0,26
2	90	0	10	100	3,6	0	0,4	0,06	4,06	3,44	0,44
3	100	0	0	100	4	0	0	0,06	4,06	3,38	0,54
4	80	20	0	100	3,2	0,8	0	0,06	4,06	3,10	0,35
5	80	10	10	100	3,2	0,4	0,4	0,06	4,06	3,29	0,34
6	95	0	5	100	3,8	0	0,2	0,06	4,06	3,41	0,49
7	90	10	0	100	3,6	0,4	0	0,06	4,06	3,24	0,44
8	75	20	5	100	3	0,8	0,2	0,06	4,06	3,13	0,30
9	85	10	5	100	3,4	0,4	0,2	0,06	4,06	3,27	0,39

2.3 Obtención de la matriz

Los componentes debidamente pesados en una balanza técnica digital *SARTORIUS* tipo 1475 con precisión 0,001 g, son mezclados en un tambor giratorio con paletas helicoidales internas, durante 30 min. para lograr la homogeneidad adecuada, dada la granulometría de las materias primas (≤ 5 mm) no se

precisa someterlas a un proceso de trituración. La composición de cada mezcla se pueden observar en la tabla 2. Se determina procesar una masa total de 4 kg para la sumatoria de $(X_1 + X_2 + X_3)$, establecida para cada mezcla.

Las cargas fueron fundidas en un horno de arco eléctrico con crisol de grafito, acoplado a una fuente de corriente continua de 1000 A. Los parámetros de trabajo del horno durante todas las coladas se fijaron entre 28-36 V con 500-600 A. La adición de la carga se realizó de manera continua. La temperatura alcanzada en el proceso esta en el orden de 1 500-1 600 °C, determinada con un pirómetro óptico. La duración promedio del proceso fue de 35 min.

El fundido es vertido a una tolva con agua, donde se granula por choque térmico. A causa del brusco subenfriamiento, se obtiene una masa granulada amorfa con aspecto vítreo. La separación entre los granos de la escoria granulada y la masa de metal reducido, se realizó con un separador magnético, obteniéndose una eficiencia de un 98 %. Las condiciones de vertido se precisaron para los siguientes parámetros: masa de agua estática igual a 35 kg, altura de vertido entre 0,35 y 0,5 m, $T_{\text{vertido}}=1\ 450-1\ 500\ ^\circ\text{C}$.²

Las matrices prefundentes obtenidas en forma de masa granulada, se someten a un proceso secado al aire libre, después de lo cual la masa seca se tritura y tamiza hasta un tamaño de grano $\leq 0,25\ \text{mm}$, a continuación se peletizan por rodadura en un plato peletizador con adición a la masa seca de un 30 % de silicato de sodio diluido en agua al 33 %. Las matrices son secadas, primero al aire libre, luego a 120 °C en una estufa durante 2 h con altura de capa de 30 mm, finalmente son tamizadas hasta obtener una granulometría de 0,25 mm a 2,5 mm.⁷ Posteriormente se calcinan durante 2 h a una temperatura de 400 °C, aproximadamente.⁶

3. Resultados y discusión

3.1 Eficiencia del proceso de fusión-reducción de la matriz

El desarrollo de un proceso de fusión-reducción con la participación de la escoria de cubilote, el polvo residual de mármol y la fluorita, propicia que la reducción del FeO y MnO con el carbono involucre la participación del CO, como reductor gaseoso, de acuerdo a la ecuación de Boudouard ($\text{C}+\text{CO}_2=2\text{CO}$), al descomponerse el CaCO_3 , genera CO_2 que viene a reforzar la reducción iniciada en primera instancia bajo las reacciones topoquímicas entre las partículas sólidas del coque y la escoria.

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos de cada una de las coladas en cuanto a masa de (matriz) (Y_1) y masa de metal reducido (Y_2), así como sus respectivos rendimientos.

El FeO presente en la escoria de cubilote se reduce a Fe un 95 %.² Mientras el MnO se reduce a Mn un 80 %.³ Los óxidos no metálicos, se reducen, en el caso del P_2O_5 a P en un 68 %, pasando al metal, el 32 % no reducido pasa a la matriz como fosfato. Como resultado de la fusión reducción en el horno de arco, se obtiene una matriz cuya composición química se muestra en la tabla 3, colateralmente se obtiene una aleación, mayoritariamente compuesta por Fe con 77,21 %, Mn: 16,81 %; C: 4,23 %; Cr: 0,47 % y P: 0,96 %.

3.2 Valoración de las propiedades metalúrgicas de las matrices

A partir de la composición química de las matrices prefundentes (ver tabla 3), se realizó una valoración del comportamiento metalúrgico la cual se muestra en la tabla 3. Los primeros aspectos que pueden ser valorados sobre la base de la composición química son la basicidad (B), y la actividad química relativa de cada una de las matrices (A), así como las actividades relativas (A_{MxOy}) y termodinámicas (a_{MxOy}) del SiO_2 .⁶

Como era esperado el FeO disminuye en la matriz respecto a la escoria a valores relativamente pequeños (0,65 %), y se incrementa la suma de los óxidos del sistema ternario $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, llegando a 88,26 % con la presencia entre 0,02 y 10 % de CaF_2 . La matriz se sitúa en la región de la pseudowollastonita entre las isoterma de 1200 y 1250 °C, zona con características termodinámicas, que satisface uno de los requerimientos básicos en los fundentes de soldadura, fundir entre 250-300 °C por debajo de la temperatura de fusión del acero.⁶ El desplazamiento de la zona del sistema ternario ha sido provocado por la adición del mármol y la fluorita, y lleva implícito un aumento de la basicidad de la escoria y de la

actividad química, contribuyendo a una mayor transferencia de elementos a los depósitos, además en la interacción metalúrgica con el baño metálico permite eliminar en alto grado las impurezas nocivas e influir en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del depósito, así como conformar un aspecto del cordón de soldadura adecuado.²

Tabla 3. Composición química media en % de las matrices experimentales

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	FeO	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅
1	33,48	12,96	37,20	0,46	0,48	0,91	0,59	1,85	0,02	0,09
2	38,84	15,08	29,73	0,69	0,72	0,80	0,67	2,17	0,01	0,10
3	42,82	16,67	32,94	0,85	0,88	0,88	0,75	2,41	0,01	0,11
4	37,86	14,71	40,72	0,60	0,62	0,99	0,66	2,11	0,02	0,10
5	36,28	14,06	33,31	0,57	0,59	0,85	0,64	2,01	0,02	0,09
6	40,83	15,87	31,34	0,77	0,80	0,84	0,71	2,29	0,01	0,10
7	40,45	15,73	36,68	0,72	0,75	0,94	0,71	2,26	0,02	0,10
8	35,68	13,83	38,96	0,52	0,54	0,95	0,62	1,98	0,02	0,09
9	38,38	14,9	35,00	0,65	0,67	0,90	0,67	2,14	0,02	0,09

Continuación tabla 3

Mat. Exp.	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	TiO ₂	CaF ₂	P	S	Otros	B	A _f	A _{SiO2}	a _{SiO2}
1	0,02	0,09	0,84	9,63	0,025	0,030	1,43	1,25	0,49	0,42	0,24
2	0,01	0,10	0,99	9,63	0,036	0,036	0,49	0,89	0,41	0,35	0,20
3	0,01	0,11	1,09	0,02	0,048	0,040	0,48	0,82	0,41	0,35	0,20
4	0,02	0,10	0,96	0,02	0,034	0,035	0,56	1,12	0,50	0,42	0,24
5	0,02	0,09	0,92	9,63	0,031	0,033	0,96	1,05	0,45	0,38	0,22
6	0,01	0,10	1,04	4,83	0,042	0,038	0,49	0,86	0,41	0,35	0,20
7	0,02	0,10	1,03	0,02	0,039	0,038	0,51	0,95	0,45	0,38	0,22
8	0,02	0,09	0,89	4,82	0,028	0,033	1,03	1,18	0,49	0,42	0,24
9	0,02	0,09	0,97	4,83	0,034	0,033	0,71	1,00	0,45	0,38	0,22

La tabla 3 indica los valores promedios de basicidad (B) y actividad química (A_f), en todos los casos se identifican sistemas de óxidos activos A_f = 0,45 y presentan un carácter ligeramente básico (B=1,01).⁶ El contenido de SiO₂ en la matriz expresa una alta actividad termodinámica al Si de 0,22, lo cual define durante la soldadura las condiciones de transferencia de los elementos al depósito, dado que el silicio presenta un alto poder de desoxidación por su elevada afinidad por el oxígeno, respecto a otros elementos como el Mn.⁶ Por otro lado, según la hipótesis molecular de los aluminosilicatos fundidos, la actividad del SiO₂ ofrece los fundamentos teóricos para las observaciones sobre el comportamiento químico de las matrices vítreas complejas.⁴

3.3 Comportamiento tecnológico de las matrices

Con cada una de las matrices obtenidas se realizaron depósitos, de 3 cordones superpuestos a fin de atenuar el efecto de la dilución. Estos se realizan sobre planchas de acero al carbono AISI 1020 y alambre EL 12,³ para ello se utilizó una máquina Lincoln Electric de SAW con cabezal modelo TC-3, con un voltaje de arco de U=30-36 V, intensidad I=350-400 A y velocidad de soldadura V_s=30 m/h.² Durante la soldadura fue evaluado el comportamiento tecnológico según metodología basada en criterios de una comisión de expertos.¹

El comportamiento tecnológico, de las matrices de los puntos experimentales 1, 5, 8 y 9, no mostró variabilidad a destacar en lo referente a la estabilidad del arco, desprendimiento de la escoria, forma del cordón y formación de poros, siendo normal para este tipo de matrices en todos los casos.^{2,4} Con el

objetivo de evaluar el comportamiento metalúrgico de las matrices se determinó la composición química media de los depósitos obtenidos con las matrices 1, 5, 8, y 9, cuyos resultados se muestran en la tabla 4. Los puntos 2, 3, 4, 6 y 7 manifestaron dificultades de comportamiento durante la colada, el contenido de impurezas en estos (S, P) supera los niveles admisibles.

Tabla 4. Composición química de los depósitos obtenidos con las matrices y el alambre EL12

Depósitos	C	Si	Mn	P	S
Matriz 1	0,052	0,14	0,32	0,020	0,028
Matriz 5	0,051	0,17	0,41	0,030	0,030
Matriz 8	0,053	0,16	0,38	0,026	0,028
Matriz 9	0,054	0,19	0,44	0,032	0,034

En la tabla 4 se puede apreciar un aumento del contenido de Si respecto al del electrodo, aun sin estar presente éste en la matriz en su forma metálica, motivado por los procesos de oxidación-reducción del silicio, coincidiendo con resultados de trabajos precedentes.^{2,6}

Los resultados de la valoración cualitativa muestran que los índices generales que integran las propiedades tecnológicas que caracterizan a las matrices obtenidas (estabilidad del arco, desprendimiento de la escoria y aspectos del cordón) son cumplidos de forma aceptable en comparación con el comportamiento del fundente HF-600 utilizado como patrón.

La obtención de matrices mediante la fusión-reducción en hornos de arco eléctrico, con crisol y electrodo de grafito, de amplia divulgación en la bibliografía consultada, pese a su costo por la demanda energética (2,5 a 3,5 kW/kg), permite disminuir el hierro en su forma de FeO, así como el fósforo y el azufre (ver tabla 3) mediante un proceso de reducción carbotérmica, formar una estructura vítrea y ajustada químicamente (deseable para los fines que se persiguen), y sugiere una alternativa para el reciclaje de estos residuales, que normalmente ocupan espacio en vertederos, afectando el medio ambiente.

4. Conclusiones

1. Las potencialidades químicas que brindan los residuales sólidos industriales (escorias de cubilote y polvos de mármol), enmarcado en el sistema de óxidos CaO-SiO₂-Al₂O₃, permite establecer una estrategia encaminada a la síntesis de matrices fundidas para la obtención de fundentes aglomerados aleados, contribuyendo en cierta medida a la sustitución de minerales de alta ley, cuya extracción y uso implican fuertes impactos de índole económico y ecológico.
2. Se obtiene a través de mezclas fundidas de los componentes primarios prototipos de matrices prefundentes utilizando como aglomerante silicato de sodio en una proporción de un 30 % de la masa seca total de las mezclas, factible de conformar un fundente aglomerado aleado con buenas propiedades para la soldadura y el recargue por el proceso SAW.
3. Las matrices fundidas obtenidas (1,5,8,9) por fusión-reducción a partir de un prototipo de mezcla con rangos de variación de sus componentes (70-85 % de escoria, 10-20 % de polvo de mármol, 5-10 % de fluorita, y 1,5 % de coque como reductor), sometidas a un régimen de soldadura de I_s=350-400 A, U_a=30-36 V, V_s=30 m/h, mostraron buenas propiedades tecnológicas en comparación con el fundente HF-600 utilizado como patrón.

5. Referencias Bibliográficas

- 1) Abralov, M.A. *et al.* 1977. Fundentes cerámicos. URSS. Patente No. 538867.
- 2) Cruz, C.A. 2002. Obtención, mediante fusión, de un fundente fundido del sistema MnO-SiO₂ para la soldadura por arco sumergido. Tesis Doctoral. Moa. Cuba. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 158p.

- 3) Cruz, A.; *et al.* 2004. Fundente aglomerado aleado obtenido a partir de escorias de fundentes de alta sílice y alto manganeso. Revista Soldagem & Inspecao. (No.9).
- 4) Gómez, C.R. 1995. Obtención de fundente fundido para la S. A. W. a partir de rocas cubanas. Tesis Doctoral. Santa Clara. Cuba. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. 100p.
- 5) Perdomo, L.; *et al.* 2000. Escorias de hornos de cubilote como materia prima para la fabricación de fundentes de soldadura. In: 2º Evento COMET'2000, Santa Clara. Resúmenes en CD-ROOM.
- 6) Potapov, N.N. 1989. Materiales para soldar: Gases protectores y fundentes. Editorial Mashinoestroyeniya. Moscú. 217 p. Tomo 1.
- 7) Potgaestki, V. *et al.* 1988. Teoría de las escorias. Editorial Naukova Dumka. Moscú.
- 8) U.S Geological Survey. 2005. Mineral Commodity Summaries. Consultado 21 may. 2005. Disponible en: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs2005.pdf>.
- 9) Yamaguchi M.; K. Kaneo; K. Masao; K. Takashi. 1988. Flux for Non-Fused Submerged Arc Welding. Nippon Steel Corp. JP63264297.

Datos personales del autor:

Nombre y apellidos: Rubén Jerez Pereira.

Categoría docente: Profesor auxiliar.

Institución a la que pertenece: Universidad de Granma.

Dirección postal: Carretera a Manzanillo km. 17 ½. Apdo.21. Bayamo. 85100. Granma. Cuba.

Dirección particular: Zenea No. 565 e/. Amado Estévez y Augusto Márquez. Bayamo. 85100. Granma.

E-mail: rjerezp@udg.co.cu

rubenjp@uclv.edu.cu