

Evaluación del proceso de reducción aluminotérmica de un concentrado cromífero del yacimiento Merceditas

Jesús Eduardo González Ruiz, Rafael Quintana Puchol,* Abel Arniella Orama,* Alejandro Rodríguez Cristo** y Adrián Alujas Díaz.*

Departamento de Investigación y Desarrollo. Dirección de Química, Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Avenida 25 y Calle 158, Apartado Postal 6414, Ciudad de La Habana. Correo electrónico: jesus.gonzalez@cnic.edu.cu. *Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, **Centro de Investigación y Desarrollo de la Fundación. Planta Mecánica, Cuba.

Recibido: 10 de marzo de 2007. Aceptado: 9 de enero de 2008.

Palabras clave: cromita, reducción, aluminotermia, mineral de cromo, caracterización de fases.
Key words: chromite, reduction, aluminothermic, phase characterization, chromizing.

RESUMEN. El cromo se encuentra en los depósitos minerales en forma de óxidos complejos, comúnmente conocidos como cromoespinelas. Dichos óxidos poseen elevada estabilidad química, aspecto que afecta su reactividad en presencia de haluros, lo que incide negativamente sobre su posible uso como materia prima portadora de cromo en tratamientos difusivos. En este trabajo se estudió la reducción aluminotérmica de un concentrado cromífero perteneciente al yacimiento Merceditas y se caracterizaron sus productos, con el objetivo de utilizarlo como materia prima en procesos de cromado difusivo. El análisis granulométrico se realizó a partir de dos muestras preparadas mediante la trituración del concentrado en un molino de bolas y su posterior tamizado en dos juegos de tamices, con aberturas máximas de 100 y 200 μm . Se caracterizaron los productos de la reducción de la mezcla del concentrado mediante difracción de RX y espectroscopia infrarroja. Ello permitió corroborar que al emplear la variante de tratamiento D (55 mm; 4 h; 950 $^{\circ}\text{C}$), desaparece el aluminio metálico y la cromopicotita deja de poseer los picos de reflexión de máxima intensidad relativa, los que son ocupados por el cromo y por el ferrocromo. Estos resultados permiten prever que el compuesto resultante podría ser utilizable como materia prima portadora de cromo en tratamientos difusivos.

ABSTRACT. In many ore deposits chromium is present as complex oxides known as chromospineless which show high chemical stability especially towards halides, affecting negatively its possible use as a chromium source in diffusive treatments. In this work, the aluminothermy reduction of one chromite concentrate from Merceditas deposit was studied and their products were characterized, with the objective of using it as raw material in chromizing. In order to make the grain size analysis, two samples were prepared. First the concentrate was crushed in a ball mill and later was screened in two sieve sets, with maximum openings of 100 and 200 μm . The mixture of the reduction products of the concentrate was characterized, using RX diffractometry and infrared spectroscopy. It was corroborated that when using treatment D (55 mm; 4 h; 950 $^{\circ}\text{C}$), the metallic aluminum peaks disappears; the relative intensity of chromopicotite diminished and the higher relative intensity of reflection peaks were occupied by chromium and ferrochromium. These results allow to anticipate that the resulting compound is suitable as chromium source in diffusive treatments.

INTRODUCCIÓN

El uso del método de mezcla de polvos para la aplicación de procesos de cromado difusivo se encuentra limitado, entre otros factores, por el elevado costo de las materias primas y en algunos casos, por dificultades tecnológicas vinculadas al procesamiento de las fuentes portadoras de cromo.^{1,2} Generalmente, las mezclas para cromar por difusión se encuentran constituidas por la fuente portadora de cromo (óxido en el caso de la variante metalotérmica), el aditivo inerte (frecuentemente alúmina) y un activador (haluro, el más utilizado es el cloruro de amonio).¹⁻³

En Cuba, existen numerosos yacimientos de cromitas refractarias y metalúrgicas.⁴⁻¹⁰ Dentro de los

depósitos cubanos de cromo se destaca Merceditas por encontrarse en explotación y porque según se conoce, posee considerables reservas estimadas,^{1,11} aspectos que justifican su selección para realizar el presente trabajo investigativo.

En las cromitas, el cromo aparece dentro de óxidos mixtos conocidos como cromoespinelas,^{1,11,12} en los que dicho elemento puede encontrarse combinado, además de con oxígeno, con hierro, aluminio y magnesio.^{1,11-13} También dentro del concentrado cromífero, aparece el silicio formando parte de alumosilicatos.^{1,11,14}

La utilización de concentrados cromíferos como materia prima en la aplicación de recubrimientos difusivos puede poseer un carácter trifuncional, al actuar

como fuente portadora del elemento saturante principal (cromo) del aditivo inerte (óxido de aluminio + óxido de magnesio + óxido de calcio) y del silicio (elemento que contribuye a mejorar la resistencia al desgaste de las superficies recubiertas).¹

No obstante, la presencia en los concentrados cromíferos de cromo y silicio en forma combinada,^{1,11,14} afecta su reactividad y con ello, su potencial uso como materia prima en tratamientos difusivos, al inhibir su capacidad de reaccionar químicamente con el activador (haluro), cuestión que influye negativamente en la capacidad de ambos elementos para trasladarse desde la mezcla saturante hasta las superficies a recubrir. Es por ello que la aplicación de un proceso de reducción al mineral estudiado es un paso imprescindible para posibilitar su empleo como fuente portadora de cromo en mezclas saturantes.

Existen diversas variantes para realizar la reducción de los minerales de cromo.^{1,15-21} Los reductores más utilizados en los procesos en estado sólido son el carbono, el silicio y el aluminio.^{1,15-21}

El uso de los concentrados cromíferos para la aplicación de recubrimientos de cromo por difusión permite disminuir los costos totales del proceso de tratamiento en más de 10 veces, comportamiento vinculado al hecho de que el precio del concentrado es alrededor de 50 veces inferior al del ferrocromo.¹

El objetivo central del trabajo consistió en estudiar el proceso de reducción aluminotérmica de un concentrado cromífero del yacimiento Merceditas, a partir de la determinación de las fases presentes en sus productos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Equipos y procesos

El proceso de trituración del concentrado se ejecutó en un molino Labor, Hungría, provisto de un recipiente de 600 mm de Ø y 560 mm de largo, a 40 r/min y cargado con 57 bolas (20 de Ø = 80 mm, 7 de Ø = 72 mm y 30 de Ø = 28 mm).

La calcinación del concentrado y los experimentos destinados a estudiar su proceso de reducción, se realizaron en un horno de cámara de fabricación rusa, del tipo CHO-3.6.2/10M1, con potencia de calentamiento de 14 kW, 440 V, temperatura de trabajo 1 000 °C y sistema de regulación térmico automático con precisión en las mediciones de la temperatura de ± 5 °C.

El concentrado fue tamizado en un vibrador modelo 029-T4 de fabricación rusa. Para ello, se emplearon dos combinaciones de tamices (GOST): 200, 160, 100, 63, 50 µm y de 100, 63 y 50 µm. Se utilizaron dos juegos de tamices con el objetivo de obtener dos diámetros medios de partícula y con ello, posibilitar la evaluación de la influencia de este factor sobre el grado de reducción del concentrado estudiado.

En las caracterizaciones realizadas por difracción de RX, se utilizó un equipo Phillips PW 1218, con radiación CuK_α 1 (λ = 1,540 6 Å) filtrada con Ni, a 30 mA, 40 kV y un intervalo angular (2θ) entre 4 y 60° (método de focalización según Bragg-Brentano). Mientras que para la identificación de las fases presentes en el concentrado y en los productos de su reducción, se utilizó la base de datos PCPDFWIN; V. 1.30, JCPDS-ICDD/2002.²²

En los análisis por espectroscopia infrarroja (IR) se utilizó un equipo modelo Equinox, Broker, según la técnica de discos de bromuro de potasio. El intervalo de frecuencias empleado comprendió desde 400 a 4 000 cm⁻¹.

Materiales

Se utilizó un concentrado cromífero perteneciente al yacimiento Merceditas, cuya composición química fue reportada previamente,¹⁴ en la que se destaca la presencia de "óxidos" de cromo, hierro, silicio, magnesio, aluminio y calcio (Tabla 1).

Tabla 1. Composición química del concentrado, reportado como óxido de los elementos presentes¹, según reporte de trabajo previo.¹⁵

Oxido ¹	Intervalo	Contenido medio (%)
Cr ₂ O ₃	32,70 - 33,50	32,80
Al ₂ O ₃	31,25 - 32,25	31,75
FeO	14,34 - 15,19	14,50
MgO	14,03 - 18,01	16,01
CaO	0,90 - 0,96	0,93
H ₂ O	1,10 - 1,80	1,10
SiO ₂	3,34 - 5,46	3,40
Σ	—	100,49

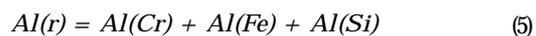
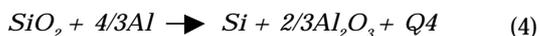
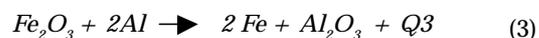
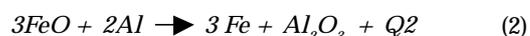
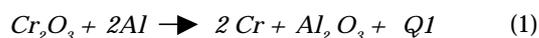
¹ Los elementos cromo, aluminio, silicio y magnesio se encuentran en forma de óxidos complejos (cromopicitita, antigorita y clorita).

La composición física del concentrado cromífero fue reportada en trabajos anteriores.^{1,4,11,14} Dentro de sus constituyentes aparecen las fases conocidas como cromopicitita (fase principal), antigorita y clorita (alumosilicatos).^{1,11}

Para realizar el proceso de reducción se utilizó polvo de aluminio destinado al uso industrial, con un 95 % de pureza.

Determinación del contenido de aluminio a emplear en los experimentos

Para determinar el contenido de aluminio a emplear en el proceso de reducción de los "óxidos" reducibles del concentrado de cromo (cromo, hierro y silicio) se consideraron las ecuaciones que caracterizan las reacciones químicas entre estos y el aluminio (1 a 4), mientras que el contenido total de aluminio que permite establecer una relación estequiométrica con dichos "óxidos" se calculó mediante la ecuación 5.



donde:

Al(r) contenido total de aluminio necesario para la reducción de los "óxidos".

Al(Cr), Al(Fe) y Al(Si) contenidos de aluminio necesarios para la reducción de los "óxidos" "Cr₂O₃", "Fe₂O₃" y "SiO₂".

Experimentos de reducción

Para estudiar el proceso de reducción, se utilizó una mezcla compuesta por 85 % del concentrado en peso (dimensión media de partículas = 55 µm) y 15 % de polvo de aluminio. El contenido de aluminio empleado en los experimentos representó el 95 % del necesario para rea-

lizar la reducción de todos los compuestos de cromo, hierro y silicio presentes en el concentrado. Se utilizó esta proporción con el objetivo de hacer mínima la posibilidad de que en los productos de la reducción quedara aluminio en estado elemental, para de esta forma evitar que se incorporara a los recubrimientos difusivos y disminuyera la microdureza y resistencia al desgaste abrasivo en las zonas ocupadas por carburos.

En los experimentos, se evaluó el efecto de las variables: dimensión media de las partículas del concentrado, temperatura y tiempo de reducción, empleando para ello cuatro variantes denominadas como: A (89 mm; 800 °C; 4 h), B (55 mm; 800 °C; 2 h), C (89 mm; 950 °C; 2 h), D (55 mm; 950 °C; 4 h). El proceso de reducción se desarrolló en un contenedor que permitía aislar la mezcla del espacio exterior mediante un cierre compuesto por silicato de sodio y arcilla refractaria.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Proceso de trituración del concentrado

En las distribuciones granulométricas del concentrado, resultantes de los dos procesos de trituración empleados y de su posterior tamizado, se destacaron valores de oblicuidad (S_k) de 0,91 y de 0,65 y la dispersión en las dimensiones de los granos ($S_o = 1,78$ y $1,73 < 2,5$) (Fig. 1, Tabla 2). Además, para ambas distribuciones granulométricas la oblicuidad y la dispersión presentaron magnitudes similares, aspecto que indica que el diámetro medio de los granos ($D_{med.}$) resulta su parámetro más representativo. Los valores del diámetro medio resultaron de 55 y 89 mm, respectivamente (Fig. 1, Tabla 2). La diferencia existente entre ambos posibilitó un incremento de la superficie de reacción del primero, en comparación con el segundo, de aproximadamente 1,5 veces.

Tabla 2. Principales parámetros estadísticos de la distribución granulométrica del concentrado después de triturado y de tamizado.

Abertura máxima del tamiz (μm)	Parámetros estadísticos			
	S_o	S_k (μm)	$D_{med.}$	M_d^1
200	1,78	0,91	89	75
100	1,73	0,65	55	50

¹ M_d Mediana.

Caracterización de los productos de la reducción

Difractometría de RX

En las cuatro variantes estudiadas, se apreciaron cambios sensibles en la intensidad relativa de los picos de reflexión que identifican a la cromopicotita (con distancias interplanares de 4,75; 2,91; 2,48 y 2,06 Å), en comparación con los presentados por el concentrado (Fig. 2). Mientras que los picos que identifican a la antigorita y a la clorita en el difractograma del concentrado (con distancias interplanares de 3,55 y 3,64 Å), desaparecieron en todas las corridas experimentales (Fig. 2).

En el difractograma correspondiente a la variante de tratamiento denominada como A, se apreció la presencia de aluminio en estado elemental en el pico con mayor intensidad relativa (distancia interplanar de 2,33 Å), la aparición de cromopicotita en el segundo pico de mayor intensidad relativa (distancia interplanar de 2,48 Å), la desaparición de la cromopicotita en el pico con dis-

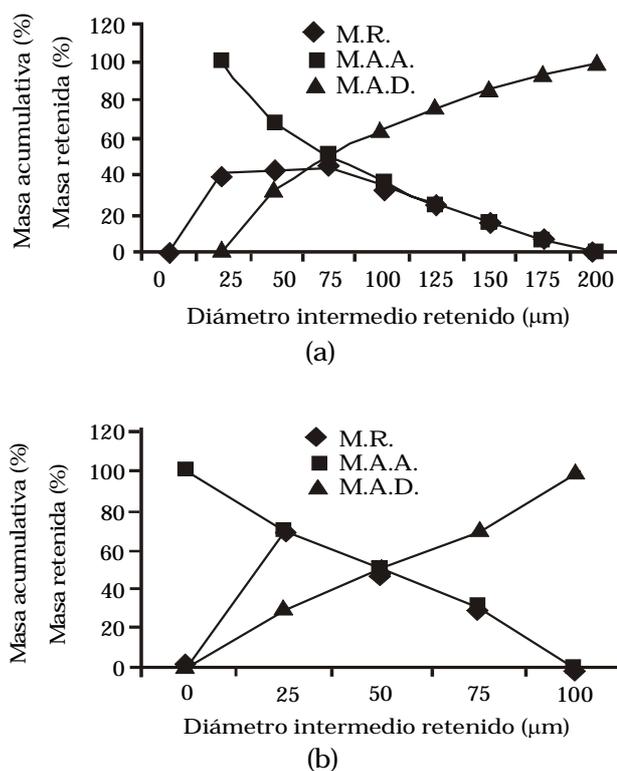


Fig. 1. Curvas de frecuencia y de sumatoria del concentrado después de triturado. a) Para un tamiz de 200 μm . b) Para un tamiz de 100 μm , donde: M.R. masa retenida para cada clase granulométrica. M.A.A. masa acumulada ascendente para cada clase granulométrica. M.A.D. masa acumulada descendente para cada clase granulométrica.

tancia interplanar de 2,06 Å y el surgimiento de productos del proceso de reducción en las zonas $2\theta = 25$ y 44° (Fig. 2). En las demás variantes estudiadas se observó la desaparición del pico que identifica al aluminio (con la excepción de la variante C), la aparición de productos del proceso de reducción en las zonas antes referidas y la disminución de la intensidad relativa de los picos de la cromopicotita (comportamiento que se acentúa en la variante D) (Fig. 2).

El estudio de los difractogramas de los cuatro productos de la reducción aluminotérmica del concentrado estudiado (Fig. 2), reveló la existencia de la espinela sintética ($\text{Mg}_{0,37}\text{Al}_2\text{O}_4$) en los picos de reflexión con distancias interplanares de 4,67; 2,83 y 2,41 Å, fase resultante de la reducción de la cromopicotita y que surge debido a sustituciones isomórficas en la estructura de la alúmina (Al_2O_3). En los picos correspondientes a las distancias interplanares de 2,55; 2,37 y 2,086 Å, se reveló la presencia de alúmina (Al_2O_3), que es otro compuesto derivado del proceso de reducción de la cromoespinela y de los alumosilicatos.

En los picos de mayor intensidad relativa de las variantes de tratamiento B, C y D, comprendidos en las zonas angulares de 42 a 47° , se destacó la presencia de cromo metálico o ferrocromo. En el pico correspondiente a la distancia interplanar de 2,038 7 Å (100 % de intensidad relativa en la variante D) apareció cromo, ferrocromo o ambos, mientras que en la distancia interplanar de 2,025 7 Å se reveló la presencia de ferrocromo y el pico existente en 2,057 2 Å indicó la presencia de cromo, hierro o ambos. Además, en los difractogramas correspondientes a las variantes de tratamiento B y D apareció ferrosilicio (Fe_2Si) en la distancia interplanar de 1,99 Å.

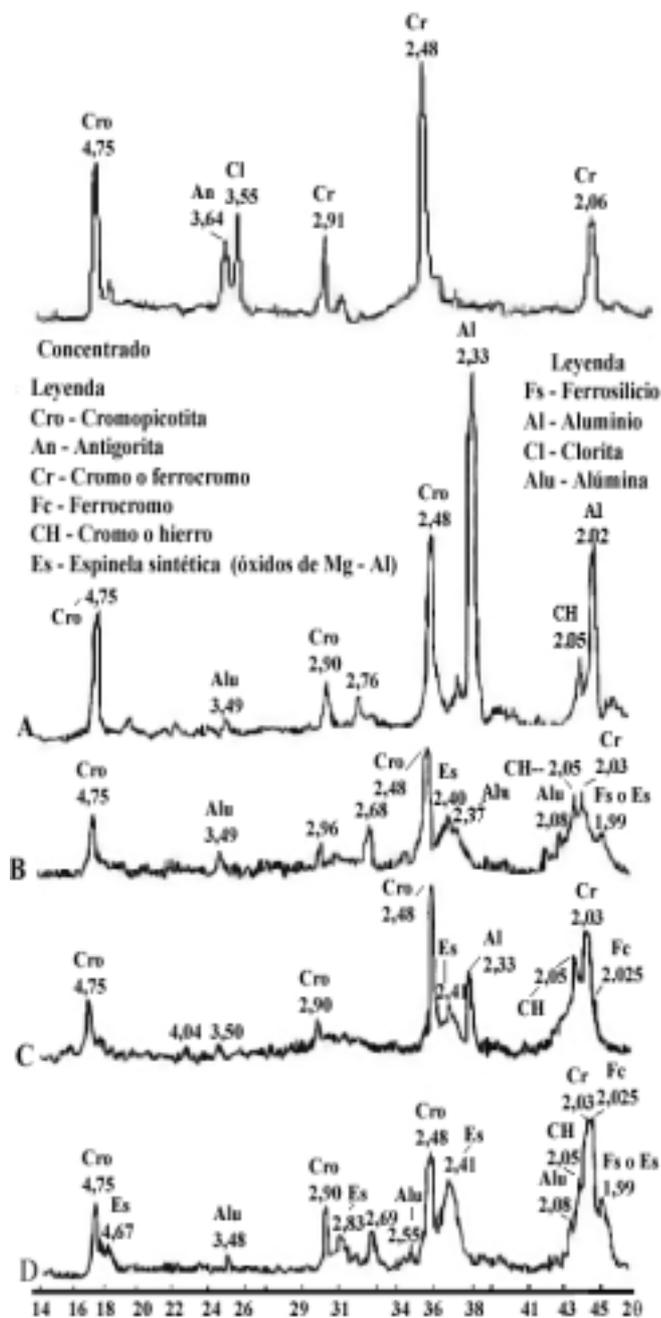


Fig. 2. Difractogramas de RX del concentrado, según trabajo previamente publicado,^{1,14} y de los productos de la reducción de una mezcla compuesta por cromita (85 %) + aluminio (15 %), (A, B, C, D). Variante de reducción A) 800

También fue posible que se encontrara solapada la espinela sintética ($Mg_{0.37}Al_2O_4$) en el intervalo angular de 42 a 47° (distancias interplanares de 2,020 1 y 1,994 5 Å).

Espectroscopia Infrarroja

El estudio del espectro de infrarrojo de los productos de la reducción aluminotérmica del concentrado permitió apreciar una disminución casi total de las vibraciones que pertenecen al OH estructural (banda de 3 686 cm^{-1} en el espectro del concentrado) y de las representativas del H_2O estructural (a 3 566 cm^{-1}). Asimismo, se pudo apreciar la correspondiente al H_2O de adsorción (señal de 3 442 cm^{-1}) (Fig. 3).

También, se observó un cambio en la intensidad y en la posición que ocupan las bandas que identifican a los silicatos (región de los 1 100 a 1 200 cm^{-1}) y un co-

rrimiento de las bandas asignadas a la cromopicotita ($\nu_1 = 651 \text{ cm}^{-1}$ y $\nu_2 = 514 \text{ cm}^{-1}$) (Fig. 3).

En la región de 807 a 830 cm^{-1} apareció una nueva señal, que se correspondió con una vibración del tipo Al-O, la cual se encuentra vinculada con la formación de alúmina (Fig. 3).

Análisis de los resultados experimentales

La acción reductora del aluminio sobre los alumosilicatos y la cromopicotita quedó evidenciada en los difractogramas de los productos de la reducción del concentrado y fue corroborada por los resultados de los análisis por espectroscopia infrarroja (Figuras 2 y 3).

La aplicación del proceso de reducción aluminotérmica al concentrado repercute en cambios de la coloración presentada por la mezcla y en incrementos de las dimensiones de las partículas. La variación dimensional de las partículas se encuentra relacionada con las reacciones exotérmicas entre el polvo de aluminio y óxidos del concentrado. Dichas reacciones originan un significativo aumento de la temperatura en el interior del contenedor, que facilita la sinterización de la mezcla.

Al evaluar el efecto de las variables *dimensión media de las partículas del concentrado*, *tiempo* y *temperatura de reducción*, resultó apreciable que existían diferencias significativas en la influencia, que individualmente ejercían sobre el nivel de reducción de la mezcla estudiada.

Los mayores efectos de la acción reductora del aluminio se correspondieron con los resultados correspondientes a las variantes B y D (800 °C; 2 h; 55 μm y de 950 °C; 4 h; 55 μm , respectivamente), lo cual fue avalado

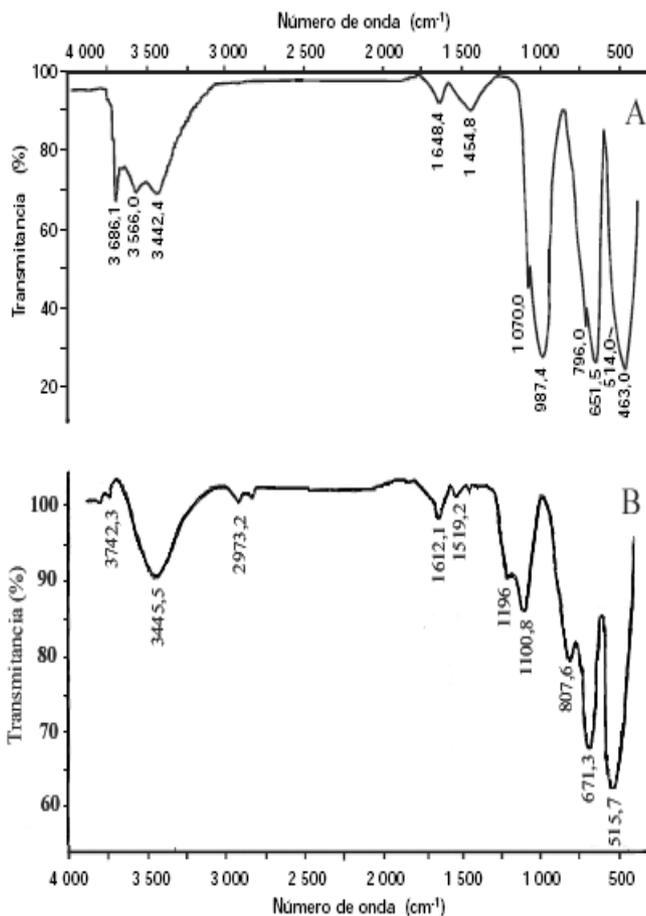


Fig. 3. Espectros IR. A) del concentrado, según trabajo previo.¹⁴ B) del producto de la reducción de la variante D.

por la desaparición del aluminio en estado elemental, la apreciable disminución del pico máximo característico de la cromopicotita, de forma paralela al paso gradual del cromo, ferrocromo o ambos a principales fases de la mezcla (distancias interplanares de 2,057 2, 2,038 7 y 2,025 7; Fig. 2). Otro elemento que reforzó este criterio, fue el ensanchamiento de picos de forma conjunta con el incremento de las intensidades relativas de las fases resultantes del proceso de reducción, lo cual denota una disminución de la cristalinidad y un incremento de la reactividad de las fases presentes en dichos intervalos angulares.

Las variantes B y D poseen en común la dimensión media de las partículas del concentrado (55 μm), aspecto que permite relacionar dicha variable con el nivel de reducción del concentrado. La influencia de esta variable se encuentra vinculada al incremento de la superficie de reacción en 1,5 veces y a la disminución del recorrido difusivo del reductor en las partículas del concentrado.

El efecto combinado de valores máximos de temperatura y tiempo de reducción con un valor mínimo de la dimensión media de las partículas del concentrado, redundando en una mayor intensidad del proceso de reducción. Ello quedó evidenciado al valorar el difratograma correspondiente al régimen D [(950 °C; 4 h; 55 μm), en el que la cromopicotita deja de constituir la fase que posee mayor intensidad relativa en sus picos (75 % en la línea de difracción con distancias interplanares 2,483 Å y 45 % en los picos de reflexión de 4,755 Å, (Tabla 3)]. Paralelamente cede su lugar al cromo o a sus combinaciones con el hierro, los que alcanzan las mayores intensidades relativas en la distancia interplanar de 2,038 Å (100 %) y en el pico de reflexión de 2,025 7 Å (97 %, Tabla 3).

El uso de la variante D incidió en una mayor reducción del concentrado estudiado, comportamiento avalado por la disminución de la intensidad del pico fundamental de la cromopicotita en los intervalos comprendidos entre 1,14 y 1,54 veces y por el incremento de la intensidad relativa en los principales picos que caracterizan al cromo o al ferrocromo, en valores entre 1,26 y 1,49 veces en comparación con las demás variantes de reducción estudiadas (Tabla 3). Este comportamiento se encuentra relacionado con el empleo de las temperaturas y tiempos máximos dentro la región experimental investigada (950 °C y 4 h) y valores mínimos en las dimensiones de las partículas. El aumento de la temperatura favorece un incremento de la velocidad de las reacciones químicas en la mezcla, mientras que su combinación con un incremento del tiempo de exposición posibilita que el aluminio difunda hasta la zona central de las partículas

del concentrado y realice su acción reductora. También la disminución del tamaño de las partículas incide en el incremento de su área específica y en una reducción de la distancia a recorrer por el aluminio para acceder a su zona central.

La presencia de cromo metálico o de ferrocromo en los productos de la reducción posibilita incrementar marcadamente la reactividad del concentrado en presencia de haluros y con ello viabiliza su utilización como fuente portadora de cromo en la aplicación de tratamientos difusivos. Además, al no poseer carbono el mineral, el cromo no se encuentra combinado con dicho elemento (la presencia de carbono en las mezclas puede afectar la reactividad del cromo con los haluros e influir negativamente sobre la capacidad presentada por las mezclas saturantes para recubrir superficies metálicas). Otro elemento a considerar es la presencia de ferrosilicio en los productos de la reducción (variantes B y D), debido a que puede intensificar el proceso de cromado difusivo y mejorar las propiedades de las capas cromadas.

CONCLUSIONES

La acción reductora del aluminio sobre la cromopicotita y los alumosilicatos, quedó demostrada por los resultados de los ensayos de difracción de RX y de espectroscopia infrarroja (IR). Dentro de las variantes de reducción estudiadas, las denominadas como B y D presentan un mayor efecto reductor, caracterizado en los difratogramas de RX por una disminución de la intensidad relativa de los picos que identifican a la cromopicotita, por la desaparición de los picos correspondientes al aluminio y por la presencia de cromo, ferrocromo o ambos en los picos de reflexión de mayor intensidad relativa. Los resultados alcanzados empleando la variante reducción D, permiten recomendar la realización de estudios sobre la capacidad de sus productos resultantes de aportar cromo en tratamientos termodifusivos.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Jesús A. Núñez Romay por su destacada labor en la revisión de los textos en idioma inglés y al doctor Alberto Iglesias Cerveto por sus valiosas sugerencias.

BIBLIOGRAFÍA

- González Ruiz J.E. Obtención de recubrimientos difusivos de carburos complejos de cromo en aleaciones hierro-carbono a partir de cromita refractaria. Tesis en opción al grado científico de doctor en Ciencias Técnicas, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, octubre, 2001.

Tabla 3. Intensidades relativas de las principales fases de las mezclas estudiadas después del proceso de reducción.

2q	d_{hki} [Å]	Fase	I/I_{max}			
			A	B	C	D
18,6	4,75	Cromopicotita	35	40	26	45
30,5	2,90	Cromopicotita	5	-	10	30
31,0	2,83	Espinela sintética ($\text{Mg}_{0,36}\text{Al}_{2,4}\text{O}_4$)	-	-	-	15
35,1	2,55	Alúmina (Al_2O_3)	-	-	-	15
36,1	2,48	Cromopicotita	49	100	100	75
36,3	2,41	Espinela sintética ($\text{Mg}_{0,36}\text{Al}_{2,4}\text{O}_4$)	-	40	21	50
37,5	2,33	Aluminio	100	-	42	-
43,3	2,08	Alúmina (Al_2O_3)	-	27	-	25
44,0	2,05	Cromo, hierro o ambos	14	53	53	50
44,4	2,03	Cromo, ferrocromo o ambos	-	67	79	100
44,7	2,02	Ferrocromo	-	-	77	97
45,3	1,99	Ferrosilicio (Fe_2Si) o espinela sintética	-	30	-	40

2. Lyakhovich L.S. Manual del tratamiento termoquímico de los metales y aleaciones. Editorial Mir, Moscú, 1981.
3. Lajtin Yu. M y Arzamazov B. Tratamiento químico térmico de los metales. **Editorial Mir**, Moscú, 226-228, 1987.
4. Alujas A., Quintana R., González J.E. y Yee H. Concentrado cromífero del yacimiento Merceditas, una fuente alternativa para recubrimientos cromo-difusivos en aceros. **Latin Am. Met. Mat.**, **23**, 62, 2003.
5. Muños J.N. Características geoquímicas de la mineralización cromífera del yacimiento Cayo Guam Moa, Holguín, Cuba (primera parte). **Revista Minería y Geología**, **15**, 27, 1998.
6. Proenza J.A., Melgarejo J.C., Gervilla F., Lavaut W., Revé D. y Rodríguez G. Cromitas podiformes en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba). **Acta Geológica Hispánica**, **33**, 155-177, 1998.
7. Martínez A. y Ibarra J.L. Estimación de reservas en un yacimiento de cromita con poca continuidad geológica de los cuerpos de cromitas. **Revista Minería y Geología**, **20**, 1-13, 2004.
8. Ostroumov M., Rojas P.L. y Sánchez D. C. Características de la composición química de las cromoespinelas cubanas por el análisis de rayos X. **Revista Minería y Geología**, **1**, 31-43, 1985.
9. Proenza J.A., Gervilla F., Melgarejo J.C., Vera O., Alfonso P. and Fallick A. Genesis of sulfide-rich chromite ores by the interaction between chromitite and pegmatitic olivine-norite dikes in the Potosi Mine (Moa-Baracoa ophiolitic massif, eastern Cuba). **Mineralium Deposita**, **36**, 658, 2001.
10. Proenza J.A. Mineralización de cromita en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa (Cuba). Ejemplo del yacimiento Merceditas. Tesis en opción al grado científico de doctor en Ciencias Geológicas, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona, Barcelona, 1997.
11. Perdomo L. Obtención de fundentes aglomerado para el recargue a partir de los productos de la reducción de cromita refractaria cubana. Tesis en opción al grado científico de doctor en Ciencias Técnicas. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, 2000.
12. Wikipedia. Cromita. <http://es.wikipedia.org/wiki/Cromita>. 2007. (Consultado: 30 de enero de 2007.)
13. De Melo M. Cromo. <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/cromo.pdf>. 2001. (Consultado: 21 de diciembre de 2006.)
14. González Ruiz J.E. Quintana R., Arniella A., Alujas A. y Perdomo L. Caracterización químico-estructural de un concentrado cromífero procedente del yacimiento Merceditas y valoración de sus potencialidades como materia prima en tratamientos difusivos. **Revista CENIC Ciencias Químicas**, **38**, 325, 2007.
15. Alujas A., Quintana R., Arniella A., Díaz C. y Reguera E. Productos de la reducción carbotérmica de cromita refractaria a baja temperatura, una fuente alternativa en el tratamiento cromodifusivo de aceros. **Rev. Latin. Am. Met. Mat.**, **23**, 3, 2003
16. Ding Y.L. and Warner N.A. Catalytic reduction of carbon-chromite composite pellets by lime. **Thermochimica Acta**, **292**, 85, 1997.
17. Ding Y.L. and Warner N.A. Reduction of carbon-chromite composite pellets with silica flux. **Ironmaking & steelmaking**, **24**, 283, 1997.
18. Weber P. and Hurman E. The reduction of chromite in the presence of silica flux. **Minerals Engineering**, **19**, 318, 2006.
19. National Materials Advisory Board. High-Purity Chromium Metal: Supply Issues for Gas-Turbine Superalloys Alternative Technologies for Chromium-Metal Production. http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=9248&page=39, 2007. (Consultado: 10 de diciembre de 2007.)
20. Shibata E., Egawa S. and Nakamura T. Reduction Behavior of Chromium Oxide in Molten Slag Using Aluminum, Ferrosilicon and Graphite. **The iron and Steel institute of Japan**, **42**, 609, 2002.
21. Behera R.C. and Mohanty U.K. Effect of Oxide Fluxes on the Viscosity of Molten Aluminothermic Ferro-chrome Slags., **ISIJ International** **41**, 827, 2001.