

Obtención de metalizados de hierro a partir de los residuos sólidos de la industria del níquel en Nicaro, Cuba

Yosvany Ferreiro Guerrero
Alexeis Sánchez Cruz
Eider Santiesteban Domínguez
Amaury Palacios Rodríguez

Resumen

El propósito de la investigación fue obtener un material con características siderúrgicas a partir de los residuos sólidos industriales de la empresa del níquel René Ramos Latour. Dicho residual fue sometido a un proceso de concentración magnética y aglomeración mediante la peletización, empleando como aglutinante la bentonita. Los pelets de 14 y 18 mm de diámetro mostraron valores de resistencia a la compresión en verde de 9,71 y 6,98 kg, respectivamente. Se demuestra que realizando las pruebas de reducción a la temperatura del horno de 1 265 °C y enfriando con atmósfera inerte se logra obtener 76 % de metalización, así como un grado de reducción de 80,42 %.

Palabras clave

Metalizados; reducción carbonotérmica; pelets compuestos; residuos sólidos.

Metalized iron production from nickel plant's solid wastes at Nicaro, Cuba

Abstract

The objective of the investigation is to obtain a material from "René Ramos Latour" nickel plant's solid wastes with steel properties. To meet the objective, solid wastes were subjected to magnetic concentration and agglomeration by pelletization, using bentonite as an agglutinant. The resulting pellets of 14 and 18 mm diameters were able to withstand compression in green of 9,71 and 6,98 kg respectively. It is demonstrated that it is possible to obtain 76 % metallization and 80,42 % reduction after carrying out reduction tests at temperatures of 1 265 °C in the furnace and cooling in inert atmosphere.

Key words

Metalized iron; reduction by coal; compound pellets; solid wastes.

1. INTRODUCCIÓN

La producción mundial de hierro siempre ha estado dominada por el Horno Alto. En los últimos tres años fueron empleadas un promedio de 934,9 millones de toneladas de arrabio (fundición con alto contenido de impurezas y entre 3,5 y 4,5 % de carbono) y 64,8 millones de toneladas de hierro esponja o DRI, siglas del término en inglés *Direct Reduced Iron* (Steel Statistical Yearbook 2010).

El hierro esponja es un hierro poroso que se obtiene como resultado de la eliminación del oxígeno del mineral durante el proceso de reducción, esencialmente con la misma forma y tamaño que la partícula del mineral; es un producto fácil de manejar y transportar y su composición química es uniforme y precisa. La técnica de reducción directa con carbón mineral fue desarrollada durante la década del 50 del siglo XX, en México, debido a la escasez de chatarra que trajo consigo la guerra de Korea (ILC 2012).

Los procesos de reducción se dividen en: procesos de reducción en estado sólido y procesos de reducción en estado líquido (*smelting*). Los primeros (reducción directa, DRI) se pueden clasificar, además, de acuerdo con el tipo de reductor, en: procesos que utilizan reductor sólido y procesos que utilizan reductor gaseoso. Actualmente, los procesos que emplean reductor gaseoso obtienen el 73,1 % de la producción mundial de DRI.

La reducción en fase gaseosa requiere del suministro de gas natural para producir el gas reductor. El gas natural es costoso en comparación con el carbón no coquizable. Para reducir costos de energía, o bien si la disponibilidad del gas natural es baja, algunos procesos utilizan carbón como reductor. Al introducir cantidades elevadas de carbón se incrementa el azufre, razón por la cual se coloca cal o caliza en la carga para absorber el azufre. El carbón, además de actuar como reductor, es también la fuente principal de calor; su uso ha aumentado de manera notable, principalmente, por su menor coste en comparación con el petróleo y el gas natural (Internacional Energy Agency 2010).

En la reducción carbonotérmica (combustible sólido) el reductor principal es el carbono, el cual produce otro agente reductor gaseoso, el CO, responsable del incremento de la presión interna del horno. Cuando actúa el carbono sólido, la reducción se da, únicamente, en los puntos de contacto, actuando temporalmente, debido a que cuando se forma una capa de hierro metálico la reducción ya no procede por contacto sino por difusión de átomos de carbono en el estado sólido. Finalmente, esto ocasiona menor penetración a los átomos de carbono, lo que hace que el contenido de carbono sea menor (entre el 0,1 y el 0,2 %) que en los procesos con reductor gaseoso (Conejo 2010).

En Cuba no existen yacimientos de carbón y la producción de aceros se realiza en dos acerías: Acinox Tunas y Antillana de acero, las que utilizan 100 % de chatarras de acero mediante la vía del Horno de Arco Eléctrico. La empresa de materias primas suministra la chatarra a las acerías a un precio inferior al del mercado internacional (la quinta parte aproximadamente); de continuar los ritmos de producción actuales la paulatina disminución de la chatarra de acero puede provocar un desabastecimiento en el sector siderúrgico, y su alto coste de adquisición en el mercado internacional influirían negativamente en los costos de producción del acero en este sector.

A pesar de la existencia de yacimientos de minerales de hierro, principalmente en la provincia de Santiago de Cuba, la mayor reserva de este elemento metálico se encuentra en los residuos sólidos industriales del proceso de obtención de níquel, tanto por la vía carbonato amoniacal o proceso Caron (empresas René Ramos Latour, en Nicaro y Ernesto Guevara, en Moa), como por la lixiviación ácida a presión (empresa Pedro Sotto Alba, Moa). Esos residuos se encuentran almacenados principalmente en represas de colas. La composición química de las colas de Nicaro varía en un amplio rango (Tabla 1) en dependencia de las características del mineral alimentado y de la eficiencia de la planta de extracción de níquel.

Tabla 1. Rango de variación de la composición química promedio de las colas de Nicaro (tomado de Leyva 2007)

Elementos u óxidos.	Contenido, %	Elementos u óxidos.	Contenido, %
Fe _{TOTAL}	38,40 – 44,20	SiO ₂	15,40 – 20,54
FeO	13,17 – 18,50	CaO	Trazas – 0,40
Fe ₂ O ₃	37,65 - 45,10	MnO	0,67 – 2,22
Al ₂ O ₃	3,25 – 5,30	NiO	0,37 – 0,57
MgO	9,54 – 13,80	P ₂ O ₅	0,03 – 0,06
Cr ₂ O ₃	2,35 – 4,00	Cl	0,06 – 0,50
S	0,07 – 0,20	Na ₂ O	0,021 – 0,27
CoO	0,09 – 0,12	K ₂ O	0,01 – 0,35
CuO	0,006 - <0,01	As	<0,01
Fe ⁰	0,13 – 0,43	PPI	0,96 – 2,90

Este residuo sólido polimetálico, para poder ser aprovechado con fines siderúrgicos requiere, necesariamente, de un proceso de beneficio, debido al elevado contenido de ganga (Al₂O₃+MgO+SiO₂+Cr₂O₃) que posee.

Para procesar las colas de Nicaro se propuso un esquema de separación magnética de baja intensidad con 8 etapas que permite obtener un concentrado con 58 % de hierro y 0,93 % de cromo; tal concentrado consigue una recuperación de 77,6 % en peso a partir de colas con un 41,22 % de hierro y 0,87 % de cromo (Mejanobr 1961).

En 1972 se demuestra la posibilidad de obtener un material aglomerado mezclando las colas de Nicaro con minerales del Grupo de Yacimiento Hierro Santiago (Mejanobr 1972); la variante de la sinterización sería entonces de gran utilidad para un posterior tratamiento en Horno Alto o Mini Alto Horno, sin embargo, el hecho de que Cuba no posee reservas de coque metalúrgico, el elevado precio de este en el mercado internacional y la complejidad de la explotación de los yacimientos de Santiago han hecho que esta posibilidad no resulte atractiva actualmente.

Durante la década del 70 continuaron en el país y fuera de este (CIS 1988) las investigaciones de los residuos sólidos de la industria del níquel y los minerales del Grupo de Yacimiento Hierro Santiago. Ello propició la construcción de una planta piloto para el beneficio de las colas de Nicaro, la cual permitió obtener 12 000 toneladas de concentrado de hierro.

Las corridas industriales de concentrado de hierro cubano en Horno Alto y la obtención de acero en oxiconvertidores realizadas por especialistas cubanos y soviéticos en instalaciones de la entonces Unión de Repúblicas Socialistas Soviética, reportaron un contenido de hierro total en el concentrado de 52,1 %. De ahí se obtuvieron 3 100 t de sínter con un contenido promedio de hierro total de 51,2 %. El sínter fue procesado completamente en un Horno Alto de volumen de 258 m³ y se obtuvieron 1 650 t de arrabio de aleación al cromo níquel (CIS 2005).

La reserva de hierro "colas de Nicaro" ha sido la más estudiada en Cuba, desde escala de laboratorio hasta escala industrial, y se ha demostrado la posibilidad de obtener acero a partir de ellas. Teniendo en cuenta que Cuba no posee reservas de coque metalúrgico, el empleo de este material por la vía convencional de Alto o Mini Alto Horno no es posible, de ahí la necesidad de una alternativa que no dependa del coque metalúrgico.

Es por eso que la presente investigación tuvo el propósito de obtener un material con características siderúrgicas a partir de los residuos sólidos industriales de la empresa de níquel René Ramos Latour mediante un proceso de reducción que no dependa del coque metalúrgico. Para ello el residuo industrial fue sometido a un proceso de concentración magnética y aglomeración mediante la peletización, y se empleó como aglutinante la bentonita y el carbón antracita como agente reductor.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron un total de 25 muestras de los cinco pozos designados, a diferentes profundidades, con las que se conformó una muestra compósito de dos toneladas.

2.1. Agente reductor

Como agente reductor se utilizó el carbón antracita, residual de la producción de níquel, el cual es procesado en la planta de Preparación Mecánica de Minerales del Centro de Investigaciones Siderúrgicas (CIS) y suministrado a las acerías nacionales como insuflado para la obtención de la escoria espumosa en el Horno de Arco Eléctrico. El carbón se molió en un molino de bolas hasta obtener el 80 % con una granulometría inferior a 74 μm .

En la Tabla 3 se muestra la composición química del carbón antracita empleado en la elaboración de los pelets. Para determinar la cantidad de carbón necesaria para la peletización se partió de la cantidad de carbón estequiométrica con 20 % de carbón en exceso, teniendo en cuenta las ecuaciones de las reacciones químicas (I) y (II):

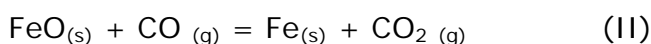


Tabla 3. Composición química del carbón antracita utilizado

Carbono fijo	Volátiles	Cenizas	Azufre	Hierro
80,6 %	8,57 %	10,63 %	0,58 %	2,55 %

2.2. Aglomerante

Las bentonitas, mineralógicamente, son arcillas montmorillonitas de composición química compleja. Pueden considerarse como un silicato de aluminio que puede llevar iones de sodio y de calcio. Debido a su estructura laminar, las bentonitas usadas en la peletización poseen la propiedad de esparcirse espontáneamente en el agua y ocupar de este modo los espacios existentes entre las partículas de mineral. En esta forma, las bentonitas tienen la capacidad de formar gel con una gran superficie específica.

La bentonita aumenta la resistencia de los pelets antes y después de la calcinación, da elasticidad al estado verde de los aglomerados y como tiene la capacidad de adsorber la humedad de forma intensiva aumenta su volumen de 15 a 20 veces y favorece la porosidad de los pelets debido a que el agua es eliminada fácilmente durante el secado.

En la composición química de la bentonita utilizada (Tabla 4) los óxidos principales son la sílice y la alúmina, los cuales le confieren un carácter ácido; se puede apreciar, además, una mayor presencia del sodio que del calcio.

Tabla 4. Composición química de la bentonita utilizada

Elemento	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Contenido, %	9,59	2,32	4,35	6,36	16,75	45,3

2.3. Concentración magnética y obtención de aglomerados

Las colas de Nicaro, al ser un residuo industrial del proceso Caron, no precisan de preparación mecánica debido a que más del 80 % tiene una granulometría inferior a los 74 µm, sin embargo, atendiendo a su contenido de hierro, fue necesario someterla a un proceso de concentración magnética antes de la obtención de los aglomerados (Figura 1).

Para la obtención de la muestra de concentrado de hierro se empleó un separador magnético de tambor de campo permanente, a escala de banco, con intensidad de campo de 103 kA/m y sistema de alimentación a corriente. Se procesaron dos toneladas de colas, el producto concentrado de la operación básica fue sometido a una limpieza para aumentar su contenido de hierro ($\beta = 54,3 \%$). Posteriormente, fue decantado y secado al sol; el rendimiento en peso del concentrado fue de $\gamma = 49 \%$.

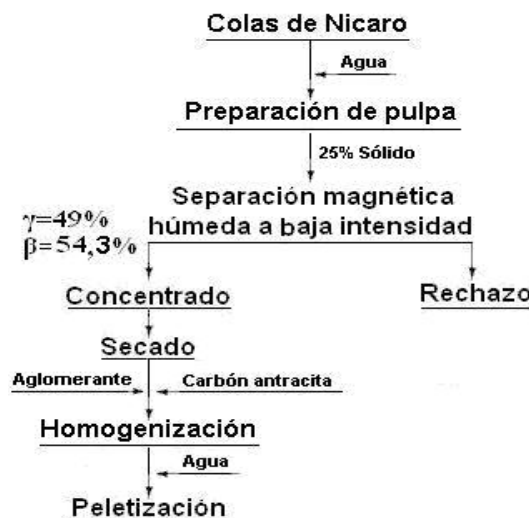


Figura 1. Esquema de obtención de aglomerados.

2.4. Obtención de aglomerados

El tamaño de los aglomerados influye en el proceso de reducción carbonotérmica, de manera que a menor diámetro del pelet más rápido ocurre el proceso de reducción debido a que hay una mayor transferencia de calor dentro del pelet. Sin embargo, cuando el diámetro del pelet es inferior a los 20 mm y se emplean temperaturas superiores a los 1 300 K su tamaño deja de ser significativo para el proceso.

Teniendo en cuenta que los procesos a base de gas emplean trozos de mineral o aglomerados con diámetro entre 12 y 15 mm y los procesos a base de Hornos de Hogar Rotatorio emplean pelets con diámetro entre 18 y 20 mm, se decidió emplear en la presente investigación dos tamaños de pelets: 14 y 18 mm.

El concentrado magnético con un contenido de humedad del 16 %, (valor óptimo para la peletización) fue mezclado y homogeneizado con el aglomerante y el agente reductor. Se empleó un disco peletizador a velocidad de 22 r.p.m y a 30 grados de inclinación a fin de facilitar el funcionamiento del circuito de alimentación de la parte sólida. El disco en su movimiento arrastra a la mezcla y se producen los choques que originan la aparición de los pelets.

2.5. Reducción carbonotérmica

Para la realización de las pruebas de reducción de los pelets compuestos (concentrado de hierro + carbón), primeramente se calentó el horno mufla hasta 1 380 °C y luego se introdujo la botella con la carga de pelets. Al abrir la puerta del horno se produjo un descenso de la temperatura hasta 1 100 °C, posteriormente, ésta se fue elevando hasta alcanzar la temperatura de trabajo, 1 265 °C, durante 15 minutos (Figura 2); concluido este tiempo se apagó el horno y se enfrió la muestra en atmósfera de argón.

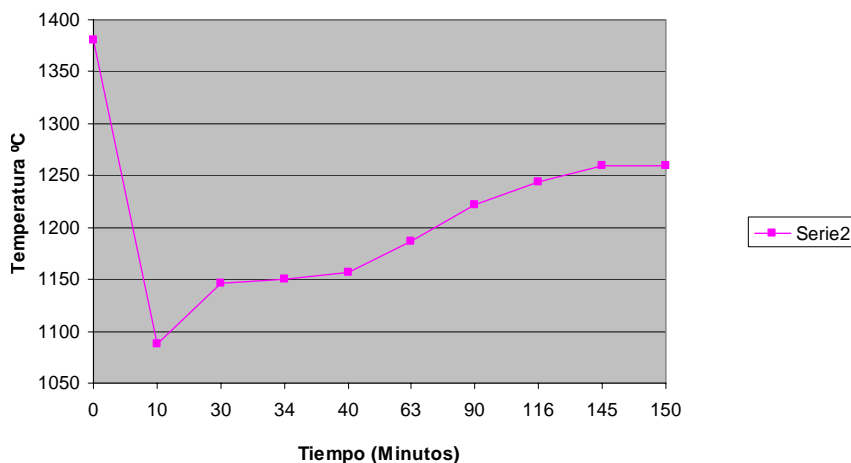


Figura 2. Perfil de temperatura seguido durante la reducción.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido de hierro obtenido clasifica a las colas investigadas como una mena pobre en este elemento (Tabla 6) lo que imposibilita su empleo en un proceso de reducción directa (mientras mayor contenido de hierro, menor contenido de ganga y viceversa).

Tabla 6. Composición química en % de las colas de Nicaro

Ele-	Ni	Co	Fe	S	MgO	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
Conteni-	0,37	0,08	44,35	0,16	11,35	1,09	17,49	4,346	2,93

Como puede apreciarse, el contenido de ganga en las colas estudiadas es aproximadamente del 35 % (Al₂O₃+MgO+SiO₂+Cr₂O₃), lo que justifica el empleo de la separación magnética para elevar el contenido de hierro, atendiendo a que la magnetita es la principal fase de estas colas.

Con la separación magnética, el contenido de hierro total se incrementó hasta un 54,3 % (Tabla 7) al eliminarse parte de la ganga presente en el residuo industrial.

Tabla 7. Composición química en % del concentrado de hierro

FeT	FeO	Fe ₂ O ₃	Ni	Co	Mn	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	S
54,3	14,16	57,78	0,41	0,094	0,73	6,3	8,96	3,84	1,871	0,145

Una vez obtenidos los pelets se seleccionaron al azar 10 con 14 mm de diámetro y otros 10 con diámetro de 18 mm para determinar la resistencia a la compresión a las 24 horas (Tabla 8).

Tabla 8. Valores de la resistencia a la compresión de los pelets

Pelets en verde (a las 24 Horas)	Resistencia compresión promedio (kg)	Desv. Típica	Coefficiente Variación (%)
Diámetro 14 mm	9,71	1,696	17,47
Diámetro 18 mm	6,98	0,361	5,16

Atendiendo a que no es necesario incurrir en gastos energéticos para la piroconsolidación de los pelets en verde y a las características técnicas de los agregados metalúrgicos que son empleados en la reducción de los pelets sin piroconsolidar, los valores obtenidos de la resistencia a la compresión son adecuados para su reducción en Hornos de Hogares Rotatorios.

El resultado del análisis químico de los pelets pulverizados, una vez concluido el proceso de reducción, se muestra en la Tabla 9, así como los valores calculados del porcentaje de metalización (% Met) y del grado de reducción (Zg).

Tabla 9. Composición química (en %) de la muestra reducida

Des-cripción	Fe	Fe [°] + Fe ⁺²	Fe met	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe Ext	S	% Met	Zg
Mineral reducido	55,4	54,5	42,2	12,3	5,203	98,4	0,2	76	80,4

El 98,4 % del hierro se encuentra como Fe[°] y Fe⁺², lo que significa que prácticamente toda la fase magnetítica (Fe₃O₄) fue reducida, no obstante el hierro metalizado solo representa el 76 %, quedando un 22,4 % del hierro en forma de wustita (FeO), por lo que se obtuvo un grado de reducción del 80,4 %.

Teniendo en cuenta la ley de hierro (55,4 %) y la metalización en el prerreducido, el aprovechamiento siderúrgico que puede darse a es-

te producto es como carga en Hornos Altos o en Horno de Arco Eléctrico de cuba baja, debido a la baja metalización y ley de hierro obtenidas. No resulta un material apto para ser alimentado directamente a los Hornos de Arco Eléctrico para la sustitución parcial de chatarras en las acerías cubanas, lo que evidencia la necesidad de continuar el estudio a una temperatura superior durante la reducción hasta lograr la segregación de la ganga de la fase metálica obtenida.

El contenido de azufre en los prerreducidos (0,2 %) se considera elevado, de ahí la necesidad de añadirle algún agente desulfurante en el posterior proceso de fusión de los prerreducidos debido a que el azufre es causante de la fragilidad del acero en frío (solubilidad ilimitada en acero líquido pero limitada en acero sólido).

Los resultados obtenidos conducen a nuevas investigaciones en las que se utilicen valores de temperatura superiores a 1 260 °C para evaluar la posibilidad de segregación de la ganga de la fase metálica. Es recomendable evaluar factibilidad técnico económica de emplear hornos de arcos eléctricos de cuba baja para la fusión de los metalizados obtenidos.

4. CONCLUSIONES

Es posible concentrar magnéticamente las colas de Nicaro y obtener aglomerados a partir de la mezcla con un 20 % de carbón y un 2 % de bentonita como aglutinante.

Se demuestra que, realizando las pruebas de reducción a la temperatura del horno de 1 265 °C, se obtiene 76 % de metalización y un grado de reducción de 80,42 %.

Los metalizados obtenidos no satisfacen las exigencias técnicas de los Hornos de Arco Eléctrico utilizados en la siderurgia cubana, pero sí son un potencial producto para cargar Altos o Minialtos Hornos, así como Hornos de Arco Eléctrico de cuba baja.

5. REFERENCIAS

- CIS 1988: Informe sobre resumen de investigaciones sobre las colas de las plantas de níquel. Informe Técnico. Biblioteca Virtual, Centro de Investigaciones Siderúrgicas.
- CIS 2005: Informe sobre la síntesis de las Investigaciones con las colas de Nicaro. Biblioteca Virtual, Centro de Investigaciones Siderúrgicas.
- CONEJO, A. 2000: Revisión y evaluación de procesos alternativos al horno alto. *Revista de Metalurgia* 36: 420-434.
- ILC 2012: Pellets de mineral de hierro energizados para reducción directa y producción de hierro esponja. Instituto Latinoamericano de la combustión. http://www.combustionindustrial.com/img/PELLETS_DE_MINERAL_DE_HIERRO_ENERGIZADOS.pdf (Consultado marzo 2012).
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. 2010: Key World Energy Statistics. http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key_stats_2010.pdf (Consultado marzo 2011)
- LEYVA, E. 2007: Monografía sobre colas de Nicaro (Informe interno). Centro de Investigaciones Siderúrgicas, Nicaro.
- LEYVA, O; DÍAZ, A; CORES, A; ISIDRO, A. 1989: Procesos de preparación premetalúrgica de los escombros lateríticos del yacimiento niquelífero Pinares de Mayarí. Informe Técnico. Centro de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, España. 42 p.
- MEJANOBR 1961: Investigación sobre las características de concentración de una muestra de colas de la planta de Nicaro para la producción de concentrado de hierro de grado normal. Informe técnico. Leningrado.
- MEJANOBR 1972: Informe sobre Investigaciones complementarias sobre preparación de las colas de la fábrica de Nicaro y minerales magnéticos de la República de Cuba para su fusión. Informe técnico. Leningrado.
- MINBAS 1970: Informe sobre las investigaciones de obtención de semiacero con colas de Nicaro en Korea (Informe interno). Centro de Investigaciones Siderúrgicas, Nicaro.
- STEEL STATISTICAL YEARBOOK 2010. Worldsteel Committee on Economic Studies– Brussels.

Yosvany Ferreiro Guerrero yosvany@dsit.cu
Ingeniero metalúrgico. Investigador Agregado.
Centro de Investigaciones Siderúrgicas, Nicaro, Mayarí, Cuba.

Alexeis Sánchez Cruz scruz@dsit.cu
Ingeniero metalúrgico. Investigador Agregado.
Centro de Investigaciones Siderúrgicas, Nicaro, Mayarí, Cuba.

Eider Santiesteban Domínguez eider@dsit.cu
Ingeniero metalúrgico. Investigador Agregado.
Centro de Investigaciones Siderúrgicas, Nicaro, Mayarí, Cuba.

Amaury Palacios Rodríguez apalacios@ismm.edu.cu
Ingeniero metalúrgico. Doctor en Ciencias Técnicas.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.