

Obtención simultánea de ferroaleación multicomponente y escoria a partir de arenas negras, para el desarrollo de consumibles de soldadura por arco eléctrico^(*)

R. Quintana-Puchol*, L. Perdomo-González*, A. Cruz-Crespo*, L. Gómez-Rodríguez*
L.L. García-Sánchez**, A. Cerpa-Naranjo*** y A. Cores-Sánchez***

Resumen En este trabajo se expone una caracterización química y mineralógica de las arenas negras del placer Mejías de Sagua de Tánamo, el más importante placer litoral de playa del noroeste de Cuba Oriental. A partir de estas caracterizaciones se desarrolla una estrategia de cálculo para la confección de la carga metalúrgica, que permite obtener, simultáneamente, al ser procesada por reducción carbotérmica en un horno de arco eléctrico, una ferroaleación multicomponente y una escoria útil para la confección de consumibles de soldadura por arco eléctrico. El polvo de la escoria obtenida se aglomera con vidrio líquido. Los pelets resultantes y su comportamiento en la soldadura automática por arco sumergido (SAW), presentan propiedades metalúrgicas y tecnológicas que satisfacen los requisitos de una matriz de un fundente aglomerado. La composición química de la ferroaleación multicomponente está constituida por elementos metálicos: vanadio, cromo, molibdeno, titanio y niobio (V, Cr, Mo, Ti y Nb) de alto valor metalúrgico y aleante, apropiada para la formulación de cargas aleantes de consumibles tanto para la soldadura manual (SMAW) como para la SAW.

Palabras clave Arenas negras. Metalurgia. Ferroaleaciones. Escoria. Soldadura por arco eléctrico.

Simultaneous obtention of multicomponent ferroalloy and slag from black sands for the development of electrical arc welding consumables

Abstract In this paper, chemical and mineralogical characterizations of the black sands of the Mejias placer of Sagua de Tánamo (the most important beach littoral placer of the northwest of oriental Cuba) are exposed. Starting from these characterizations a calculation strategy is developed for the making of the metallurgical load that allows to obtain simultaneously, when processed by carbothermic reduction in an electrical arc furnace, a multicomponent ferroalloy and a useful slag for the making of electric arch welding consumables. The powder of the obtained slag is agglomerated with liquid glass. The resulting pellets, due to their behavior on the submerged arc welding (SAW) present technological and metallurgical properties that correspond with the requirements of an agglomerated flux matrix. The chemical composition of the multicomponent ferroalloy is constituted by metallic elements of high metallurgical and alloyed values (V, Cr, Mo, Ti, Nb). It is appropriate for the formulation of consumables for manual welding (SMAW) and SAW, as well.

Keywords Black sands. Metallurgy. Ferroalloys. Slag. Electrical arc welding.

(*) Trabajo recibido el día 24 de junio de 2004 y aceptado en su forma final el día 2 de agosto de 2004.

(*) Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Carretera a Camaguaní km 5 ?, Santa Clara, VC, CP54830, Cuba.

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

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

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento rápido de la extracción de los recursos naturales ha provocado el agotamiento de una serie de yacimientos de materias primas “baratas”. Se ha notado que el ritmo de su explotación resulta actualmente desproporcionado respecto al incremento de las nuevas reservas, y a veces incluso el balance es negativo^[1].

Los trabajos sobre de la capacidad de beneficio de las arenas negras y la búsqueda de modos de su aprovechamiento integral, así como su elaboración mediante esquemas eficientes y económicos, son investigaciones, aún con interrogantes, que requieren de una recopilación minuciosa de múltiples datos de diferentes fuentes, además de la realización de numerosos experimentos multidisciplinarios por varias instituciones científicas e industriales.

El potencial de utilidad que pueden ofrecer los minerales cubanos es muy elevado. Un ejemplo de lo expuesto lo ofrecen las arenas negras de los placeres Mejía en la desembocadura del río Sagua de Tanamo^[2]. Se han realizado trabajos de valoración de las potencialidades de las arenas negras en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa^[3].

Se produce un salto cuantitativo y cualitativo en el aprovechamiento de los recursos naturales cubanos para el desarrollo de consumibles de soldadura por arco eléctrico, a finales de la década de los ochenta, con la creación del Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS). Los trabajos sobre el desarrollo de diferentes prototipos de electrodos tubulares revestidos para la soldadura manual por arco eléctrico (SMAW) y soldadura con electrodo tubular autoprotectido (FCAW) destinados al recargue^[4] y fundentes aglomerados^[5 y 6] y fundidos para la soldadura automática por arco sumergido (SAW)^[7], entre otros, son ejemplos de una tendencia creciente a emplear materias primas nacionales para suprimir importaciones. Estas materias primas deben cumplir los aspectos siguientes, para utilizarse en el desarrollo de consumible para la soldadura por arco eléctrico:

- Proceder de yacimientos en explotación o de fuentes de reservas capaces de mantener un suministro y una calidad estables dentro de rangos permisibles.
- Tener una composición química ajustable a las diferentes partes constituyentes de los consumibles (sistema de óxidos y su carga aleante) y acorde a los campos de aplicación.

Con este trabajo se pretende indicar una vertiente más de las utilidades posibles que ofrecen las arenas negras en la obtención de ferroaleaciones destinadas al desarrollo de consumibles para la soldadura por arco eléctrico. Además, se expone una caracterización mineralógica visual, bajo microscopio, de las diferentes fracciones obtenidas empleando líquidos pesados, separadores magnéticos y electromagnéticos, ofreciendo los resultados de los análisis químicos. Las arenas negras, también, se pueden someter a un proceso carbotérmico de reducción en un horno de arco eléctrico, obteniéndose una aleación de composición compleja, revelando elementos metálicos de gran perspectiva en el desarrollo de formulaciones de cargas aleantes para consumibles de soldadura por arco eléctrico^[7]. Se continúa la colaboración establecida sobre estas investigaciones, entre el CIS, el Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME) y el CENIM^[8-10].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El Placer Mejías de arenas negras se encuentra a ambos lados de la desembocadura del río Sagua de Tánamo, que fluye hacia el norte de la provincia de Holguín y desemboca en el Océano Atlántico, al este de la bahía de Sagua de Tánamo y al oeste de la playa Mejías. La toma de muestra se realizó en el sector este del placer, en su parte más cercana de la costa, donde las arenas son ricas en magnetita, cromita e ilmenita^[3].

Se seleccionó una cantidad de 5 kg de la muestra inicial de las arenas negras, que se sometió a un lavado en agua y, posteriormente, se secó, a 100 °C, homogeneizó y cuarteó varias veces, extrayéndose una muestra de 3 kg, que será denominada M1.

La muestra M1 se sometió a una clasificación por líquidos pesados (bromoforno, $\rho = 2,891 \text{ g/cm}^3$) y, posteriormente, a una separación magnética y electromagnética según el esquema presentado en la figura 1. Para la separación magnética se empleó un imán permanente tipo PKA II-38-2 de 0,76 Ohm y para obtener las fracciones electromagnéticas se empleó un separador isodinámico de Frantz, con campo variable^[11]. El análisis mineralógico de todas las fracciones se realizó bajo un microscopio binocular estereoscópico, empleando lentes de 10 X a 40 X^[12].

Porciones de las fracciones obtenidas según el esquema de la figura 1, se molieron a un tamaño de grano $< 88 \mu\text{m}$, para la realización de análisis químicos por vía húmeda.

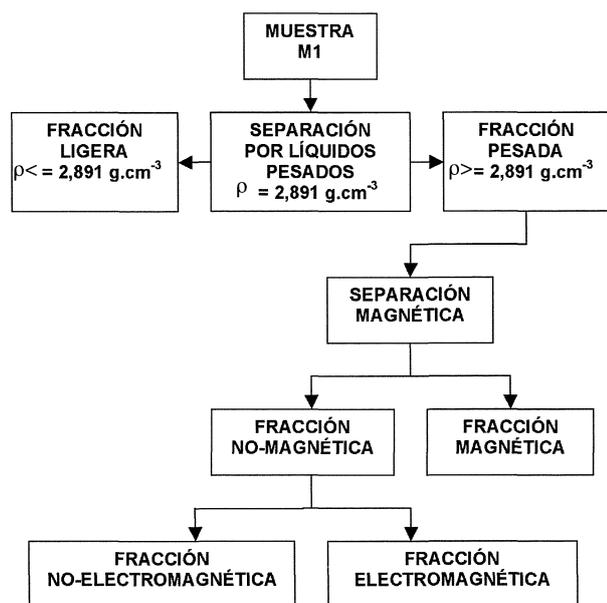


Figura 1. Esquema de obtención de las diferentes fracciones de la muestra de arenas negras M1.

Figure 1. Obtaining scheme of the different fractions of the black sands sample M1.

1 kg de la muestra M1 se somete durante 35 min a una reducción carbotérmica, en un horno eléctrico de arco, alimentado por una fuente de corriente eléctrica del tipo Mansfield G 1000, VC/S de 1000 A y 48 V [6 y 7].

Los análisis químicos de la aleación obtenida se efectuaron con la ayuda de un equipo SPECTROCAST, Tipo CAV7A21B [6 y 13].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Obtención de las fracciones

Una porción representativa de la muestra M1 se sometió a una separación, mediante un embudo separador, con el líquido de densidad elevada bromoformo, obteniéndose una fracción ligera ($\rho < 2,891 \text{ g/cm}^3$) y otra pesada ($\rho > 2,891 \text{ g/cm}^3$) que es 16 veces más abundante que la primera (Tabla I).

Mediante un imán de campo permanente se separo la fracción pesada de las fracciones magnética (f_1^{mag}) y no-magnética ($f_1^{\text{no-mag}}$), cuya relación másica ($R_1^{\text{mag}} = f_1^{\text{mag}} / f_1^{\text{no-mag}}$) es $R_1^{\text{mag}} = 0,87:1$. Dicha relación indica que la fracción no-magnética es 13 % mayor que la magnética. Posteriormente, en un separador magnético isodinámico, accionado a un régimen de 0,5 A (200 kA/m) se obtuvieron la fracción no-magnética ($f_1^{\text{no-mag}}$) y las fracciones electromagnética (f_1^{elmag}) y no-electromagnética ($f_1^{\text{no-elmag}}$). El valor de la relación másica $R_1^{\text{elmag}} = f_1^{\text{elmag}} / f_1^{\text{no-elmag}}$ indica que la fracción electromagnética es, casi, 9 veces mayor que la fracción no-electromagnética. Todos estos resultados expresan que, se debe emplear la estrategia de selección referente a los métodos de separación empleados en la clasificación de las diferentes fracciones: pesada/ligera, magnética/no-magnética, electromagnética/no-electromagnética y sirven, además, de criterio para evaluar la factibilidad económica y tecnológica del beneficio mineralógico industrial de esta mena.

3.2. Caracterización mineralógica

Se realizó a la muestra M1 y sus fracciones, bajo el microscopio binocular estereoscópico, el análisis mineralógico semicuantitativo referido al volumen aproximado que ocupan los granos de cada espécimen mineral (V_m), de acuerdo a la ecuación siguiente [14]:

$$V_m = (n_m/N_T) \cdot 100 \quad (1)$$

donde, n_m es el número de granos del mineral en cuestión y N_T el número total de granos seleccionados.

Para calcular el porcentaje másico del mineral es necesario conocer la densidad del mineral ρ_m y de la muestra ρ_M . Está última se realizó por el método picnométrico. El contenido ponderado del mineral m_m se calcula según:

$$m_m = (V_m \cdot \rho_m) / \rho_M \quad (2)$$

Tabla I. Contribución másica porcentual de las diferentes fracciones constituyentes de la muestra M1 de arenas negras, %

Table I. Mass percentage contribution of the different constituent fractions of the of black sands sample M1, %

Fracciones		Fracción pesada		Fracción no-magnética	
Ligera	Pesada	Magnética	No-magnética	Electromagnética	No-electromagnética
5,83	94,17	46,38	53,62	89,99	10,01

A partir de la cuantificación mineralógica visual, aproximada, de cada una de las fracciones obtenidas de la muestra M1 puede realizarse una apreciación, por recálculo, de cuánto podría aportar cada mineral cuantificado en elementos metálicos, con el objetivo de estimar el origen de otros elementos metálicos presentes en dichos minerales.

En la tabla II se muestra la composición mineralógica de las diferentes fracciones de la muestra M1, determinadas por apreciación visual bajo microscopio.

La fracción magnética (f_1^{mag}) representa 43,68 % de la masa de M1 y está constituida, casi totalmente, por magnetita ($M1 = 93$ %) que representa un potencial aproximado del 29 % en hierro para la muestra M1.

Tabla II. Composición mineralógica por fracciones de la muestra M1, % en masa

Table II. Mineralogical composition for fractions of the sample M1, % in mass

Minerales	f_1^{mag}	f_1^{elmag}	$f_1^{\text{no-elmag}}$	Ligera
Magnetita	93	granos	-	-
Martita	2	-	-	-
Fragmentos de roca con magnetita	3	-	1	-
Cromita	-	45	-	-
Piroxeno	1	20	-	-
Epidota	1	24	-	-
Ilmenita	-	4	-	-
Hornblenda	-	2	-	-
Anfíbol: actinotita	-	4	-	-
Óxidos de hierro	-	1	-	-
Zoisita y clinzoisita	-	granos		
Serpentina	-	granos	-	8
Granate	-	granos	-	2
Esfena	-		65	
Circón	-		17	
Rutilo	-		14	
Apatito	-	-	1	-
Corindón	-	-	granos	
Carbonatos	-	-	-	37
Fragmento de roca cloritizados	-	-	-	35
Feldespato	-	-	-	10
Serpentina	-	-	-	6
Minerales ligeros	-	-	2	2
Cuarzo	-	-	-	granos

La cromita (FeCr_2O_4) se aprecia, visualmente, como uno de los constituyentes principales de la fracción electromagnética (f_1^{elmag}) y representa el 20 % de toda la masa de M1, aportando, potencialmente, el 9,2 de cromo y el 5,8 % de hierro. Otros minerales importantes, según su aporte mássico, son los piroxenos (9 % de M1) y la epidota (11 % de M1), que contribuyen con sílice (SiO_2) y óxidos de calcio (CaO) y magnesio (MgO). La ilmenita (FeTiO_3) puede constituir cerca del 2 % de la muestra M1 y aporta 0,57 % de titanio y 0,66 % de hierro a M1. El rutilo (TiO_2) y la esfena [$\text{CaTi}(\text{SiO}_4)\text{O}$] son los minerales principales portadores de titanio en la fracción no-electromagnética (f_1^{noelmag}) y representan, respectivamente, un contenido potencial de 0,71 y 3,28 %, referido a la muestra total M1. Ambos minerales constituyen 0,43 % del titanio en M1. El circón (ZrSiO_4) es otro constituyente importante de la fracción no-electromagnética. Los contenidos de circonio (Zr) que aporta este mineral son de 0,43 % referido a M1.

3.3. Caracterización química

El análisis químico de la fracción magnética presenta un déficit del 15 %. Este déficit no se corresponde con el contenido que debe presentar el conjunto de óxidos de la fracción magnética determinados por recálculo del análisis mineralógico. El contenido de 42 % de Fe (≈ 60 % del Fe_2O_3) determinado analíticamente está muy por debajo del potencial determinado visualmente de la fracción magnética, que debe ser mayor de 65 % de hierro (> 90 % de Fe_3O_4), lo que significa que la fracción magnética está constituida no sólo por magnetita sino, posiblemente, por minerales magnéticos de apariencia similar como la titanomagnetita, cromotitanomagnetita y cromo espinelas magnéticas, que justifican los altos contenidos relativos de TiO_2 y Cr_2O_3 en el análisis químico para la fracción magnética y posible presencia de los elementos: vanadio, níquel, molibdeno y niobio, entre otros (tablas III y VII).

3.4. Reducción carbotérmica

Para obtener la aleación ferrosa se partió de una cantidad de 2 kg de la muestra M1, que se sometió a una reducción carbotérmica en un horno de arco eléctrico con crisol de grafito, desarrollado en el CIS [5]. La capacidad de carga del horno está enmarcada en un volumen libre de 1.439 cm^3 .

Tabla III. Análisis químico de la muestra M1 y de las fracciones magnética y electromagnética, % en masa

Table III. Chemical analysis and magnetic and electromagnetic fractions of the sample M1, % in mass

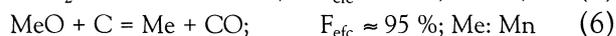
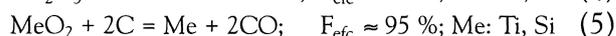
Óxidos	M1	f ₁ ^{mag}	f ₂ ^{elmag}
SiO ₂	12,73	4,07	19,86
TiO ₂	4,41	5,83	3,41
Al ₂ O ₃	5,87	2,37	7,95
Fe ₂ O ₃	37,25	60,28	17,41
Cr ₂ O ₃	15,68	5,29	24,32
MnO	5,13	3,22	6,68
CaO	3,33	0,50	5,66
MgO	4,61	1,69	7,01
Na ₂ O	0,33	0,46	0,22
K ₂ O	0,06	0,06	0,05
P ₂ O ₅	0,09	0,09	0,10
SO ₃	0,20	0,21	0,22
PPI	1,28	1,01	1,49
Σ	90,97	85,08	94,38

La preparación de la carga metalúrgica se realizó teniendo en consideración la composición química y mineralógica de M1 (Tablas II y III).

El primer paso estuvo dirigido a formular las mezclas de ajuste mineral de la muestra M1, con el objetivo de obtener, en la escoria, un contenido (> 60 %) y una relación de óxidos principales (SiO₂, Al₂O₃ y CaO) correspondientes a un punto en el diagrama de fase ternario SiO₂-Al₂O₃-CaO, que presente buenas propiedades metalúrgicas y tecnológicas requeridas, tanto para realizar el proceso de reducción carbotérmica de la muestra M1 como para obtener una escoria que cumpla con los requisitos de una matriz del fundente aglomerado durante el proceso de soldadura por arco eléctrico (SAW).

Para confeccionar las mezclas de ajuste se seleccionaron tres componentes: caliza (53 % de CaO), arena sílice (93 % de SiO₂) y alúmina (99 % Al₂O₃).

Para el cálculo de la cantidad necesaria de coque con un 87 % C, destinado a la reducción de los minerales que conforman la muestra, se tomó en consideración a su composición en óxidos, como base 1.000 g de concentrado lavado (M1). La reducción carbotérmica se considera con un factor de eficiencia (F_{efc}) entre 90 y 95 % para las ecuaciones siguientes^[14]:



El cálculo estequiométrico del coque necesario para las reacciones (3-6) y para la formación de carburos (≈ 25 % adicional) es de 248,30 g para reducir 1.000 g de M1^[13 y 14].

Para que la formulación de la carga metalúrgica tenga, desde el principio, el doble propósito de servir a la reducción carbotérmica y, a la misma vez, obtener en la escoria un sistema de óxidos que garantice adecuadas propiedades metalúrgicas y tecnológicas requeridas en la conformación de una matriz de un fundente aglomerado destinado para la SAW, es necesario conformar una mezcla complementaria que ajuste el sistema de óxidos inicial, que aporta la muestra inicial (M1).

Para poder utilizar la escoria como matriz de un fundente aglomerado hay que plantearse previamente una estrategia de ajuste en la conformación de la carga metalúrgica, a partir de la composición química y de las características mineralógicas de la muestra que será sometida a la reducción carbotérmica.

En el caso de que se reduzca directamente la muestra M1 con carbono, sin otro componente adicional, se esperaría que los productos de la reducción estuvieran constituidos por 73 % de ferroaleación y 27 % de escoria. En la escoria, el sistema de óxidos SiO₂-Al₂O₃-CaO constituiría un 80 % de la composición química, pero la relación (SiO₂:Al₂O₃:CaO = 3,824:1,764:1) se encontraría distante de la zona requerida en el diagrama de fase SiO₂-Al₂O₃-CaO (Fig. 2). Acorde a las características de la matriz de un fundente, ésta, debe presentar una temperatura de fusión unos 200 °C menor que el metal depositado por SAW y mantener una buena estabilidad del arco eléctrico. Por estas razones se eligió la zona de la pseudowollastonita del sistema SiO₂-Al₂O₃-CaO, representada por el equilibrio CAS₂ + α-CS = L, cuyas características están definidas por la composición química: 47,30 % SiO₂, 18,60 % Al₂O₃ y 34,10 % CaO, (SiO₂:Al₂O₃:CaO = 2.543:1:1.833) y la temperatura de fusión de 1.307 °C^[15]. Para lograr esta relación entre los óxidos en la escoria es necesario hacer un cálculo acertado en el balance de la composición química de la carga metalúrgica. El cálculo para la adición de otra mezcla de componentes (óxidos) a la muestra (M1), para lograr la relación de óxidos deseada en la escoria, después de la reducción carbotérmica, puede realizarse por dos métodos^[5-7]:

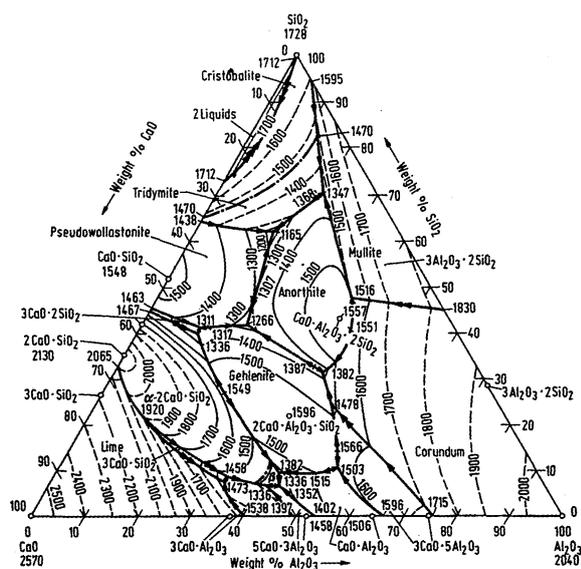


Figura 2. Diagrama de fase $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$.

Figure 2. Phase diagram $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$.

- Cálculo algebraico: se basa en la formulación de ecuaciones algebraicas. Los contenidos de los óxidos se expresan en fracciones en masa y representan los factores de las variables X, Y y Z (los tipos de óxidos), que conforman las tres ecuaciones fundamentales normalizadas.
- Cálculo por adiciones sucesivas: este método se basa, esencialmente, en ajustar la composición de una muestra inicial a partir de adiciones sucesivas y selectivas de componentes individuales (óxidos), obteniéndose, de esta forma, nuevas muestras en las que se repetirá el mismo procedimiento. Se realizarán tantas adiciones como sea necesario, hasta lograr la concentración deseada de cada óxido en la muestra final.

Las mezclas de adición para el ajuste mineral, obtenidas según los métodos de cálculos señalados se incluyen en la tabla IV.

En la tabla IV se observa que por el método de adiciones sucesivas de componentes se logra obtener una mezcla que es 50,46 % menor, en masa, que la obtenida por el método de ecuaciones algebraicas y con el correspondiente ahorro de alumina. Tanto a partir de la mezcla I, como en la II, se logra que la relación de óxidos de la escoria sea $\text{SiO}_2\text{:Al}_2\text{O}_3\text{:CaO} = 2,543\text{:1,0:1,833}$, acorde a la concentración predeterminada de eutéctico en la zona de la pseudowollastonita, que se modifica con la adición de fluorita (CaF_2) (tabla V).

Los componentes de la carga metalúrgica se mezclaron y homogeneizaron, acordes a un tamaño

Tabla IV. Formulación de las mezclas de ajuste para 1000 g de M1

Table IV. Formulation of the adjustment mixtures for 1000 g of M1

Componentes minerales	Mezcla I (Algebraico)		Mezcla II (Adiciones sucesivas)	
	g	% en masa	g	% en masa
Caliza (53 % CaO)	260,53	68,28	166,53	86,49
Arena sílice (93 % SiO_2)	95,38	25,00	26,02	13,51
Alúmina (99 % Al_2O_3)	25,66	6,72	0,0	0,0
Total	381,57	100	192,55	100

Tabla V. Confección de mezclas metalúrgicas finales

Table V. Making of final metallurgical mixtures

Componentes minerales	Mezcla I		Mezcla II	
	g	% en masa	g	% en masa
Muestra M1	1.000	58,55	1.000	66,23
Coque (87 % C)	248,30	14,54	248,30	16,44
Caliza (53 % CaO)	260,53	15,25	166,53	11,03
Arena sílice (93 % SiO_2)	95,38	5,58	26,02	1,72
Alúmina (99 % Al_2O_3)	25,66	1,50	0,0	0,0
Fluorita (96 % CaF_2)	78,23	4,58	69,16	4,58
Total	1708,10	100	1510,01	100

de grano de 0,2 mm, en un tambor mezclador^[7]. La temperatura del horno se mantuvo a 1.600 °C. El crisol y el electrodo de grafito estaban conectados a los polos de una fuente de corriente continua del tipo MANSFIELD G 1000 VC/S de 1.000 A y 48 V (48 kW), que trabajó a un 70 % de su capacidad por un periodo de 35 min. Durante todo el periodo de fusión-reducción hubo una buena estabilidad del arco eléctrico de las dos formulaciones metalúrgicas finales. No obstante, la muestra metalúrgica se procesó con cierta mayor facilidad y la separación escoria metal resultó, también, más fácil, de acuerdo al vertido empleado.

La operación de vertido de la masa fundida se realizó sobre agua a temperatura ambiente, donde se produce un fuerte choque térmico. En esta etapa, es importante controlar la temperatura, altura

y velocidad de vertido para lograr los efectos deseados en los productos de la fusión-reducción, estableciéndose para esta etapa los parámetros siguientes:

Altura = 0,5 – 0,6 m.
Temperatura = 1500 – 1600 °C.
Velocidad = 1,0 – 1,5 litros/min.
Volumen de la cubeta receptora = 50 veces mayor que el volumen de la masa fundida.

El choque térmico provoca un efecto de granulación previa y altas tensiones internas en la ferroaleación, ocasionando que sea frágil, lo que favorece su posterior molienda. En el caso de la escoria fundida, al caer ésta en el agua se solidifica bruscamente con un alto grado de vitrificación y amorfismo con una textura muy porosa y frágil. Estas propiedades, entre otras, de ambos productos de la reducción, determinan favorablemente la separación y el ulterior procesamiento. La separación de la escoria y de la ferroaleación se realiza acorde a las etapas siguientes:

- Secado: La escoria húmeda (40 % de agua) se escurre y orea hasta que alcance una humedad del 20-25 %. Posteriormente, se concluye el secado en una estufa a 200 °C, alcanzando una humedad de 0,1 %.
- Tamizado grueso: A consecuencias de la granulación de la masa fundida por choque térmico en agua se produce una diferencia notable entre el tamaño y fragilidad de los granos de escoria y los de ferroaleación, lo que facilita que casi el 90 % de la ferroaleación se pueda separar por tamización (malla, 5 mm).
- Molienda y tamizado fino: La escoria tamizada por la malla de 5 mm se somete a un proceso leve y corto (5 min) de molienda, en un molino de bolas cerámicas. A consecuencia de la marcada diferencia de dureza y fragilidad, de ambos productos, se provoca una diferencia notable de tamaño de grano entre la escoria y los granos de ferroaleación atrapados en ella. Posteriormente, se pasa la masa molida por un tamiz de 1 mm de luz de malla, recuperándose el 85 % (> 1 mm) de la ferroaleación retenida en la escoria. Lo que significa que, finalmente, la escoria podría contener posiblemente < 1,5 % de ferroaleación compleja residual.
- Separación magnética: La recuperación del resto (99 %) de la ferroaleación (< 1,5 %) contenida en la escoria se realiza mediante separación mag-

nética. Con esta secuencia se obtienen, aproximadamente, 440 g de ferroaleación y 510 y 378 g de escoria, correspondientes a las formulaciones metalúrgicas de la mezcla-I y mezcla-II, respectivamente, por cada 1.000 g de concentrado mineral de M1 procesado, lo que expresa una eficiencia promedio, para ambas formulaciones metalúrgicas, del 92 %. La capacidad media de producción del horno es de 1,5 kg de ferroaleación y 1,74 kg de escoria por hora.

3.5. Caracterización de los productos

3.5.1. Escorias

Las composiciones químicas de las escorias vítreas y amorfas se ofrecen registradas en la tabla VI. Las escorias se muelen (< 0,1 mm) y, posteriormente, se aglomeran por peletización con vidrio líquido (30 % de la masa seca de escoria) y se secan a 300 °C, durante 2 h.

El proceso de peletización arroja más del 85 % de las masas granuladas que se encuentran en el rango granulométrico de 0,25 a 3,0 mm [4 y 5]. La masa granulada seca (0,25-3,0 mm; 0,1 % H₂O) se somete a un proceso SAW con alambre de bajo contenido de carbono, donde presentan buena estabilidad del arco, emanan poco humo, no hay presencia de llama y los cordones depositados presentan buen aspecto superficial, todo lo cual indica que las escorias presentan buenas características para ser empleadas como matriz de fundentes aglomerados.

Tabla VI. Composición de escorias, % en masa

Table VI. Composition of slag, % in mass

Óxidos	Mezcla I	Mezcla II
SiO ₂	33,05	29,83
Al ₂ O ₃	13,00	11,74
Cr ₂ O ₃	4,92	5,75
FeO	3,34	3,90
MnO	1,74	2,04
CaO	23,84	21,51
MgO	7,35	9,21
Na ₂ O	0,53	0,66
K ₂ O	0,10	0,12
SO ₃	0,24	0,30
P ₂ O ₅	0,32	0,40
CaF ₂	11,57	14,54

3.5.2. Ferroaleaciones

Las ferroaleaciones obtenidas se someten a una trituración en una trituradora de mandíbulas y, luego, a una molienda en un molino de bolas durante 15 min. Más del 85 % de la ferroaleación se encuentra en rango granulométrico entre 0,08 y 2,5 mm, rango que se emplea, frecuentemente, en la confección de formulaciones de cargas aleantes de consumibles de soldadura por arco eléctrico. Posteriormente, se someten estas ferroaleaciones a una caracterización química, que se efectúa en un equipo SPECTROCAST, Tipo CAV7A21B de potencia 1250 VA, 60 Hz y alimentación 230 V bajo atmósfera controlada de argón. El resultado promedio del análisis de 17 elementos de las ferroaleaciones se resume en la tabla VII.

A partir de la composición química compleja e interesante de las ferroaleaciones obtenidas, no pueden clasificarse éstas, ni como acero ni, tampoco, como hierro fundido. Resulta interesante valorar, en las ferroaleaciones, el posible origen de los contenidos relativamente altos de los elementos molibdeno (2,87-2,76 %), niobio (>1,80 %) y vanadio (>1,20 %), que son caros y escasos en la naturaleza (tabla VII). El precio de la ferroaleación en su forma primitiva se calcula en 38 veces lo que puede valer un acero de baja aleación y bajo contenido de carbono (tabla VII). En el caso de que las ferroaleaciones sean molidas e insertadas en las cargas aleantes de los consumibles para la soldadura el valor añadido aumenta en varias veces más.

Por recálculo, a partir de los análisis químicos de las ferroaleaciones y de la muestra M1 y sus fracciones, se llega a la convicción de que algunos de estos elementos deben formar parte en proporciones importantes en diferentes minerales de hierro, titanio y, probablemente, de cromo, en la fracción magnética de las arenas negras

Resulta interesante analizar la información que ofrece el contenido químico de la ferroaleación compleja, obtenida a partir de la muestra M1 de las arenas negras, en la confección de cargas aleantes para el desarrollo de consumibles destinados a la soldadura por arco eléctrico: electrodos para la SMAW y fundentes para la SAW.

Desde el punto de vista químico se observa que la suma de los contenidos de los elementos molibdeno, vanadio, titanio, cromo, níquel, niobio y manganeso representan alrededor del 28 % de la composición y que junto con el hierro, Fe (53 %) y el carbono, C (5,40 %) constituyen el 87 % de la ferroaleación.

Tabla VII. Composición química de la ferroaleación obtenida de la muestra M1, mezcla I y mezcla II

Table VII. Chemical composition of the obtained ferroalloy of the sample M1, mixture I and mixture II

Elementos	% en masa (1)	% en masa (2)	I	II	IIIa	IIIb
Fe	53,62	54,23	5,0	1*	0,5262	0,5423
Mn	10,47	10,25	0,09	10	1,047	1,025
Cr	6,82	7,01	0,02	25	1,705	1,7525
Ti	3,60	3,25	0,60	160	5,76	5,20
Mo	2,87	2,76	3×10^{-4}	170	4,879	4,692
Ni	2,14	2,17	0,008	17	0,3638	0,3689
Nb	> 1,80	> 1,80	0,001	800	14,40	14,4
V	> 1,20	> 1,20	0,015	750	9,0	9,0
Cu	4,20	4,18	0,01	7,5	0,315	0,3135
Sn	0,36	0,31	0,004	22	0,0792	0,0682
Pb	0,36	0,28	0,0016	2,5	0,009	0,007
C	> 5,40	> 5,40	0,10	-	-	-
Si	> 4,56	> 4,56	27,5	-	-	-
Al	> 2,40	> 2,40	8,6	6	0,144	0,144
Mg	> 0,140	> 0,14	2,0	8	0,0112	0,0112
P	0,066	0,068	0,08	-	-	-
S	0,003	0,002	0,09	-	-	-
Σ	100	100,01			38,24	37,53

I = Promedio de la composición química elemental de la corteza terrestre;

II = Costo relativo de producción de los metales tomando como base unitaria el del Fe;

III a,b = Contribución relativa de cada elemento metálico en el precio de las ferroaleaciones obtenidas de la mezcla 1(a) y de la mezcla 2(b).

El contenido relativamente alto de carbono (5,40 %), que presenta la ferroaleación presupone la existencia de varios tipos de carburos, que pueden ser transferidos parcialmente a los depósitos de soldadura. Los carburos de los elementos que pueden conformar la ferroaleación multicomponente, se pueden dividir en dos grupos: grupo I: Fe₃C, Mn₃C, Cr₂₃C₆, Cr₇C₃, Fe₃MoC y grupo II: Mo₂C, VC, TiC, NbC. Pero, cuando en el proceso de obtención de la ferroaleación concurren varios elementos correspondientes a uno de los dos grupos de carburos, no deben formarse carburos puros si no la disolución de varios elementos en un mismo tipo de carburo, por ejemplo (Cr,Mn,Fe)₂₃C₆ o

(Ti,Nb)C. Los carburos correspondientes al grupo I presentan estructuras complejas semejantes a la cementita Fe₃C. En el caso de los carburos del grupo II, presentan una estructura cuya red cristalina es algo menos compleja (fases de inserción) y cristalizan por lo general con déficit considerable de carbono y son difícilmente solubles en austenita^[15].

El análisis cualitativo del difractograma complejo de la ferroaleación indica la presencia de varias fases, presentando, algunas de ellas, un marcado desorden reticular (tabla VIII y Fig. 3).

La existencia de la posible fase (Cr,Mn)₇C₃ en la ferroaleación está caracterizada por dos bandas: la primera presenta un máximo a 2,031 Å y se encuentra ubicada en rango angular 2θ = 44,50 – 45,75°; la segunda presenta un máximo bien definido a 1,758 Å, en el rango angular 2θ = 51,25 – 51,90°. Otra línea ancha, a 2,284 Å (2θ = 39,45°), confirma la existencia de esta fase.

Las líneas más importantes del difractograma del carburo (Cr,Mn)₂₃C₆ coinciden con las del (Cr,Mn)₇C₃, pero esta fase se define, además, por la presencia de las líneas 2,395; 2,157 y 1,887 Å.

La existencia de los carburos más simples del tipo Cr₇C₃, Mn₇C₃, Cr₂₃C₆, Mn₂₃C₆ u otros simila-

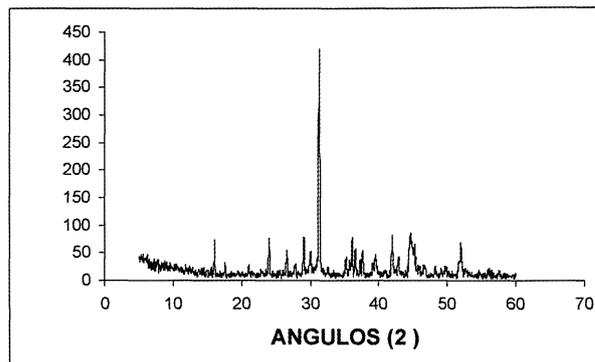


Figura 3. Patrón de difracción de rayos X de la ferroaleación.

Figure 3. X-Rays diffraction pattern of the ferroalloy.

res no pudo definirse mediante la difracción de rayos-X en la ferroaleación por estar estos influenciados por el desorden reticular presente en los mismos. La presencia de grafito se atribuye a la existencia de las líneas de difracción a 3,354 y 1,677 Å.

La fase principal de la ferroaleación es, aparentemente, una aleación compleja del tipo Fe_xCr_zMn_y, con bajos contenidos relativos de níquel, titanio, vanadio, molibdeno, niobio y carbono, que está representada en el patrón de difracción por las líneas siguientes: 2,860 Å (100), 5,520 Å (10), 3,707 Å (10), 2,487 Å (10), 3,071 Å (9).

Durante el proceso de soldadura SMAW y SAW las temperaturas distribuidas por todo el baño de soldadura oscilan entre 1.500 y 5.000 °C. En este amplio intervalo de temperaturas en el baño de soldadura, los elementos constituyentes de la aleación multicomponente obtenida pueden encontrarse independientes, por lo que pueden clasificarse según sus funciones y relaciones con el hierro (Fe ≈ 53 %) o entre sí, en cinco grupos:

- Elementos aleantes: Cr (6,82-7,01 %), Ni (2,14-2,17 %), Mo (2,87-2,76 %), Nb (1,80 %), V (1,20 %), Mn (10,25-10,47 %), Ti (3,25-3,60 %) y Si (4,56 %).
- Formador de carburo: C (> 5,40 %).
- Desoxidantes: Al (2,40 %), Mg (0,14 %), Si (4,56 %) y Mn (10,47 %).
- Poco solubles en Fe: Cu (4,20 %), Pb (0,36 %) y Sn (0,35 %).
- Impurezas: S (0,003 %) y P (0,07 %).

En la formación de los cordones de soldadura, los elementos aluminio, silicio, estaño, molibdeno, vanadio, titanio y cromo (según su porcentaje en

Tabla VIII. Valores de las distancias interplanares d(Å) e intensidades relativas (I_{rel}) del patrón de difracción de la ferroaleación multicomponente

Table VIII. The values of the distances d(Å) and relative intensities (I_{rel}) of the diffraction pattern of the multicomponent ferroalloys

No	d(Å)	Irel	No	d(Å)	Irel	No	d(Å)	Irel
1	5,520	10	15	2,750	2	29	1,977	1
2	5,026	4	16	2,689	1	30	1,947	2
3	4,220	3	17	2,549	4	31	1,889	1
4	3,888	1	18	2,512	3	32	1,856	1
5	3,838	1	19	2,487	10	33	1,833	1
6	3,777	1	20	2,462	7	34	1,799	1
7	3,707	10	21	2,413	3	35	1,758	8
8	3,470	1	22	2,395	7	36	1,739	1
9	3,430	1	23	2,301	3	37	1,677	1
10	3,353	5	24	2,284	4	39	1,637	1
11	3,210	3	25	2,157	10	40	1,601	1
12	3,071	9	26	2,110	4			
13	2,987	4	27	2,031	10			
14	2,860	100	28	2,006	6			

la ferroaleación) son los que bajan la temperatura A_4 y elevan la A_3 , estrechando la región de existencia de la fase γ (ampliando la región α), mientras los elementos manganeso y níquel (el 21 % de la ferroaleación) elevan la temperatura A_4 y bajan a A_3 , es decir amplían la región γ (estrechan la región α).

La presencia de cierta cantidad de elementos del primer grupo (alfágenos) estabiliza el estado α en los cordones base hierro desde la temperatura de fusión de las aleaciones hasta la del ambiente que, por tal efecto, son denominadas, como ferríticas (α). Por otro lado, ciertos contenidos de manganeso y níquel estabilizan el estado γ en los cordones base hierro, en igual intervalo de temperaturas, denominándose, éstos, austeníticos (ver los diagramas de fase en^[15]).

4. CONCLUSIONES

- Los análisis mineralógicos y químicos de las diferentes fracciones pesadas y ligeras, así como de las magnéticas y electromagnéticas de la muestra M1 del placer de las arenas negras Mejías, conducen a plantear el cálculo y desarrollo de formulaciones adecuadas de la carga metalúrgica, que permiten obtener, por reducción carbotérmica, con buen rendimiento y de forma simultánea, una escoria vítrea y porosa con alto grado de fragilidad y una ferroaleación multicomponente, ferromagnética y frágil, propiedades que permiten su fácil procesamiento relativo y una separación mayor del 98 % de la escoria.
- La caracterización química de las escorias indica que el conjunto de óxidos SiO_2 , Al_2O_3 y CaO constituye entre el 63 y 72 % de su composición química y que la relación entre ellos es la esperada ($\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{CaO} = 2,54:1,0:1,83$), determinando, en la práctica, el buen comportamiento tecnológico y metalúrgico de los polvos de la escoria granulada con vidrio líquido como matriz de un fundente aglomerado, para la soldadura por arco sumergido (SAW).
- Mediante un proceso de reducción carbotérmica de cargas metalúrgicas de la muestra M1 es factible obtener, de forma rentable, polvos de carburos complejos de cromo y manganeso y de aleaciones complejas constituidos por elementos metálicos alfaégenos y gammaégenos, de gran interés industrial y, en especial, de alto valor

metalúrgico para el desarrollo de cargas aleantes de consumibles para soldadura por arco eléctrico (SMAW y/o SAW), con un amplio rango de aplicaciones en el campo del recargue y de la soldadura propiamente dicho.

REFERENCIAS

- [1] R. QUINTANA-PUCHOL, II Encuentro nacional de Gestión y Tecnología, Academia de Ciencias de Cuba, Habana, 1993, p. 55.
- [2] D. DRICEU, Tesis de Trabajos de Diploma, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 1998.
- [3] R. DÍAZ-MARTÍNEZ, J. BATISTA-RODRÍGUEZ, J. BLANCO-MORENO y R. GONZÁLEZ-CARABALLO, *Rev. Minera, Geol. Mineral.* 14 (1997) 13-17.
- [4] M. RODRÍGUEZ, Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 1992.
- [5] G. PORTAL, Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, 1994.
- [6] L. PERDOMO, Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería Metalúrgica, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba, 1999.
- [7] C.R. GÓMEZ, Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, 1995.
- [8] R. QUINTANA, A. CRUZ, L. PERDOMO, G. CASTELLANOS, L.L. GARCÍA, A. FORMOSO y A. CORES, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 25-34.
- [9] A. CRUZ, R. QUINTANA, L. PERDOMO, L.L. GARCÍA, A. FORMOSO y A. CORES, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 114-122.
- [10] L. PERDOMO, R. QUINTANA, A. CRUZ, J. CASTELLANOS, L.L. GARCÍA, A. FORMOSO y A. CORES, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 268-278.
- [11] J. DATSKO, *Materials selection for design manufacturing theory and practice*, Ed. Marcel Dekker, New York, 1997, p. 376.
- [12] S. AMELINCKX, *Handbook of microscopy: application in materials science, solid state physics, and chemistry*, Ed. VCH, Weinheim, New York, 1997, p. 368.
- [13] R. QUINTANA, L. PERDOMO, A. CRUZ y L. GÓMEZ, *Rev. Minera, Geol. Mineral.* 19 (2001) 37-46.
- [14] A. CHATTERJEE, *Beyond the blast furnace*, Ed. CRC Pre., London, 1994, p. 244.
- [15] M. HILLER, *Phase equilibrium, phase diagrams, and phase transformations: their thermodynamic basis*, Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1997, p. 538.