

Evaluación de la reducción de pelets utilizando carbón como agente reductor

Pellets Reduction's Behavior Using Carbon as a Reductor Agent

Sandra Patricia Pérez Velásquez*
Alfonso López Díaz**

Resumen

La obtención del acero se realiza a partir del mineral de hierro o de la chatarra. En el primer caso el proceso tiene lugar vía alto horno–convertidor; en el segundo, vía horno eléctrico de arco. Sin embargo, al horno eléctrico también se pueden cargar los denominados *pelets prerreducidos de minerales de hierro*, materiales metálicos que pueden ser obtenidos a partir de finos de mineral de hierro (portador de la carga metálica), finos de carbón (agente reductor), finos de cal (agente desulfurante) y bentonita (aglomerante), los cuales son convertidos en ovoides mediante el empleo de un disco peletizador. El trabajo muestra la caracterización realizada a las materias primas, los ensayos de reducibilidad efectuados a pelets cargados en un horno tipo Linder –fabricados a partir de dos yacimientos colombianos de minerales de hierro– y el diseño y construcción de un horno para evaluar el comportamiento de los pelets durante la reducción. Describe los equipos y analiza sus

Abstract

The steel production process is carried out either from iron mineral or out of scrap. In the first case the process takes place via a blast furnace–converter, in the second via an electric arch oven. Also the electric oven can be loaded either with the denominated pellets, which are pre-reduced forms of iron ore, a metallic material that can be obtained starting from iron ore fines (the metallic load carrier), coal fines (the reducer agent), lime fines (the desulfuretted agent) and bentonite (the agglomerator), which are converted in some ovoid pills of iron by employing a pelletizer disk.

This investigation shows the characterization carried out to the raw materials, and the reducibility rehearsals made to the pellets loaded in a Linder type oven. The raw materials are obtained from two locations of Colombian Iron ore natural deposits. It is explained the design and construction of an oven,

* Ingeniera Metalúrgica, Magister en Metalurgia y Ciencias de los Materiales, UPTC. Docente, Escuela de Ingeniería Industrial UPTC. Correo e.: metsandrap@yahoo.es

** Doctor en Ingeniería, Investigador Grupo de Materiales Siderúrgicos, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. Grupo de Materiales Siderúrgicos. Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá.

resultados, que dejan ver que efectivamente los pelets de minerales de hierro estudiados pueden ser prerreducidos, obteniendo grados de metalización del orden del 84% al 95%.

Palabras clave: Chatarra, Siderurgia, Mineral de hierro, Prerreducido, Reducción directa.

to evaluate the behavior of the pellets during the reduction process. It describes the teams and analyzes their results that allow to see that indeed the studied pellets of iron ore can be pre-reduced, in order to obtain good grades of metallization, in the ranges between 84% to 95%.

Key words: Scrap, Steelmaking, Iron ore, Pre-reduced, Direct reduction.

1. Introducción

Las siderúrgicas semiintegradas existentes en Colombia utilizan la chatarra de hierro como materia prima principal en sus hornos eléctricos, lo cual ha venido convirtiéndose en un problema operativo, por la dificultad en la consecución de esta en el país, teniéndose que recurrir muchas veces a su importación; adicionalmente, la chatarra nacional es, en su mayoría, de baja calidad, generando dificultades en el proceso metalúrgico. Todo esto, unido a su relativo alto precio, está incidiendo directamente en los costos de fabricación del producto final.

Una de las alternativas para controlar el precio de la chatarra es sustituirla total o parcialmente con hierro de reducción directa (HRD o DRI) [1]. El presente trabajo está orientado a la obtención de pelets prerreducidos, con el fin de utilizar los finos que se generan tanto en la explotación y transporte, como en la preparación del mineral, y que en la actualidad, en su mayoría, se encuentran inutilizados [2]. El desarrollo de los procesos de reducción directa de minerales de hierro, en el mundo, ha tenido un incremento permanente, reemplazando paulatinamente los procesos de producción de arrabio en el alto horno, por cuanto permite utilizar reactores de tamaños relativamente pequeños y de bajo costo, y, además, no requieren de coquerías, plantas costosas y cada vez más exigentes desde el punto de vista ambiental.

En el Corredor Industrial de Boyacá - Colombia, se concentra un porcentaje importante de empresas siderúrgicas nacionales, debido principalmente al hecho de que la región cuenta con materias primas, como carbón, caliza y minerales de hierro, aptas para ser empleadas en el proceso de reducción.

En este trabajo se describe el proceso de peletización, teniendo como referencia la composición química de la materia prima [3], la cual indica que es apta para ser utilizada en este proceso; posteriormente se

analiza el grado de reducción obtenido con los pelets, de tal forma que garanticen su buen desempeño en el horno rotatorio, obteniéndose un prerreducido de altas calidades.

2. Caracterización de materias primas

En los procesos de reducción directa de minerales de hierro, la calidad de las materias primas utilizadas juega un papel decisivo.

2.1 Mineral de hierro

Los minerales de hierro considerados en el presente trabajo pertenecen a los municipios de Ubalá (Cundinamarca) y El Uvo (Boyacá). Las técnicas empleadas y los resultados de la caracterización de finos de mineral se describen a continuación:

2.1.1 Mineral de Ubalá. Es de origen hidrotermal, formado principalmente por óxidos de hierro hidratados (ver tabla 1):

Tabla 1. Análisis petrográfico del mineral de hierro de Ubalá

Especie	(%)
Gohetita	82,6
Limonita	8,6
Lepidocrocita	6,2
Hematita	2,6

Fuente. Laboratorio Grupo Materiales Siderúrgicos UPTC - APDR

El hecho de que las especies mineralógicas estén hidratadas muestra el efecto que han tenido estos yacimientos por la acción tanto de las aguas de origen subterráneo como de las de escurrimiento. Esto explica por qué estos minerales son relativamente blandos y originan cantidades apreciables de finos en las operaciones de trituración.

De acuerdo a su composición química, este mineral es una buena alternativa para ser utilizado como materia prima en el proceso de reducción directa (ver tabla 2).

Tabla 2. Análisis elemental del mineral de hierro de Ubalá

Especie	(%)
Hierro total	56,50
Alumina	0,8
Óxido de calcio	0,52
Óxido de magnesio	0,08
Óxido de manganeso	3,22
Sílice	2,27

Fuente. Laboratorio Grupo Materiales Siderúrgicos UPTC - APDR

2.1.2 Mineral de El Uvo. Es un mineral sedimentario, como lo demuestra la presencia de arcilla en gran proporción. (ver tabla 3)

Tabla 3. Análisis petrográfico del mineral de hierro de El Uvo

Especie	(%)
Arcilla ferrosa	52,3
Sílice	11,5
Siderita	25,4
Hematita	6,0
Chamoisita	4,8

Fuente. Laboratorio Grupo Materiales Siderúrgicos UPTC - APDR

El mineral de El Uvo, igualmente, tiene probabilidades de incrementar el hierro en hierro metálico, pero presenta la desventaja de tener alto contenido de sílice (ver tabla 4).

Tabla 4. Análisis elemental del mineral de hierro de El Uvo

Especie	(%)
Hierro total	46,40
Alumina	5,67
Óxido de calcio	2,80
Óxido de magnesio	0,43
Óxido de manganeso	0,21
Sílice	11,77

Fuente. Laboratorio Grupo Materiales Siderúrgicos UPTC - APDR

2.2 Carbón

El departamento de Boyacá presenta carbones térmicos de excelentes características, con calidades superiores a los utilizados en otros países, por sus altos contenidos

de carbono fijo y bajos contenidos de cenizas y azufre, lo que los hace aptos para su utilización en el proceso de reducción [4]; se tomó como ejemplo un carbón del municipio de Tópaga. Así mismo, se trabajó con una antracita proveniente del departamento de

Santander, con el fin de evaluar las ventajas que se pueden obtener en procesos de reducción cuando el reductor empleado presenta bajos contenidos de materia volátil y alto contenido de carbón fijo.

Las técnicas empleadas para la caracterización de finos de carbón se describen a continuación:

2.2.1 Análisis inmediatos. Demuestran que el carbón de Tópaga (Boyacá) es de alto rango, con un contenido de materia volátil de 34,36%. La antracita corresponde al rango de las semiantracitas, con un contenido de materia volátil de 12,99%. Ambos presentan un contenido similar de cenizas (ver tabla 5).

Tabla 5. Análisis inmediato de los carbones considerados

Muestra	Tópaga	Antracita
Materia volátil (%)	34,36	12,99
Cenizas (%)	8,84	8,78
Carbono fijo (%)	54,66	76,77
Humedad (%)	2,14	1,46

Fuente. Laboratorio Grupo de Carbones UPTC – APDR

2.2.2 Análisis complementarios. El índice de hinchamiento muestra que el carbón de Tópaga (2,5) es poco aglutinante, mientras que la antracita (0) no hincha ni se aglomera, siendo importante para la re-

ducción de pelets, presentando un poder calorífico más alto debido a la mayor cantidad de carbón fijo que esta contiene (ver tabla 6).

Tabla 6. Análisis complementarios de los carbones considerados

Muestra	Tópaga	Antracita
Poder calorífico (BTU)	5362,8	7655,2
Índice de hinchamiento	2,5	0
Fusibilidad de cenizas (°C)	1527	1498

Fuente. Laboratorio Grupo de carbones UPTC – APDR

2.3 Cal

El máximo porcentaje permitido de azufre en un proceso de reducción directa es del 2% [5]. A mayor azufre, se requiere mayor cantidad de desulfurante (cal), lo cual no es conveniente, puesto que puede

propiciar la formación de anillos dentro del horno. Por ello se utilizan carbones con contenidos de azufre menores al 1%.

El análisis químico se realizó a la cal proveniente del municipio de Nobsa, Boyacá (ver tabla 7).

Tabla 7. Composición química de la cal.

Compuesto	%
CaO	52,41
MgO	0,45
SiO ₂	2,01
Al ₂ O ₃	0,95
Fe ₂ O ₃	0,65
PPC (Perdidos Por Calcinación)	1,59

Fuente. Laboratorio APDR

2.4 Bentonita

La bentonita se ha usado desde los años cincuenta del siglo pasado como agente aglomerante [6] en la producción de pelets del material previamente pulverizado durante las tareas de separación y

concentración. Aunque no existen especificaciones estandarizadas para este uso, se emplean bentonitas sódicas, naturales o activadas, puesto que son las únicas que forman buenos pelets, con las resistencias, en verde y en seco, requeridas, así como una resistencia mecánica elevada tras la calcinación (ver tabla 8).

Tabla 8. Composición química de la bentonita.

Compuesto	%
Fet	4,04
FeO	1,13
Fe ₂ O ₃	4,52
SiO ₂	52,43
CaO	1,40
MgO	2,49
Al ₂ O ₃	15,90
TiO ₂	0,74
PPC (Perdidos Por Calcinación)	17,35

Fuente. Laboratorio APDR

3. Peletización

La peletización es una alternativa para el uso de finos, ya que se basa en la formación de un ovoide a partir de finos de mineral, al cual se le agrega un aglomerante, proceso que se realiza en el disco peletizador (figura 1). Estos ovoides son tratados posteriormente (secado) en condiciones apropiadas para obtener el producto deseado.

3.1 Disco peletizador

Consiste esencialmente en un disco cortado con una pared periférica, el cual gira mientras se inclina de la horizontal. La adición de la carga y de la humedad se puede realizar mecánica o manualmente. Una característica importante del disco peletizador es que se puede controlar la calidad del producto final por operaciones tales como la variación de la inclinación

del disco, las revoluciones de giro (RPM), el punto de alimentación y la humedad de la materia prima. Los principales factores que influyen en la calidad de los pelets son las RPM del disco y la rata de alimentación, que determinan la longitud de la trayectoria de los pelets en el disco.

La granulometría de los pelets producidos por un disco depende del modo y de la ubicación de la alimentación de los materiales y del sistema de mojado. En general, el que un disco peletizador trabaje regularmente depende de la alimentación, ya que cualquier variación en esta resultará en una producción de pelets de muy variadas características.

Durante la operación del disco se pueden observar dos zonas:

Zona de nucleación, donde se forman los núcleos o semillas. Esta zona se encuentra en el punto de caída de agua, donde esta entra en contacto con el mineral.

Zona de crecimiento, una vez formado el núcleo, este empieza su crecimiento, disminuyendo así el coeficiente de fricción. La amplitud y la elevación de la trayectoria se incrementan a medida que crece el tamaño de las bolas, hasta que son eventualmente apartadas hacia abajo por el raspador, pasando bajo el agua rociada y encontrando material fresco para seguir creciendo.



Figura 1. Disco peletizador

Fuente. Grupo de Materiales Siderúrgicos

3.2 Procedimiento de peletización

Para la fabricación de los pelets se llevan a cabo las siguientes etapas:

3.2.1 Recolección de materias primas:

Mineral de hierro (El Uvo y Ubalá): portador de la carga metálica

Carbón (Antracita y Tópaga): agente reductor

Cal: agente desulfurante

Bentonita: aglomerante

3.2.2 Preparación de materia prima. La preparación mecánica consiste en el cuarteo, trituración, molienda y tamizado, obteniendo la granulometría mostrada en la tabla 9.

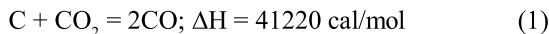
Tabla 9. Granulometría de la materia prima empleada en la fabricación de pelets

Materia prima	Granulometría	
	Malla	< mm
Mineral de hierro	10	1,65
Carbón	20	0,86
Cal	20	0,86
Bentonita	20	0,86

Fuente. Los autores

La granulometría de los carbones, recomendada para ser utilizada en los procesos de reducción directa, debe estar por el orden de la mitad del tamaño del mineral de hierro que se va a reducir.

Es importante que el combustible sólido que se va a utilizar en la reducción tenga una alta reactividad, para la operación exitosa del proceso. Ella se basa en la reacción de Boudouard (reacción 1).



El combustible más reactivo es aquel que más rápidamente convierte el CO_2 a CO , y, por consiguiente, el de mayor aporte de gas reductor al proceso. Además, como la reacción 1 es endotérmica, controlará, posteriormente, el aumento de la temperatura del lecho en la zona de reducción, impidiendo que se alcance una temperatura tan elevada que llegue a la fusión o la sinterización de los materiales cargados.

3.2.3 Preparación de las mezclas por peletizar. La mezcla está constituida por mineral de hierro, carbón,

cal y bentonita. Para calcular la cantidad de carbón por emplear se utiliza la siguiente expresión:

$$P.C = \frac{(C/Fe \times Fe_t (\text{Min}) \times (100 - H_2O \text{ Min}) \times P. \text{Min}}{C.F. (C) \times (100 - H_2O C)}$$

(2)

Donde:

C: Carbón F: Fijo
P: Peso Min: Mineral

Con base en la anterior fórmula, la proporción de carbón por cargar es del orden de 0,6 por unidad de mineral de hierro cargado [6]; sin embargo, a nivel industrial se trabaja con un exceso, para garantizar la mayor reducción posible y compensar así las pérdidas por arrastre que se presentan.

La relación C/Fe_{total} es muy importante, pues establece las proporciones de mineral de hierro y carbón que deben ser cargadas para realizar un ensayo de reducibilidad. Bajo estas consideraciones, a nivel industrial se opera normalmente con relaciones de C/Fe_{total} que están entre 0,4 y 0,6 [7]. La carga del disco peletizador se puede apreciar en la tabla 10.

Tabla 10. Cargas de las diferentes mezclas utilizadas en la fabricación de pelets en el disco peletizador.

Materia prima	Cantidad (gramos)	
	El Uvo	Ubalá
Mineral de hierro	500	500
Carbón Tópaga	220	295
Antracita	153	189
Cal	30	30
Bentonita	100	100

Fuente. Los autores

Cada una de las mezclas descritas anteriormente se homogeneizan para ser cargadas a la tolva de alimentación del disco, teniendo en cuenta las siguientes condiciones de operación:

Rata de alimentación: 10 gramos/minutos
Suministro de agua: 4,5 ml/min
RPM 28
Inclinación del disco 42°

Bajo estos parámetros, los pelets fabricados alcanzan tamaños entre 1,27 cm y 1,9 cm de diámetro (malla ½" y ¾"), respectivamente, los cuales son sometidos a calentamiento durante una hora a 150 °C [2], con el fin de secarlos. La humedad se determina por pérdida de peso mediante la fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = (P_i - P_f) \times 100 / P_i$$

Donde:

P_i. Peso inicial (pelets húmedos)

P_f: Peso final (pelets secos)

4. Ensayo de reducibilidad de Pelets

Para conocer el grado de reducibilidad de un mineral de hierro es necesario observar su comportamiento en diferentes condiciones, es decir, qué tanto oxígeno es capaz de eliminar de su interior. Esto es posible de indagar en un reactor especial denominado Horno Linder (figura 2). Este reactor busca simular las condiciones reductoras que se van a encontrar en hornos rotatorios a nivel industrial, permitiendo evaluar el comportamiento de los pelets frente al proceso de reducción.



Figura 2. Horno Linder

Fuente. Grupo de Materiales Siderúrgicos

La prueba consiste en cargar pelets dentro del cilindro del horno, que gira a 16 rpm y se calienta a temperaturas entre 800 y 1000 °C a 90 y 180 minutos. El horno cuenta, además, con un sistema de alimentación de gases y un tablero de control. Durante el ensayo en el Horno Linder se distinguen las siguientes etapas:

Etapas de calentamiento: desde el inicio del ensayo a 20 °C y hasta la temperatura de operación. El nitrógeno suministrado garantiza la evacuación de los volátiles del carbón y del agua física y de composición que se desprende como vapor. Esta etapa dura aproximadamente 60 minutos.

Etapa de reducción: aquí el nitrógeno arrastra los gases reductores que se generan, como el CO y el CO₂. Esta etapa corresponde al tiempo que se sostiene el material a la temperatura de operación y en ella se produce mayormente la reducción de los pelets.

Etapa de enfriamiento: una vez terminada la fase anterior, se apaga el sistema de calentamiento del horno y, sin suspender su rotación, se inicia el descenso de temperatura, manteniendo una atmósfera inerte con el nitrógeno para evitar la reoxidación de la carga, hasta lograr una temperatura final del orden de los 25 °C. Esta operación dura de 4 a 6 horas.

- Diseño experimental

Para conocer el comportamiento real del reactor Linder y definir los parámetros de operación es necesario la formulación de un diseño experimental que permita la validación de las variables escogidas: temperatura de reducción y tiempo de residencia.

En este trabajo se empleó un diseño experimental 2², en el que la combinación de los diferentes factores permitió determinar las tendencias de las variables consideradas.

Factor 1: Tiempo de residencia

Nivel a: 90 minutos
b: 180 minutos

Factor 2: Temperatura de ensayo

Nivel a: 800 °C
b: 1000 °C

Factor 1 nivel a (a₁): tiempo 90 minutos. Es el ensayo de reducibilidad, tipo Linder, estandarizado por la

mayoría de empresas fabricantes de prerreducidos en el mundo.

Factor 1 nivel b (b₁): tiempo 180 minutos. Con este valor se puede calcular el máximo porcentaje alcanzado de metalización con respecto a un mínimo estándar.

Factor 2 nivel a (a₂): temperatura 800 °C. Se toma este valor porque a esta temperatura se generan los gases reductores.

Factor 2 nivel b (b₂): temperatura 1000 °C. A esta temperatura llegan los ensayos que buscan conocer la reducibilidad de los pelets y, además, la formación de finos o degradación de la muestra.

5. Comportamiento de pérdida de peso vs. tiempo en los Pelets

La propiedad que tiene un óxido de perder su oxígeno, o de reducirse, frente a un agente reductor se conoce como reducibilidad y está influida por el tamaño de la partícula, la forma, la distribución de fases, la densidad, la porosidad y la microestructura cristalina. Usualmente la reducibilidad de un mineral se obtiene mediante experimentos que consisten en hacer pasar un gas reductor de prueba a través de un lecho de mineral, y se grafica la pérdida en peso contra el tiempo [8, 9].

El equipo experimental que se diseñó y construyó (figura 3) consiste en un horno reactor para colocar la canasta que contiene el pelet, la cual se encuentra suspendida de una balanza para registrar el cambio de peso, que será graficado en el computador conectado a la balanza. El horno cuenta con un termopar en contacto con el pelet para controlar la temperatura, se hace pasar a través del pelet un flujo de nitrógeno de 0,25 l/min. Durante el proceso, el pelet pierde peso debido a la eliminación del oxígeno.

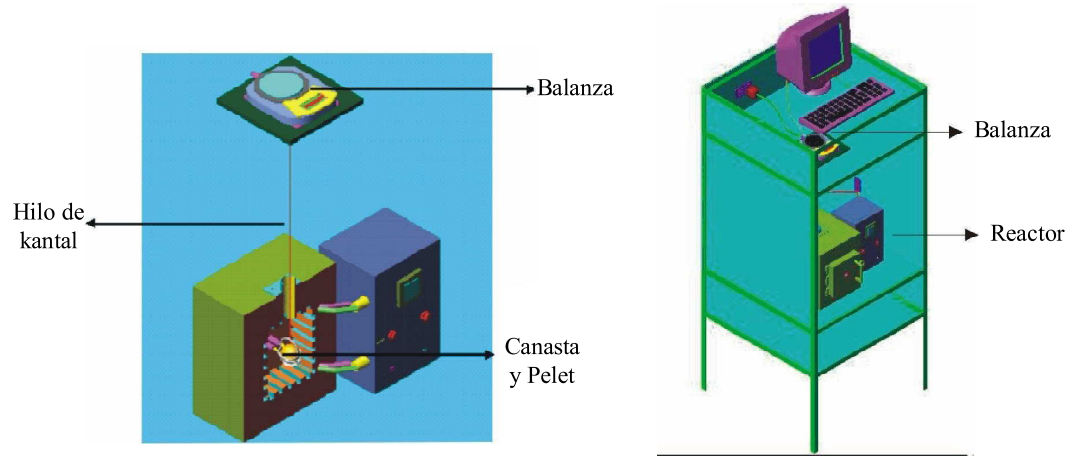


Figura 3. Esquema del equipo para la prueba de pérdida de peso en los pelets.

Fuente. Los autores

6. Resultados

- La tabla 11 muestra las condiciones de trabajo empleadas (temperatura y tiempo) en cada una de las pruebas. Las figuras 4, 5, 6 y 7 muestran

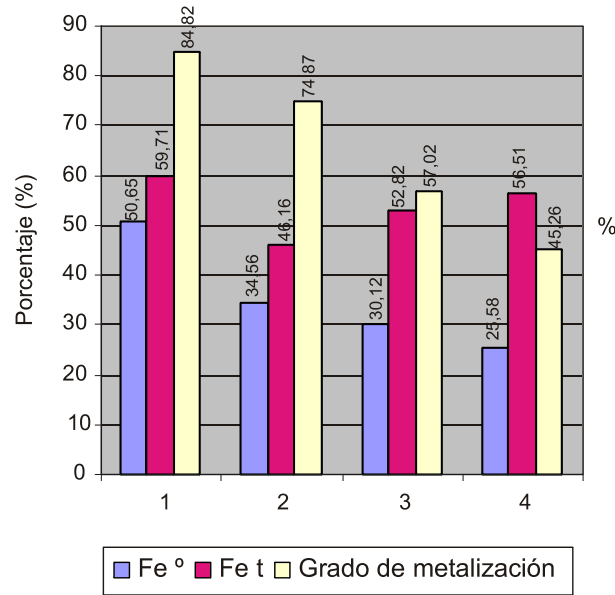
los grados de reducción obtenidos para los pelets fabricados con los dos minerales y los dos carbones considerados en las 16 pruebas desarrolladas en el horno Linder.

Tabla 11. Condiciones de trabajo en las pruebas de reducción en el horno Linder

T° 1000 °C t 180´	T° 1000 °C t 90´	T° 800 °C t 180´	T° 800 °C T 90´
Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7	Prueba 8
Prueba 9	Prueba 10	Prueba 11	Prueba 12
Prueba 13	Prueba 14	Prueba 15	Prueba 16

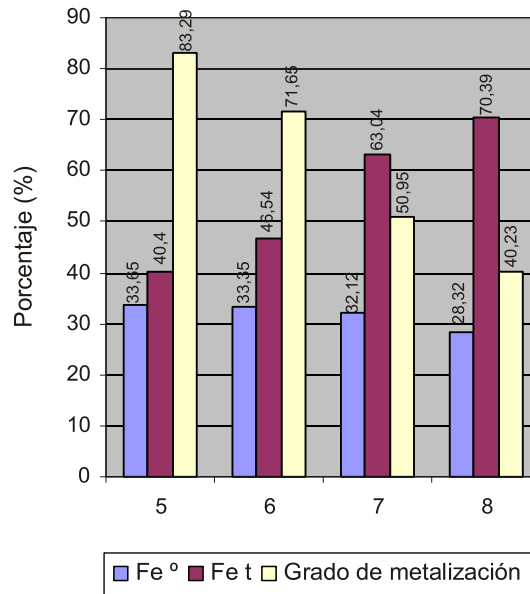
Fuente. Los autores

Figura 4. Porcentaje de hierro metálico (Fe^0) y hierro total (Fe_t), y grado de metalización del prerreducido obtenido a partir de mineral de Ubalá y antracita.



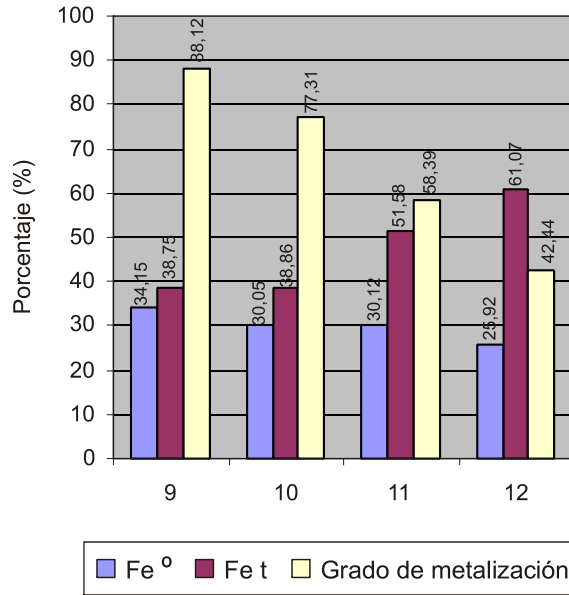
Fuente. Los autores

Figura 5. Porcentaje de hierro metálico (Fe^0) y hierro total (Fe_t), y grado de metalización del prerreducido obtenido a partir de mineral de Ubalá y Tópaga.



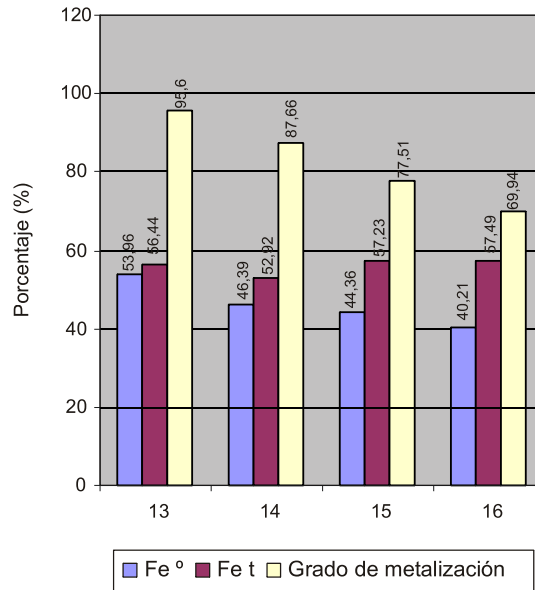
Fuente. Los autores

Figura 6. Porcentaje de hierro metálico (Fe^0) y hierro total ($Fe t$), y grado de metalización del prerreducido obtenido a partir de mineral de El Uvo y antracita.



Fuente. Los autores

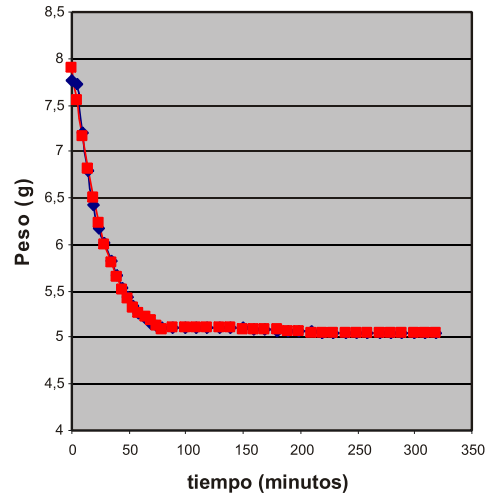
Figura 7. Porcentaje de hierro metálico (Fe^0) y hierro total ($Fe t$), y grado de metalización del prerreducido obtenido a partir de mineral de El Uvo y Tópaga.



Fuente. Los autores

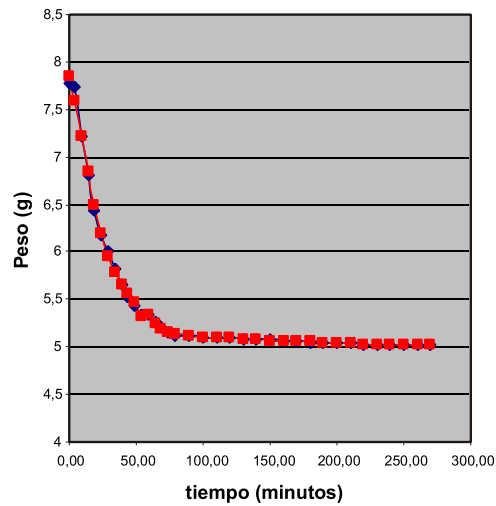
- Teniendo en cuenta que el diseño experimental establece que el tratamiento con los valores más altos (tiempo de 180 minutos y temperatura de 1000 °C) es significativamente mejor tanto para los dos minerales como para los dos reductores, las figuras 8, 9, 10 y 11 muestran la pérdida de peso que sufre un pelet durante el proceso de reducción, bajo estas condiciones de operación.

Figura 8. Pérdida de peso en pelets fabricados a partir de mineral de Ubalá y carbón antracita.



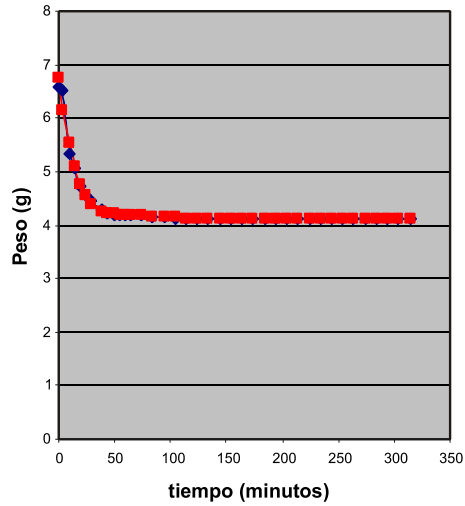
Fuente. Los autores

Figura 9. Pérdida de peso en pelets fabricados a partir de mineral de Ubalá y carbón de Tópaga.



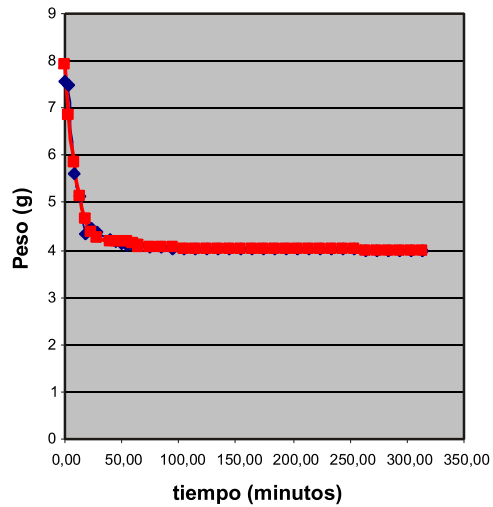
Fuente. Los autores

Figura 10. Pérdida de peso en pelets fabricados a partir de mineral de El Uvo y carbón antracita.



Fuente. Los autores

Figura 11. Pérdida de peso en pelets fabricados a partir de mineral de El Uvo y carbón de Tópaga.



Fuente. Los autores

7. Conclusiones

- Evaluando cada una de las técnicas utilizadas en la caracterización de los minerales de hierro de Ubalá y El Uvo y los carbones de Tópaga y la antracita se puede verificar:
 - El mineral de Ubalá, por su alto contenido en hierro, es una buena alternativa para ser utilizado como materia prima en el proceso de reducción directa, ya que se puede transformar fácilmente el hierro en hierro metálico.
 - El mineral de El Uvo, igualmente, tiene probabilidades de transformar el óxido de hierro en hierro metálico, pero presenta la desventaja de tener alto contenido de SiO_2
 - Los análisis inmediatos demuestran que el carbón de Tópaga es de alto rango, con un contenido de materia volátil de 34,36%, y la antracita corresponde al rango de las semiantracitas, con un contenido de materia volátil de 12,99%. Ambos presentan un contenido similar de cenizas, el poder calorífico es más alto en la antracita debido a la mayor cantidad de carbón fijo que esta contiene.
 - Al realizar los ensayos de reducibilidad con los minerales motivo de estudio, utilizando el carbón de Tópaga y la antracita, se aprecia que los mejores resultados de metalización se obtienen cuando se trabaja a temperatura (T°) de 1000 °C y tiempo (t) de 180 minutos.
- El horno Linder es un reactor en el cual es posible reducir los pelets, obteniéndose:
 - Con el mineral de Ubalá y antracita como reductor: un grado de metalización del 84,82%.
 - Con el mineral de Ubalá y carbón de Tópaga como reductor: un grado de metalización del 83,29%.
 - Con el mineral de El Uvo y antracita como reductor: un grado de metalización del 88,12%.
 - Con el mineral de El Uvo y carbón de Tópaga como reductor: un grado de metalización del 95,06%.
- De acuerdo con el grado de metalización obtenido con los pelets producidos con el mineral de El Uvo y el carbón de Tópaga (95,06%), comparado con lo mencionado por el autor Amit Chatterjee, de la TATA STEEL de la India, y lo observado en la visita realizada a Aceros Arequipa, ubicada en la ciudad de Pisco (Perú), cuyo prerreducido presenta un grado de metalización del 90%, se puede concluir que el prerreducido producido a partir de pelets es apto para ser cargado al horno eléctrico de arco.
- La prueba DUNCAN establece que el tratamiento con los valores más altos (tiempo de 180 minutos y temperatura de 1000 °C) es significativamente mejor.
- La pérdida de peso es significativamente mayor desde la T° ambiente hasta alcanzar T° de 800 °C, debido a que en este rango de T° se ha eliminado agua física, agua de composición y materia volátil, y la hematita se ha transformado a magnetita. Durante la reducción a T° 1000 °C, la pérdida de peso se debe al cambio de magnetita a wustita y, finalmente, a hierro metálico. En el enfriamiento el peso del pelet reducido se mantiene constante.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias, a la UPTC y a la Empresa Acerías Paz del Río S.A. por el apoyo prestado para el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- [1] C. A. Leyva. Tecnología de la reducción directa, mayo 1997, pp 1 y 2.
- [2] V. K. Trujic and D. T. Zivkovic. "Pellet Phase Changes During Reduced Iron Production by Rotary Klin Process". *Ironmaking and Steelmaking*, 2003. Vol. 30, No. 1, p. 12.
- [3] Informes de avances proyecto: "Obtención de

prerreducidos a partir de nacionales en horno rotatorio a nivel de laboratorio”.

- [4] A. López Díaz, E. González L., H. Saavedra. Caracterización de materias primas utilizadas en el proceso de producción de prerreducidos de minerales de hierro en un Horno Rotatorio a nivel de laboratorio, 2001, pp. 3-4.
- [5] A. Chatterjee, B. L. Pandey, C. Ojha. Development of the Tisco Technology for Sponge Iron Production in Rotatory Kilns, Ponencia presentada al SEAISI Quartely, octubre de 1978. Thailand, p. 315.
- [6] Regueiro y M. González-Barros. “Spanish Industrial Minerals and Rocks”. *Industrial Minerals*. May 1995, pp. 63-77.
- [7] R. Barbis. Conferencia reducción de minerales de hierro. 2000, p. 2.
- [8] S. Wang, H. W. Gudenau, D. Senk. “Comportamiento de la reducción y cambio de volumen de peletes con desechos industriales y carbón como medios de reducción”, Aachen, 2003.
- [9] J. A. Aguilar Garib. “Desarrollo de un modelo matemático de reducción topoquímica de pelets de mineral de hierro”. [Trabajo doctoral] Universidad Autónoma de Nuevo León, 1991, p. 21.

Fecha de recepción: 23 de octubre de 2007
Fecha de aprobación: 30 de mayo de 2008