

LAS ARENAS NEGRAS DE MEJÍAS: NUEVA FUENTE PARA LA OBTENCIÓN DE CONSUMIBLES PARA LA SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO

THE BLACK SANDS OF MEJÍAS: NEW FOUNTAIN FOR OBTAINING ELECTRIC ARC WELDING CONSUMABLES

RAFAEL QUINTANA PUCHOL
LORENZO PERDOMO GONZÁLEZ
AMADO CRUZ CRESPO
LUIS GÓMEZ RODRÍGUEZ

E-mail: rquin@uclv.etecsa.cu
Universidad Central Marta Abreu de Las Villas

RESUMEN: A partir de la caracterización química y mineralógica de las fracciones pesadas, magnéticas y electromagnéticas de las arenas negras del placer de Mejías, se logró confeccionar una carga metalúrgica para obtener una escoria útil como matriz de fundentes para la soldadura automática (SAW) y una ferroaleación como carga aleante para diferentes consumibles de soldadura por arco eléctrico. La escoria obtenida presenta una composición de óxidos que garantiza las propiedades metalúrgicas y tecnológicas de la matriz de fundente deseado. La aleación compleja lograda por reducción carbotérmica en horno de arco eléctrico con crisol de grafito presenta relativamente altos contenidos de Mo (2,87 %), Nb (> 1,80 %), V (> 1,20 %), entre otros elementos metálicos de alto valor metalúrgico para la soldadura manual (SMAW) y automática (SAW).

Palabras clave: Arenas negras, soldadura, arco eléctrico, fundente, ferroaleación.

ABSTRACT: By means the chemical and mineralogical characterization of the heavy, magnetic and electromagnetic fractions of the black sands from the placer deposit of Mejías was succeeded to make a metallurgical load in order to obtain an useful slag as matrix flux for the automatic welding (SAW) and a ferroalloy as alloying load for several electric arc welding consumables. The obtained presents an oxide's composition that guarantees the metallurgical and technological properties and of the desired slag of flux. The complex alloy obtained by carbotermic reduction in electric arc furnace with graphite crucible presents relatively high contents of Mo (2,87%), Nb (> 1,80%), V (> 1,20%) among other metallic element of high metallurgic value for the manual and automatic welding (SMAW and SAW).

Key words: Black sands, electrical arc welding, slag, ferroalloy.

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la extracción de los recursos naturales ha provocado el agotamiento de un número relativamente alto de yacimientos de materias primas baratas. La desproporción entre el ritmo de explotación y el incremento de las nuevas reservas es notable y el balance llega a ser negativo en ocasiones. En la región nororiental de Cuba se han localizado yacimientos de placer de arenas negras, a partir de las cuales pueden obtenerse consumibles para soldadura. El placer Mejías está ubicado a ambos lados de la desembocadura del río Sagua de Tánamo, en el noreste de la provincia de Holguín (Driceu,

1998). Estos placeres han sido objeto de investigaciones geológicas y geofísicas por parte de especialistas del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (Díaz Martínez, 1995, 1997).

Los trabajos de caracterización de la capacidad de beneficio de las arenas negras y la búsqueda de formas para su aprovechamiento integral, así como su elaboración mediante esquemas eficientes y económicos, son investigaciones aún inconclusas que requieren de la compilación minuciosa de datos de diferentes fuentes que, a menudo, resultan incluso contradictorias, así como de la realización de experimentos multidisciplinarios por parte de las instituciones científicas e industriales.

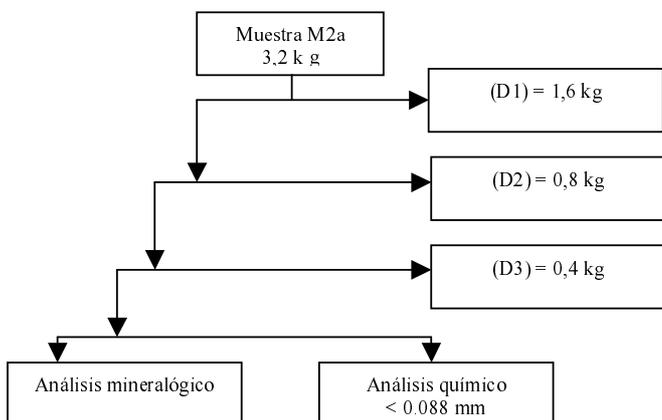


Figura 1. Esquema de preparación de muestras.

A finales de la década del ochenta y con la creación del Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), el aprovechamiento de los recursos naturales cubanos para el desarrollo de consumibles de soldadura por arco eléctrico experimenta un salto cuantitativo y cualitativo. Los trabajos sobre el desarrollo de diferentes prototipos de electrodos tubulares revestidos para la soldadura manual por arco eléctrico (SMAW) y alambres tubulares autoprottegidos para soldadura semiautomática por arco abierto (FCAW) destinados al recargue (Rodríguez Pérez, 1992), fundentes aglomerados (Portal Depestre, 1994; Perdomo González, 1999) y fundidos para la soldadura automática (SAW) (Gómez Pérez, 1995), entre otros, son ejemplos de una tendencia creciente al empleo de materias primas naturales cubanas en función de suprimir importaciones.

Las materias primas naturales que van a ser empleadas en el desarrollo de consumibles para la soldadura por arco eléctrico deben cumplir los requerimientos siguientes:

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

De acuerdo con los criterios de Perdomo González (1997), si las arenas negras son sometidas a un proceso carbotérmico de reducción en un horno de arco eléctrico con un crisol de grafito, se obtiene una aleación de composición compleja que revela elementos metálicos de gran perspectiva en el desarrollo de formulaciones de cargas aleantes para consumibles de soldadura por arco eléctrico.

El objetivo del trabajo es valorar la posibilidad de usar las arenas negras del placer Mejías en la obtención, por procesos carbotérmicos, de ferroaleaciones y escorias destinadas al desarrollo de consumibles para la soldadura por arco eléctrico, partiendo de los resultados de la caracterización mineralógica y de análisis químicos de las diferentes fracciones obtenidas mediante separación densimétrica, magnética y electromagnética.

MATERIALES Y MÉTODOS

La toma de muestra se realizó en el sector este del placer Mejías, en la parte más cercana a la costa donde las arenas son ricas en magnetita, cromita e ilmenita (Díaz Martínez, 1997). De la muestra inicial (Mi) se seleccionó una masa de 4,5 kg de arenas negras, la cual fue homogeneizada y con posterioridad dividida en dos porciones: M1 ($\frac{1}{4}$ de Mi, aproximadamente 1 kg) y M2 ($\frac{3}{4}$ de Mi, aproximadamente 3,5 kg). A su vez, la muestra M2 fue subdividida en dos porciones: una de 3,2 kg (M2a) y otra de 0,3 kg (M2b). La muestra M2a se sometió a un proceso de lavado de jagua de forma escalonada, y se obtuvieron las muestras D1, D2 y D3 de acuerdo con el esquema que se expone en la figura 1.

Con el objetivo de comparar las muestras M1 y M2b entre sí, y cada una de ellas con la muestra M2a, las muestras M1 y M2b se sometieron a una separación fraccional empleando líquidos pesados (bromofórmico, $\rho = 2,891 \text{ g. cm}^{-3}$) y posteriormente se realizó separación magnética y electromagnética según el esquema presentado en la figura 2. También se realizó separación magnética y electromagnética a las muestras del lavado de jagua (D1+D2) y D3 de la muestra M2a. En la separación magnética se empleó un imán permanente tipo PKA II-38-2 de 0,76 ohm. Para obtener las fracciones electromagnéticas se empleó el separador isodinámico de Frants con campo variable (Datsko, 1997) accionado a un régimen de 0,5A (200 kA/m).

El análisis mineralógico semicuantitativo de todas las fracciones se realizó bajo el microscopio binocular estereoscópico, empleando lentes de 10x a 40x y referido al volumen aproximado que ocupan los granos de cada espécimen mineral (V_m) de acuerdo con la ecuación siguiente (Amelinckx *et al.*, 1997):

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

donde n_m : número de granos del mineral en cuestión y N_T : número total de granos seleccionados

Para calcular el porcentaje másico del mineral se necesita conocer la densidad del mineral ρ_m y de la muestra ρ_M . Esta última se obtuvo por el método picnométrico. El contenido ponderado del mineral m_m se calculó de acuerdo con:

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

A partir de la cuantificación mineralógica de las fracciones obtenidas puede realizarse una apreciación por recálculo del aporte de elementos metálicos de cada mineral cuantificado, con vistas a estimar el origen de otros elementos metálicos ocultos en dichos minerales.

Para realizar el análisis químico clásico por vía húmeda se tomaron de la muestra inicial (Mi), de las fracciones magnéticas de M1 y M2a, y de la fracción electromagnética de la última, porciones de 10g que fueron trituradas hasta un tamaño de grano $< 0,088 \text{ mm}$ (170 mesh).

Para obtener la aleación ferrosa se partió de aproximadamente 0,75 kg de la fracción magnética de D1+D2 de la muestra M2a, que se sometió a una reducción carbotérmica

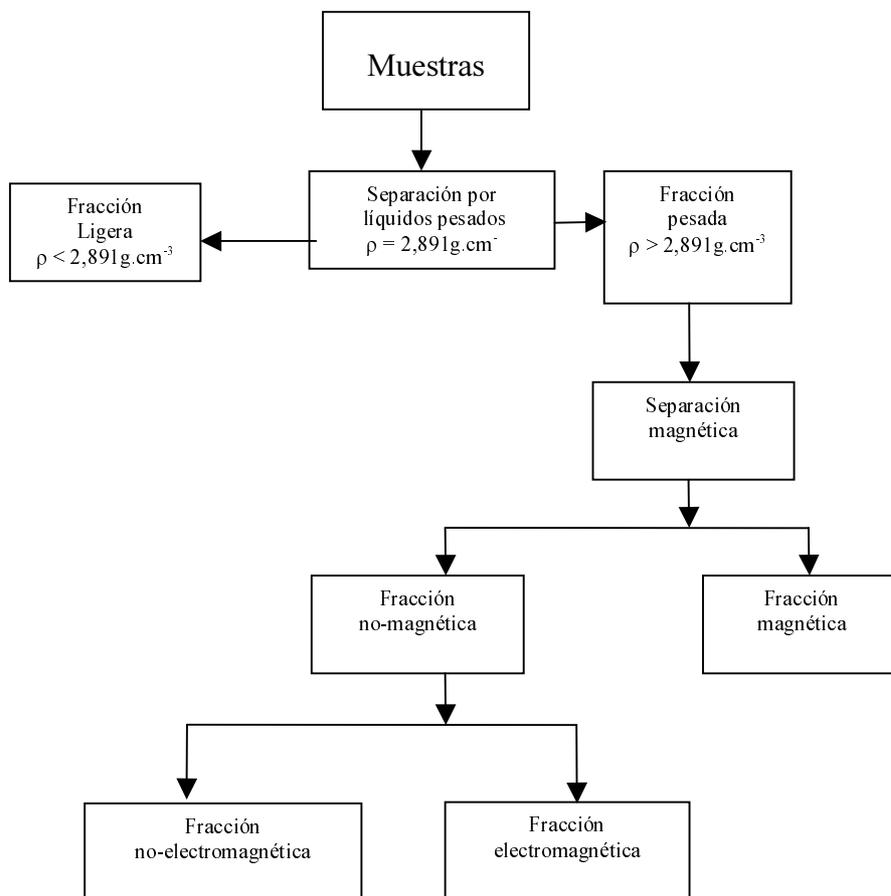


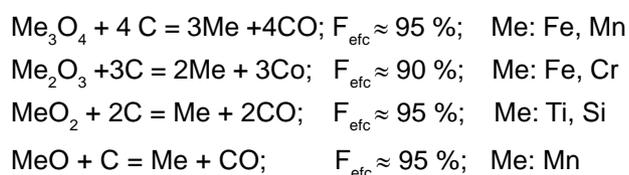
Figura 2. Esquema de obtención de las diferentes fracciones.

en un horno de arco eléctrico con crisol y electrodo de grafito desarrollado y perfeccionado en el Centro de Investigaciones de Soldadura (Gómez Pérez, 1995; Perdomo González, 1997 y 1999). El crisol y el electrodo de grafito se conectan a los polos de una fuente de corriente directa del tipo Mansfield G 1000 VC/S de 1 000 A y 48 V (48 kW), que trabaja a un 70 % de su capacidad por un período de 35 min. La temperatura de trabajo del horno fue de 1 600 °C y estuvo controlada con un pirómetro checo marca Metra. La capacidad de carga del horno está enmarcada en un volumen libre de 1 439 cm³.

La formulación de la carga metalúrgica tiene el doble propósito de servir al proceso de reducción carbotérmica y, a la vez, de obtener una escoria con 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, así como una aleación multicomponente factible de ser empleada como carga aleante en diferentes consumibles de soldadura. Para lograr esta función dual es necesario que los óxidos del sistema de la escoria se encuentren en la relación siguiente: SiO₂:Al₂O₃:MgO:CaO = 1: 1: 1: 0,5, que es modificada con la adición de fluorita (CaF₂).

La confección de la carga metalúrgica se realizó considerando la composición química de la fracción magnética de la muestra mezclada D1+D2. Para el cálculo de la cantidad de coque necesaria para la reducción de los minera-

les que conforman la muestra se tomó como base 1,0 kg de concentrado magnético, en función de su composición en óxidos. La reducción carbotérmica considera un factor de eficiencia (F_{efc}) entre 90 y 95 % para las ecuaciones siguientes (Perdomo González, 1997):



Los cálculos estequiométricos del carbono demandado por las cuatro reacciones y del necesario para la formación de carburos (≈ 25 % adicional), arrojan un monto total de 0,346 kg de coque con un 87 % de carbono activo para reducir 1,0 kg de concentrado mineral magnético (Hiller, 1997).

La carga metalúrgica queda definitivamente conformada de la forma siguiente:

Concentrado mineral	= 67,58 %
Coque	= 23,32 %
Caliza (52 % de CaO)	= 4,55 %
Fluorita (CaF ₂)	= 4,55 %
Total	100,00 %

Los componentes de la carga se mezclaron y homogeneizaron, acorde a un tamaño de grano de 0,2 mm, en

TABLA 1. CONTRIBUCIÓN DE LAS DIFERENTES FRACCIONES CONSTITUYENTES (EN %) DE LAS MUESTRAS M1 Y M2 DE LAS ARENAS NEGRAS

MUESTRAS	Fracción		Fracción		Fracción	
	Ligera	Pesada	Magnética	No-magnética	Electromagn.	No-electromagn.
M1	3,66	96,34	41,50	54,63	52,66	0,50
M2b	8,00	92,00	45,86	44,13	43,85	0,26
M2a	D1+D2	...	45,85	54,15	50,04	4,11
	D3	...	43,17	56,83	36,19	20,64

un tambor mezclador según procedimientos establecidos (Perdomo González, 1997 y 1999).

La operación de vertido de la masa fundida se realiza sobre agua a temperatura ambiente, donde se produce un fuerte choque térmico. En esta etapa es importante controlar con exactitud la temperatura, la altura y la velocidad de vertido, para lograr los efectos deseados en los productos de la fusión-reducción; para esta etapa se establecen los parámetros siguientes:

Temperatura = 1 500 –1 600 °C.

Velocidad = 1,0 –1,5 L/min.

Volumen de la cubeta receptora = 50 veces mayor que el de la masa fundida.

La caracterización química de la escoria se realiza por vía húmeda y por absorción atómica, según procedimientos para aluminosilicatos. En el caso de la aleación obtenida, ésta se somete primero a un proceso de trituración en un molino de mandíbulas y con posterioridad a uno de bolas durante 15 minutos. Aproximadamente, más del 80 % de la masa de la ferroaleación se encuentra en rango granulométrico entre 0,08 y 0,35 mm; rango que se emplea con frecuencia en la confección de formulaciones de cargas aleantes de consumibles de soldadura por arco eléctrico.

Luego, la ferroaleación se caracteriza químicamente con ayuda de un equipo SPECTROCAST, Tipo CAV7A21B de potencia 1 250 VA, 60Hz y alimentación 230V bajo atmósfera controlada de argón.

RESULTADOS

De la separación densimétrica se obtuvo para la muestra M1 una fracción pesada más abundante que la fracción ligera (relación de 26); sin embargo, para la muestra M2b la fracción pesada fue menor (relación de 11,5). La fracción magnética de M1 predomina en un 36 % sobre la no-magnética, mientras que en M2b el predominio de la fracción magnética no es tan evidente (3,8 %). En relación con las muestras (D1+D2) y D3, se observó un comportamiento similar en cuanto a la abundancia de la fracción magnética respecto a la no-magnética (Tabla 1).

La segregación electromagnética de las muestras M1 y M2b brinda resultados parecidos, mientras las muestras (D1+D2) y D3 difieren entre sí y de las primeras mencionadas. El predominio de las fracciones electromagnéticas es absoluto (>100 veces) sobre la fracción no-electromagnética para las muestras M1 y M2b. En las muestras de lavado de jagua se incrementa apreciablemente el contenido de su fracción no-electromagnética respecto a aquellas que no fueron sometidas al lavado de jagua. En el caso de la muestra (D1+D2), el incremento es de 10 veces y para la D3 es de 80 respecto a su homóloga en la muestra M2b.

TABLA 2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA POR FRACCIONES DE LA MUESTRA M1 (EN m-%)

Minerales	f1 ^{mag}	f1 ^{elmag}	f1 ^{no-mag}	Ligera
Magnetita	95	granos		
Martita	2			
Minerales electromagnéticos	3		1	
Cromita		40		
Piroxeno		30		
Epidota		15		
Ilmenita		5		
Hornblenda		3		
Anfibol: actinolita		5		
Óxidos de hierro		2		
Granate		granos		3
Esfena			61	
Circón			20	
Rutilo			15	
Apatito			1	
Corindón			granos	
Carbonatos				41
Fragmentos de rocas				39
Feldespatos				10
Serpentina				5
Minerales ligeros			2	2
Cuarzo				granos

Composición mineralógica

Las Tablas 2 y 3 muestran cómo varía la composición mineralógica de las diferentes fracciones en las muestras M1 y M2b determinadas por apreciación visual bajo microscopio.

Es interesante conocer cómo varía el contenido de cada mineral en cada fracción mineralógica al ser ponderados con las muestras M1 y M2b. Para realizar esta ponderación se emplean los datos de contenidos de las diferentes fracciones por muestras de la Tabla 1, y se conjugan con los contenidos minerales de las respectivas de las diferentes fracciones mineralógicas de las muestras M1 y M2b.

TABLA 3. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA POR FRACCIONES DE LA MUESTRA M2B (m-%)

Minerales	f1 ^{mag}	f1 ^{elmag}	f1 ^{no-mag}	Ligera
Magnetita	91			
Fragmentos de roca con magnetita	2			
Granos oxidados con magnetita	3			
Cromita		49		
Piroxeno	2	10		
Epidota	1	35		
Óxidos de hierro		granos		
Anfibol: hornblenda	granos	2		
Fragmento de rocas		2		
Ilmenita		1		
Anfibol: actinolita-tremolita		1		
Granate		granos		
Óxidos de hierro		granos		
Serpentina	1	granos		15
Rutilo			10	
Esfena		granos	72	
Zeosita y clinozeosita		granos		
Circón			15	
Minerales electromagnéticos			2	
Minerales de la fracción ligera			1	
Cuarzo				23
Carbonatos				28
Fragmentos de roca cloritizados				30
Fragmentos oxidados				2
Mica				granos
Apatito			granos	

Las fracciones magnéticas (f_1^{mag} y f_2^{mag}) representan el 42 y 46 % de la masa de M1 y M2b, respectivamente (ver Tabla 1), y están constituidas casi en su totalidad por magnetita, con un 95 % en M1 y un 91 % en M2b, lo cual expresa un contenido del 39,43 % y del 41,73 % de este mineral referido a la muestra M1 y M2b, respectivamente; estos últimos contenidos indican un potencial aproximado en hierro del 29 % para la muestra M1 y del 30 % para M2b.

Por otra parte, la cromita (FeCr_2O_4) representa uno de los constituyentes principales de las fracciones electromagnéticas (40 % de f_1^{elmag} y 49 % de f_2^{elmag}), pero relacionada a toda la masa de ambas muestras, esta fracción representa sólo el 21 % de M1 y el 22 % de M2b, y aporta potencialmente el 10,2 % del cromo y el 5,5 % del hierro en M1 y el 9,8 % del cromo y el 5,2 % del hierro en M2b. Otros minerales importantes, por su aporte másico, son los piroxenos (15,8 % de M1 y 4,4 % de M2b) y la epidota (7,9 % de M1 y 15,4 % de M2), los cuales aportan SiO_2 , CaO y MgO. La ilmenita (FeTiO_3) llega a constituir el 2,6 % y el 0,44 % de M1 y M2b, respectivamente, y representa potencialmente el 0,083 % del titanio y el 0,97 % del hierro en M1, mientras que en M2 estos porcentajes alcanzan los valores de 0,15 % para el primero y 0,17 % para el segundo.

El rutilo (TiO_2) y la esfena [$\text{CaTi}(\text{SiO}_4)\text{O}$] son los principales minerales portadores de titanio en las fracciones electromagnéticas y representan, respectivamente, un

TABLA 4. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA POR FRACCIONES DE LA MUESTRA (D1 + D2) EN (m-%)

Minerales	$f_{2(D1,2)}^{\text{mag}}$	$f_{2(D1,2)}^{\text{elmag}}$	$f_{2(D1,2)}^{\text{no-mag}}$
Magnetita	97	granos	
Granos martitizados	1		
Minerales electromagnéticos	1		
Fragmentos de roca	1		
Cromita		50	25
Piroxeno		15	14
Epidota		30	
Epidota + granos de roca epidotizados			49
Óxidos de hierro			1
Anfibol: actinolita-tremolita		3	
Granate		granos	
Circón			granos
Rutilo			1
Feldespatos			5
Leucóxeno			granos
Apatito		granos	

TABLA 5. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA POR FRACCIONES DE LA MUESTRA D3 EN(m-%)

Minerales	$f_{2(D3)}^{mag}$ (m-%)	$f_{2(D3)}^{elmag}$ (m-%)	$f_{2(D3)}^{no-mag}$ (m-%)
Magnetita	96	1	
Epidota	1	18	50
Feldespatos	3		20
Cuarzo	granos		5
Cromita		79	25
Granate		1	
Oxido de hierro		1	granos
Mica			granos
Anfibol: actinolita-tremolita			granos
Hidrobiotita			granos

contenido potencial de 0,075 y 0,31 % referido a la muestra M1, y de 0,003 y 0,19 % referido a M2. Ambos minerales aportan el 0,14 % del titanio en M1 y el 0,05 % del mismo en M2.

El circonio ($ZrSiO_4$) es otro constituyente importante de la fracción no electromagnética. Los contenidos de circonio que aporta este mineral son 0,05 y 0,04 % referidos a M1 y M2b, respectivamente.

TABLA 6. ANÁLISIS QUÍMICO DE LA MUESTRA INICIAL Mi Y DE LA FRACCIÓN MAGNÉTICA DE LAS MUESTRAS M1 Y (D1 +D2) EN (%)

Óxidos	Mi	M1	Muestra (D1+D2)	
	(m-%)	f_1^{mag} (m-%)	f_2^{mag} (m-%)	f_2^{elmag} (m-%)
SiO ₂	12,73	4,13	4,01	19,86
TiO ₂	4,41	6,03	5,62	3,41
Al ₂ O ₃	5,87	2,40	2,33	7,95
Fe ₂ O ₃	37,25	59,89	60,67	17,41
Cr ₂ O ₃	15,68	5,23	5,34	24,32
MnO	5,13	3,21	3,25	6,68
CaO	3,33	0,50	0,49	5,66
MgO	4,61	1,72	1,66	7,01
Na ₂ O	0,33	0,45	0,47	0,22
K ₂ O	0,06	0,05	0,07	0,05
P ₂ O ₅	0,09	0,08	0,09	0,10
SO ₃	0,20	0,23	0,18	0,22
PPI	1,28	0,98	1,03	1,49
Σ	90,97	84,90	85,21	94,38

Muestras de lavado de jagua de M2a

En las Tablas 4 y 5 aparecen las composiciones mineralógicas de las mezclas de las muestras D1 y D2 del lavado de jagua ($M_2^{D1,2}$) y de la muestra D3 (M_2^{D3}). Ambas muestras ($M_2^{D1,2}$ y M_2^{D3}) presentan una composición mineral parecida, aunque existen diferencias respecto a sus contenidos. En la muestra $M_2^{D1,2}$, la composición y el contenido de la fracción magnética ($f_{2(D1,2)}^{mag}$) son muy similares a la fracción $f_{2(D3)}^{mag}$ correspondiente de M_2^{D3} . En ambas fracciones magnéticas predomina, en apariencia, la magnetita que potencialmente debe aportar en M2a el 31 y 28 % del hierro respectivamente, que como promedio aporta la misma cantidad de hierro que la fracción f_1^{mag} de M1 (29 % de Fe).

Las fracciones electromagnéticas de ambas muestras ($M_2^{D1,2}$ y M_2^{D3}) aunque presentan similitud en la composición mineralógica, muestran diferencias apreciables en sus contenidos de cromita y epidota. A pesar de las diferencias del contenido de cromita en las fracciones $f_{2(D1,2)}^{elmag}$ y $f_{2(D3)}^{elmag}$, sus contribuciones máxicas ponderadas a la muestra M2a no se diferencian mucho entre sí y representan potencialmente el 25 % (11 % de Cr y 8 % de Fe) y el 29 % (13 % de Cr y 9 % de Fe), respectivamente (ver Tablas 4 y 5).

Las fracciones no electromagnéticas $f_{2(D1,2)}^{no-elmag}$ y $f_{2(D3)}^{no-elmag}$ son aún más discordantes acorde a sus aportes máxicos en la conformación de la muestra M2a, así como en la composición y contenido mineral (ver Tabla 5). El aspecto más destacable es los contenidos altos de cromita y feldespatos en $f_{2(D3)}^{no-elmag}$.

Los análisis químicos clásicos por vía húmeda de la muestra inicial Mi, de la fracción magnética de M1, y de las fracciones magnética y electromagnética de los lavados de jagua (D1+D2) y D3 de la muestra M2a se exponen en la Tabla 6. El análisis químico de las fracciones magnéticas presenta, en especial, un déficit aproximadamente de un 15 %. Este déficit no se corresponde con el contenido, que debe presentar el conjunto de óxidos de las fracciones magnéticas determinado por recálculo del análisis mineralógico. El contenido de alrededor de un 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 a un 65 % de Fe (> 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 relativos altos contenidos de TiO₂ y Cr₂O₃ en el análisis químico para las fracciones magnéticas y posible reservorio (depósito) de los elementos químicos: V, Ni, Mo, Nb, entre otros (ver Tabla 8).

Es conocido que el vanadio se encuentra, en muchas ocasiones, en niveles relativamente altos de concentración en menas de hierro titanífero como la titanomagnetita, sustituyendo al ion Fe^{3+} en forma de V^{4+} en correspondencia a los potenciales de REDOX de ambos elementos. También el vanadio puede estar oculto en minerales del titanio (ilmenita, esfena y rutilo), sustituyendo al ion Ti^{4+} .

TABLA 7. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ESCORIA

Óxidos	Contenido (m-%)
SiO ₂	20,82
Al ₂ O ₃	21,26
Cr ₂ O ₃	5,49
FeO	3,73
MnO	1,95
CaO	10,57
MgO	18,53
Na ₂ O	0,51
K ₂ O	0,15
SO ₂	0,26
P ₂ O ₅	0,30
CaF ₂	16,43
Σ	100,00

El molibdeno, sin embargo, se encuentra en pocas concentraciones en los minerales de hierro titaníferos. Por regla, los minerales de molibdeno se disuelven fácilmente durante la meteorización y forman ocre y óxidos hidratados, por ejemplo molibdenita (MoO) o ilsemanita (FeO.3MoO₃.8H₂O), que está muy difundida como producto de la oxidación de los minerales del molibdeno. Sin embargo, el nivel relativamente alto de iones Ca²⁺ de las aguas fluviales provoca la precipitación de la mayor parte del molibdeno como constituyente de las arenas analizadas.

El niobio puede encontrarse en concentraciones relativamente notables en rocas básicas (1,9-2 x10⁻² %), lo que se debe con toda evidencia a su alto contenido en titanio. A pesar de la semejanza de sus radios iónicos, el niobio no sustituye al Fe³⁺ en sus minerales en cantidades apreciables, sino que sustituye de preferencia al Ti⁴⁺. El niobio se encuentra con preferencia en minerales del titanio independientes, como es el caso de la esfena.

Proceso de obtención de escoria y ferroaleación

Proceso fusión-reducción: El comportamiento de la carga metalúrgica durante el proceso de fusión-reducción se efectuó satisfactoriamente, según los criterios tecnológicos antes expuestos, y se obtuvo un rendimiento promedio para cuatro coladas (1h 30 min) de 73,4 % para la ferroaleación y de 81 % para la escoria con respecto al teórico.

TABLA 8. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA FERROALEACIÓN OBTENIDA DE LAS ARENAS NEGRAS

Elementos	m-%	I	II	III
Fe	53,62	5,0	1	0,5262
Mn	10,47	0,09	10	1,047
Cr	6,82	0,02	25	1,705
Ti	3,60	0,60	160	5,76
Mo	2,87	3x10 ⁻⁴	170	4,879
Ni	2,14	0,008	17	0,3638
Nb	>1,80	0,001	800	14,40
V	>1,20	0,015	750	9,0
Cu	4,20	0,01	7,5	0,315
Sn	0,36	0,004	22	0,0792
Pb	0,36	0,0016	2,5	0,009
C	>5,40	0,10
Si	>4,56	27,5
Al	>2,40	8,6	6	0,144
Mg	>0,140	2,0	8	0,0112
P	0,0668	0,08
S	0,00327	0,09
Σ	100,01			38,2394

Nota: 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 = Contribución relativa de cada elemento metálico en el precio de la ferroaleación.

Vertido: Durante el vertido de la masa fundida sobre agua se provoca un choque térmico que suscita un efecto de granulación previa tanto para la escoria como para la ferroaleación, esta última sufre altas tensiones internas que la hacen frágil, lo que favorece su posterior trituración. Además, la escoria fundida al caer en el agua se solidifica bruscamente con un alto grado de vitrificación, y una textura muy porosa y en extremo frágil. Estas propiedades, entre otras, de ambos productos de la reducción, determinan el procedimiento de su separación. La separación de la escoria y de la ferroaleación se realiza según las etapas siguientes:

Secado: La escoria húmeda (40 % de agua) se orea hasta que alcance una humedad de 20 - 25 %. Posteriormente se concluye el secado en una estufa a 200 °C, y alcanza una humedad de 0,1 %.

Tamizado grueso: A consecuencia del proceso de granulación de la masa fundida en agua se produce una diferencia notable entre el tamaño y fragilidad de los granos de la escoria y los de la ferroaleación, lo que facilita que casi el 90 % de la ferroaleación sea separada mecánicamente por tamización (malla 5 mm).

Trituración y tamizado fino: La escoria tamizada por la malla de 5 mm se somete a un proceso leve y corto (5 min) de trituración en un molino de bolas de cerámica. A consecuencia de la notable diferencia de dureza y fragilidad, se provoca una gran diferencia de tamaño de grano entre la escoria y la ferroaleación. Con posterioridad, se pasa la masa molida por un tamiz de 1 mm de apertura, y se obtiene el 85 % (>1 mm) de la ferroaleación contenida en la escoria. Lo que significa que por último la escoria contiene posiblemente < 1,5 % de ferroaleación compleja residual.

Separación magnética: La recuperación del resto de la ferroaleación (1,5 %) contenida en la escoria se realiza mediante un proceso de segregación magnética, debido a que la ferroaleación presenta características ferromagnéticas; en cambio, la escoria es netamente diamagnética.

Con este procesamiento de los productos de la reducción obtenidos a partir de la carga metalúrgica diseñada, se obtiene 0,523 kg de ferroaleación y 0,406 kg de escoria de cada 1,0 kg de concentrado mineral. La capacidad del horno es de 1 kg de ferroaleación por hora.

Escoria

La escoria obtenida presenta una composición química que se encuentra registrada en la Tabla 7. Con el objetivo de valorar las características tecnológicas de la escoria durante el proceso de soldadura (SAW), ésta es pulverizada (<0,1 mm) y posteriormente aglomerada por peltización con vidrio líquido (30 % de la masa seca de escoria) y es secada a 300 °C durante 2 horas. El proceso de peltización arroja que más del 85 % de la masa granulada se encuentra en el rango granulométrico de 0,25 hasta 3,0 mm (Portal Depestre, 1994; Perdomo González, 1999). La masa granulada seca (0,25-3,0 mm) se somete a un proceso de soldadura automática por arco eléctrico con alambre de bajo contenido de carbono, la cual posee buena estabilidad del arco, emana poco humo, no hay presencia de llama y el cordón depositado presenta buen aspecto superficial. Esto indica que la escoria tiene buenas características tecnológicas para ser empleada como matriz de fundentes aglomerados. La matriz aludida presenta como promedio entre 75 y 85 % de la masa de estos fundentes.

Ferroaleación

El valor promedio del contenido químico de 17 elementos de la ferroaleación compleja obtenida se expone en la Tabla 8. A partir de la caracterización química de la aleación, no puede clasificarse ésta ni como acero ni tampoco como hierro fundido. Resulta interesante valorar en la ferroaleación obtenida el posible origen de los contenidos relativamente altos de los elementos metálicos Mo (2,87 %), Nb (>1,80 %) y V (1,20 %), que son caros y escasos en la naturaleza. El posible 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 (ver Tabla 8). En el caso de que esta ferroaleación sea triturada e insertada en consumibles para la soldadura, su precio se incrementará aun varias veces más.

Por recálculo químico a partir de los análisis químicos de la ferroaleación y de la fracción magnética, se llega a la convicción de que estos elementos (Mo, V, Nb y Ti) deben ocultarse en importantes proporciones en diferentes minerales de hierro, titanio y probablemente de cromo en la fracción magnética de las arenas negras.

Resulta interesante analizar la información que brinda el contenido químico elemental de la ferroaleación compleja obtenida a partir de la fracción magnética de la muestra (D1+D2) de las arenas negras, en la confección de cargas aleantes para el desarrollo de consumibles destinados a la soldadura por arco eléctrico: electrodos sintéticos para la SMAW y fundentes para la SAW. Las propiedades del metal depositado a partir de consumibles son definidas por las estructuras que se han formado durante su enfriamiento, es decir, depende de la cinética de las transformaciones a diferentes velocidades de enfriamiento y a los factores que influye en dicha cinética, entre los cuales se encuentra la composición química (Guliaev, 1990; Hiller, 1997).

En el proceso de soldadura por arco eléctrico manual y automático (SMAW y SAW), las temperaturas distribuidas por todo el baño de soldadura oscilan en un rango entre 1 500 y 5 000 °C. En este amplio diapason de temperaturas $DT \approx 3\,500\text{ °C}$, los elementos constituyentes de la aleación obtenida se dividen según sus funciones y relaciones con el hierro ($Fe \approx 53\%$) o entre sí en cinco grupos:

- Elementos aleantes: Cr (6,82 %), Ni (2,14 %), Mo (2,87 %), Nb (1,80 %), V (>1,20 %), Mn (10,47 %), Ti (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 %).

Por lo general, los elementos aleantes indicados se disuelven en las fases básicas de las aleaciones Fe-C (ferrita, austenita, cementita, entre otras), e influyen en la extensión del intervalo de las zonas A_3 y A_4 del diagrama de fases Fe-C, donde existen sus modificaciones alotrópicas (α y γ).

En las ferroaleaciones, los elementos Al, Si, Sn, Mo, V, Ti, Cr (según su porcentaje en la ferroaleación) son los que bajan la temperatura A_4 y elevan la A_3 , estrechando la región de existencia de la fase gamma (γ) y ampliando la región alfa, (α), mientras que los elementos Mn y Ni (el 21,61 % de la ferroaleación) elevan la temperatura A_4 y bajan a A_3 , es decir, amplían la región gamma (γ) y estrechan la región alfa (α).

La adición de cierta cantidad de elementos del primer grupo (alfágenos) estabiliza el estado α en las aleaciones base hierro, desde la temperatura ambiente hasta la de fusión de las aleaciones, que son denominadas, por tal efecto, como ferríticas (α); por otro lado, ciertos contenidos de Mn y Ni estabilizan el estado γ en las aleaciones

base hierro en igual diapasón de temperatura, y a éstas se les denomina austeníticas (Hiller, 1997).

En otro sentido, observemos que la suma de los contenidos de los elementos Mo, V, Ti, Cr, Ni, Nb y Mn representan el 28,90 % de la composición, y que junto con el Fe (53,62 %) y el carbono (C = 5,40 %) constituyen el 87,92 % de la ferroaleación obtenida. Valorando individualmente los efectos que provocan cada uno de los elementos, podemos formarnos un criterio evaluativo de dicha ferroaleación en el desarrollo de cargas aleantes para consumibles de soldadura por arco eléctrico.

El cromo aumenta la dureza y la resistencia a los depósitos de soldadura y disminuye significativamente la plasticidad. Cuando el contenido de Cr es > 13 %, el cordón de soldadura se convierte corro-resistente.

En el caso del níquel, éste le transfiere a los depósitos metálicos alta resistencia, plasticidad, y aumenta la resiliencia y mejora las características de soldabilidad.

Durante la soldadura por arco eléctrico, el manganeso presenta la propiedad de combinarse con el nitrógeno y el oxígeno, por lo que se aprovecha para reducir estos gases en el cordón de soldadura y disminuir, además, el contenido de óxido de hierro (FeO). Aproximadamente, el 1 % o mayor al 1 % de Mn aumenta la resistencia al desgaste sin perder plasticidad. También el Mn se emplea en soldaduras sometidas a grandes esfuerzos, como por ejemplo tubos y recipientes sometidos a altas presiones.

Valorando el silicio, si éste se encuentra en contenidos superiores al 1% eleva la resistencia de los cordones de soldadura sin disminuir la plasticidad. En general, el Si aumenta la plasticidad, la corro-resistencia y la permeabilidad magnética de los depósitos de soldadura.

El titanio es frecuentemente usado como ingrediente de las cargas aleantes de consumibles debido a que elimina al nitrógeno, y por ello confiere resistencia y tenacidad a los depósitos, haciéndolos capaces de soportar tensiones y choques súbitos. Además, el Ti afina las estructuras de los cordones de soldadura, los protege contra la corrosión intermetálica y aumenta su resistencia a temperaturas elevadas.

El molibdeno eleva la ductilidad y la estirabilidad en las uniones soldadas. El Mo les confiere a las uniones soldadas de acero de construcción una tenacidad 10 veces mayor que el Ni. En el caso de uniones soldadas en aceros especiales, les confiere mayor dureza y resistencia mecánica, a la vez que reduce la fragilidad y facilita los tratamientos térmicos.

El niobio les confiere a los depósitos y uniones soldadas propiedades anticorrosivas, refractarias y mejora su resistencia mecánica, especialmente a altas temperaturas. También eleva la estabilidad de las uniones soldadas en aceros especiales, destinados a la construcción de estructuras metálicas que hayan de sufrir grandes presiones. Cargas aleantes de Nb junto con el Ni y Co, sirven para confeccionar consumibles para reparar por soldadura piezas de turbinas para gases, de aviones y de equipos de alto vacío.

El vanadio en cargas aleantes para consumibles se emplea en calidad de desoxidante para el afino o para aumentar la resistencia a la tracción. El vanadio hace que los depósitos de soldadura sean menos quebradizos, los protege de la cristalización por efectos de golpes y vibraciones, aumenta la densidad, la resistencia al desgaste, y fatiga y afina el grano.

Cuando las uniones soldadas están constituidas por ferrita, el Mo, Mn y Si (cuando los dos últimos están presentes con más de 1 %) hacen disminuir la tenacidad de la ferrita, el Cr menos y el Ni nada. El níquel endurece con bastante intensidad la ferrita, pero no disminuye su tenacidad y hace que descienda su umbral de fragilidad en frío, mientras el resto de los elementos, si no disminuyen la tenacidad, endurecen débilmente la ferrita (el cromo) o la endurecen mucho, lo que que hace que descienda bruscamente su tenacidad (Mg > 1-1,5 % y Si > 0,5 %).

El contenido relativamente alto de carbono (5,40 %) que presenta la ferroaleación presupone la existencia de varios tipos de carburos, que pueden ser transferidos a los depósitos de soldadura. Los elementos de la aleación que son aptos para formar carburo en aleaciones base hierro son aquellos cuyo subnivel energético $d^n(n < 6)$ está menos lleno que el del hierro $^{26}\text{Fe}(3d^6)$ [14]. De acuerdo con lo dicho, forman carburos en los depósitos de soldadura, según el orden de prioridad, los elementos $^{22}\text{Ti}(3d^2)$, $^{41}\text{Nb}(4d^5)$, $^{23}\text{V}(3d^3)$, $^{42}\text{Mo}(4d^5)$, $^{24}\text{Cr}(3d^5)$, $^{25}\text{Mn}(3d^5)$.

Los carburos de los elementos que conforman la aleación obtenida, se pueden dividir en dos grupos: los del Grupo I: Fe_3C , Mn_3C , Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , Fe_3MoC , y los del Grupo II: Mo_2C , VC, TiC, NbC. Cuando en un cordón de soldadura concurren varios elementos correspondientes a uno de los dos grupos de carburos, no se forma un carburo puro sino la disolución de varios elementos en un mismo tipo de carburo, por ejemplo $(\text{Cr},\text{Mn},\text{Fe})_{23}\text{C}_6$ o $(\text{Ti},\text{Nb})\text{C}$. Los carburos correspondientes al Grupo I presentan estructuras complejas semejantes a la cementita Fe_3C . En el caso de los carburos del Grupo II presentan una estructura cuya red cristalina es simple (fases de inserción) y cristalizan, por lo general, con déficit considerable de carbono y son difícilmente solubles en austenita (Guliaev, 1990; Bersuker, 1996).

CONCLUSIONES

1. El estudio mineralógico y químico de las diferentes fracciones pesadas y ligeras, así como de las magnéticas y electromagnéticas de una muestra del placer de arenas negras Mejías, permitió desarrollar una formulación adecuada de carga metalúrgica, que permite obtener en un horno de arco eléctrico con crisol de grafito, de forma simultánea, una escoria confeccionada como matriz de fundentes de buenas características tecnológicas y metalúrgicas durante la soldadura automática bajo fundente (SAW) y una ferroaleación destinada a la formulación de cargas aleantes para el desarrollo de consumibles para la soldadura por arco eléctrico (SMAW y/o SAW) con amplio diapasón de aplicaciones en el campo del recargue y la soldadura propiamente dicho.

2. Mediante un proceso de reducción carbotérmica de la fracción magnética de la muestra seleccionada, se logró obtener de forma rentable una aleación compleja constituida por elementos metálicos alfaenos y gammagenos Cr (6,82 %), Ni (2,14 %), Mo (2,87 %), Nb (1,80 %), V (>1,20 %), Mn (10,47 %), Ti (3,60 %) y Si (4,56 %) de gran interés industrial y, en especial, de alto valor metalúrgico para el desarrollo de cargas aleantes de consumibles para soldadura por arco eléctrico, de gran demanda en el país.

BIBLIOGRAFÍA

- AMELINCKX, S. *et al.*: *Handbook of microscopy: application in materials science, solid state physic, and chemistry*, 368 pp., Ed. VCH, New York, 1997.
- BERSUKER, I. B.: *Electronic structure and properties of transition metals compounds: Introduction to theory*, 668 pp., Ed. Wiley, New York, 1996.
- DATSKO, J.: *Materials selection for design manufacturing theory and practice*, 376 pp., Ed. Marcel Dekker, New York, 1997.
- DÍAZ MARTÍNEZ, R.: "Acerca de la existencia de placeres laterales en el noroeste de Cuba oriental", *Minería y Geología*, 12 (3) :41-47, 1995.
- : "Caracterización geológica del placer Mejías mediante el estudio fotogeológico y la interpretación

de anomalías magnéticas", *Minería y Geología* 14 (1):13-17, 1997.

- DRICEU, D.: "Obtención de concentrados a partir de arenas negras y su uso posible en soldadura", Tesis de Diploma, Facultad de Química y Farmacia, UCLV, Santa Clara, Cuba, 1998.
- GÓMEZ PÉREZ, C. R.: "Obtención de fundente fundido para la SAW a partir de rocas cubanas", Tesis doctoral, Centro de Investigaciones de Soldadura, UCLV, Santa Clara, 1995.
- GULIAEV, A. P.: *Metalografía*, t. II., 334 pp., Ed. MIR, Moscú. 1990.
- HILLER, M.: *Phase equilibrium, phase diagrams, and phase transformations: their thermodynamic basis*, 538 pp., Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- PERDOMO GONZÁLEZ, L.: "Estudio del proceso metalúrgico reductivo de cromitas para obtener componentes destinados a la elaboración de fundentes empleados en la SAW", Tesis de Maestría, Centro de Investigaciones de Soldadura, UCLV, Santa Clara, Cuba, 1997.
- : "Obtención de un fundente aglomerado aleado para el recargue a partir de los productos de la reducción de cromitas refractarias cubanas", Tesis doctoral, Centro de Investigaciones de Soldadura, UCLV, Santa Clara, Cuba, 1999.
- PORTAL DEPESTRE, G.: "Desarrollo de fundentes no-fundidos para el relleno de rodillos de bulldozer y piezas que trabajan en condiciones similares", Tesis doctoral, Centro de Investigaciones de Soldadura, UCLV, Santa Clara, 1994.
- RODRÍGUEZ PÉREZ, M.: "Electrodos tubulares revestidos para el relleno superficial de centralizadores y piezas que trabajan en condiciones similares", Tesis doctoral, Centro de Investigaciones de Soldadura, UCLV, Santa Clara, 1992.