

Evaluación de la reducibilidad de un mineral de hierro usando char como reductor

Iron Ore Reducibility Using Char As Reductor's Evaluation

Yenny Rubiela Hernández*
 Carlos Alberto Sandoval Fonseca**
 Claudia Inés Sánchez Buitrago***

Resumen

Muestra los ensayos de reducibilidad realizados en un horno tipo Linder a un mineral de hierro del municipio de Ubalá (departamento de Cundinamarca, Colombia), usando como reductor un char. Se indican las características del mineral de hierro de Ubalá, de los carbones empleados para la producción del char y de la caliza, así como los ensayos de reducibilidad. Para la caracterización de las materias primas y del char, como producto final, se aplicaron normas ASTM. En la producción de los char se utilizaron los hornos de coquización tipo Cerchar y tipo colmena de la Uptc en Samacá (Boyacá). Los ensayos de reducibilidad se hicieron bajo los mismos parámetros de operación utilizados con carbón como reductor, y los resultados obtenidos dejan ver que el mineral de hierro de Ubalá es reducible en menor porcentaje con char. Sin embargo, por los grandes beneficios para el medioambiente que se obtienen trabajando con el char, no se descarta la posibilidad de utilizarlo como posible sustituto del carbón en el proceso de reducción directa.

Palabras clave: Reducción directa, Mineral de hierro, Char, Carbón, Proceso de coquización, Prerreducido, Proceso SL/RN, Horno Linder.

Abstract

It describes the reductibility test carried out in a Linder furnace, using char as reductor on Ubalá's iron ores. It shows the Ubalá iron ores' properties, the coals used for char and limestone production, as well as the reducibility tests. The ores, coals and chars were characterized according ASTM norms. The chars were produced by the coking Cerchar Furnace and the beehive ovens, owned by UPTC in Samacá. (Boyacá) The reductibility test were carried out with the same operation's parameters used when coal functions as reducer, and the results indicate that Ubalá iron ores can be reduced in a minor percentage with char. However, due to the char's great environmental benefits, it isn't discarded the possibility to be used as the coal possible substitute in the direct reduction process.

Key words: Direct Reduction, Ubalá's Iron Ores, Coke process, Coal, Char, Pre-reduced, SL/RN process, Linder furnace.

Ingeniera Metalúrgica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, docente Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Correo: yerupu@hotmail.com
 Ingeniero Metalúrgico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, docente Escuela de Ingeniería Metalúrgica, investigador grupo de investigación en carbones y carboquímica. Especialista en Administración Universitaria. Correo: calsofo@yahoo.es
 Ingeniera Metalúrgica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

I. INTRODUCCIÓN

La reducción directa emplea tradicionalmente el coque, la semiantracita y los carbones bituminosos como reductores sólidos. Estudios realizados por los grupos de investigación de la Uptc han demostrado que de estos tres reductores, el carbón es el más eficiente, pero presenta dificultad en el manejo, por sus altos contenidos de materias volátiles. Por esta razón, se planteó la posibilidad de conocer el comportamiento de otros materiales con más bajos porcentajes de materias volátiles, como el char, obtenido a partir de un carbón de bajo rango [1, 2, 3].

II. REDUCCIÓN DIRECTA

La reducción directa es el proceso por el cual se eliminan oxígenos de los óxidos de hierro y se produce hierro metálico a temperaturas inferiores al punto de fusión de cualquiera de los materiales involucrados. El producto de la reducción directa recibe el nombre de HDR o hierro esponja, debido a su naturaleza esponjosa.

La carga de los reactores de reducción directa consiste en mineral de hierro en forma de bloques, finos de mineral, pellets, briquetas y combinaciones de estos. El reductor es el agente de eliminación del oxígeno, y para esta función se utilizan el hidrógeno, el carbono y el monóxido de carbono. El producto final es hierro metálico o hierro directamente reducido [4].

Los principales procesos de reducción directa con reductor sólido incluyen el proceso KRUPP CODIR, el proceso ACCAR y el proceso SL/RN. El proceso considerado en este trabajo es el SL/RN, caracterizado por el uso de agente reductor sólido, y minerales de hierro de menor ley, con respecto a los requerimientos de otros procesos.

III. MATERIAS PRIMAS EN LA REDUCCIÓN DIRECTA

A. Mineral de hierro

En Colombia existen diferentes yacimientos de mineral de hierro con grandes posibilidades de ser empleados

en el proceso de reducción directa [5]. Para este caso se trabajó con los yacimientos del mineral de la región de Ubalá, en el departamento de Cundinamarca. Este mineral se muestra como una roca compacta, de color pardo amarillento, con lustre metálico y con pequeñas cavidades. Petrográficamente se encuentra que la roca en general está constituida en su mayoría por Gohetita y Limonita (hidróxidos de hierro), con baja presencia de Hematita y escaso cuarzo [6, 7].

Los análisis químicos de las muestras obtenidas indican que el mineral tiene una composición promedio de 4.38% de sílice y 56.84% de hierro total. Los demás compuestos están por debajo del 1%, a excepción del óxido de manganeso, con un tenor del 3.54%, como se presenta en la tabla 1.

B. Agente reductor

Como agente reductor se empleó un char, que es el residuo sólido de la destilación del carbón de bajo rango a temperaturas por debajo de los 1000 °C. Este presenta bajos contenidos de materias volátiles, alta concentración de carbono fijo y es de estructura porosa [8].

Para la producción del char se emplearon cinco clases de carbones: bajo volátil (C1), medio volátil (C2), alto volátil (C3), carbón de la Chapa (C4) y carbón mina California (C5). Estos carbones provienen del municipio de Tópaga, en el departamento de Boyacá, y fueron seleccionados porque en estudios previos demostraron características apropiadas para el proceso de reducción directa.

Tabla 1. Análisis químico del mineral de Ubalá.

Componente	% peso
Fe Total	54.86
FeO	0.46
SiO ₂	4.38
Al ₂ O ₃	0.54
CaO	0.83
MgO	0.25
MnO	3.54
S	0.08
P	0.05
PPC *	11.06

* Pérdidas por calcinación

Para los análisis inmediatos se utilizaron muestras pulverizadas por debajo de malla 60 y malla 100

según las normas ASTM. Los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Análisis inmediatos y FSI de los carbones

Carbón	% MV	% CZ	% HD	% CF	FSI
C1	23.17	7.90	0.69	68.25	7
C2	29.02	8.46	0.78	61.75	4.75
C3	33.01	7.19	1.25	58.56	4.5
C4	36.15	6.44	1.21	56.22	5.5
C5	38.55	8.11	2.63	50.72	1.5

Mv=materia volátil; Cz= cenizas; Hd=humedad; CF=carbono fijo; FSI=Índice de hinchamiento

Posterior a la caracterización de los carbones se realizaron las pruebas de coquización en el horno Cerchar, que es un horno experimental de 10 kg, construido por la Uptc según el diseño del Instituto de Investigaciones del Carbón de Francia, Cerchar; está conformado por dos paredes verticales de calentamiento, que mantienen la misma temperatura durante el ensayo, y una caja de control de temperaturas de las paredes y del corazón de la carga por medio de tres termocuplas [8].

Las pruebas se llevaron a cabo con un tiempo de permanencia de 7 horas y una temperatura de 700 °C, condiciones determinadas en pruebas preliminares como las que permitieron obtener mayor desgasificación y aglomeración del carbón.

Los char obtenidos se sometieron a análisis inmediatos, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Análisis inmediatos y FSI de los char.

Muestras	% MV	% CZ	% CF	FSI
Char C1	10.98	14.15	72.59	0
Char C2	9.11	9.97	78.40	0
Char C3	15.84	9.91	72.35	0
Char C4	11.84	7.56	77.02	0
Char C5	16.80	9.93	68.07	0

Se seleccionó el carbón de la región de Tópaga (mina California) para realizar las pruebas en la planta demostrativa de coquización de la Uptc en Samacá, debido a que con este se obtuvo un char con el mayor contenido de materia volátil, componente activo en el proceso de reducción de mineral de hierro [10].

una capacidad de 6 toneladas de carbón. Cada horno tiene una puerta lateral para el descargue y una puerta de cargue o buitrón ubicado en la parte superior; además posee un ducto recolector de gases que los transporta a un horno de ladrillo y posteriormente a la chimenea [8].

La Planta Demostrativa de Coquización consta de una batería de seis hornos de forma circular y con techo en forma de colmena que irradia el calor. Los hornos colmena tienen un diámetro de 3.6 metros y

El carbón para semicoquizar se trituró hasta un tamaño de grano de ½". Se cargaron 2.8 toneladas y se pirolizó a una temperatura de 1000 °C, durante un tiempo de 50 horas.

El char obtenido también se sometió a análisis inmediatos y los resultados fueron comparados con

los del carbón de partida, información que se presenta en la tabla 4.

Tabla 4. Análisis del carbón y del char obtenido en la Planta Piloto de Coquización de la Uptc.

Análisis	C5	Char C5
Materia Volátil %	38.55	5.11
Cenizas %	8.11	10.36
Carbono fijo %	50.715	80.31
Poder calorífico (MJ/Kg)	31.36	26.09
Índice de hinchamiento	1.5	0

C. Caliza

Actúa como desulfurante, ya que el máximo porcentaje de azufre permitido en un proceso de

reducción directa es del 2%. Se empleó caliza cuya composición química se presenta en la tabla 5.

Tabla 5. Composición química de la caliza.

CaO %	MGO %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	PPC %
52.41	0.45	2.01	0.95	0.65	1.59

IV. ENSAYO DE REDUCIBILIDAD

Este ensayo es el que permite determinar qué tan fácilmente se eliminan los oxígenos de los minerales de hierro. El método más conocido es el que emplea un reactor especial denominado Horno Linder [9].

A. Horno Linder [2, 6, 9]

Simula las condiciones reductoras de un horno rotatorio. Consta, en principio, de un reactor tubular de acero inoxidable, un mecanismo de rotación que guía el cilindro, un mecanismo de suministro de gas (teniendo en cuenta que el calentamiento se hace por medio de resistencias, el único gas que se utiliza cuando se usa carbón o char como agente reductor es el nitrógeno) y un tablero de controles que consta de cinco flujómetros, dos indicadores de temperatura, tres amperímetros para cada una de las fases y un interruptor principal por medio del cual se controlan las operaciones del horno.

Para la correcta operación del horno Linder se deben mantener los siguientes parámetros:

- *Relación C/Fe_i*: Es uno de los más importantes, porque determina la cantidad de mineral de hierro y de char que se carga en el reactor. A nivel industrial se trabaja con una relación de 0.4 a 0.5 para determinar el peso del char a cargar. (1)

$$W_{char} = \frac{(C/Fe_T - Fe_{T\text{Mineral}}) (100 - H_2O_{\text{mineral}}) W_{\text{mineral}}}{C.F_{char} (100 - H_2O_{char})} \quad (1)$$

- *Flujo de gases*: Teniendo en cuenta que el calentamiento del horno se hace por medio de resistencias, el único gas que circula dentro del reactor es el nitrógeno. El flujo de nitrógeno, según normas internacionales, es de 2-20 litros/minuto. Experiencias realizadas en la Uptc señalan que con un flujo de 1.5 litros/minuto se obtienen excelentes resultados.

- *Granulometría del mineral de hierro:* El mineral de hierro se debe cargar con una granulometría de 6-20 mm. Partículas muy pequeñas tienden a aglomerarse y partículas muy grandes se demoran más en reducirse. Para este ensayo se cargaron: 350 g de 19.1 mm a 12.7 mm (3/4" a 1/2") y 150 g de 12.7 mm a 9.52 mm (1/2" a 3/8").
- *Granulometría del char:* Cuanto más pequeña sea la partícula de char, mayor área de contacto y mayor reactividad por parte del reductor, y, por consiguiente, mayores posibilidades de que se lleve a cabo la ecuación de Boudouard, que es la encargada de generar el CO necesario para la reducción; la granulometría del carbón o del char es del orden de la mitad de la del mineral de hierro. Para este ensayo se cargaron 55 g de 12.7 mm a 9.52 mm (1/2" a 3/8") y 128 g de 9.52 mm a 6.35 mm (3/8" a 1/4").
- *Granulometría de la caliza:* Se utiliza caliza con una granulometría entre 0.1 y 1 mm, y en proporciones que dependen de la cantidad de azufre.
- *Velocidad del reactor:* Para el proceso de reducción en el horno Linder se recomienda que la velocidad sea de 15 rpm, pues el exceso de velocidad altera la carga; además, un incremento en la velocidad está relacionado directamente con un mayor consumo de energía.
- *Temperatura de reducción:* El punto de ablandamiento que se obtiene en un ensayo de fusibilidad de cenizas de un carbón o del char es el parámetro que señala la temperatura máxima de operación de un horno rotatorio, pues sobre este punto se forman compuestos eutécticos con el resto del material de la carga, los cuales tienen bajos puntos de fusión, constituyendo una de las causas del encostramiento dentro del horno. Por ello se recomienda como punto máximo de operación de un horno Linder una temperatura de 100 °C por debajo del punto de ablandamiento de las cenizas del carbón o del char utilizado. Como la temperatura de ablandamiento de las cenizas del char es de 1185.55 °C, la temperatura máxima de trabajo es 1050 °C.

- *Tiempo de permanencia en el horno:* Se obtiene con base en las dimensiones y en la velocidad de rotación del horno que se utilice. (2)

$$t = \frac{1,77 L \sqrt{H F}}{P d n} \quad (2)$$

donde:

t es el tiempo en minutos; L, longitud del horno; P, pendiente del horno; d, diámetro del horno; n, revoluciones por minuto (r.p.m.); H, ángulo de reposo; F, factor igual a 1.5.

B. Diseño experimental

Bajo las consideraciones anteriores, la granulometría del mineral y del carbón, la velocidad de rotación del reactor, la cantidad de caliza, la relación carbono/hierro total y el flujo de gases son tomados como parámetros constantes. Como variables del proceso, para evaluar el comportamiento del mineral en estudio, se tomó la temperatura de reducción y el tiempo de residencia.

Se tomaron como punto de partida los tiempos de residencia y temperatura, empleados en ensayos de reducibilidad con carbón, efectuados en estudios anteriores.

Tabla 6. Modelo del diseño

Factor Nivel	Tiempo de residencia	Temperatura
a	90 minutos	900 °C
b	180 minutos	1050 °C
c	240 minutos	

V. RESULTADOS

Los resultados de las marchas en el horno Linder se observan en las figuras 1 y 2, en donde se presenta la comparación de los porcentajes de hierro total y metálico, a diferentes tiempos, para las marchas desarrolladas a 900 °C y a 1050 °C, respectivamente.

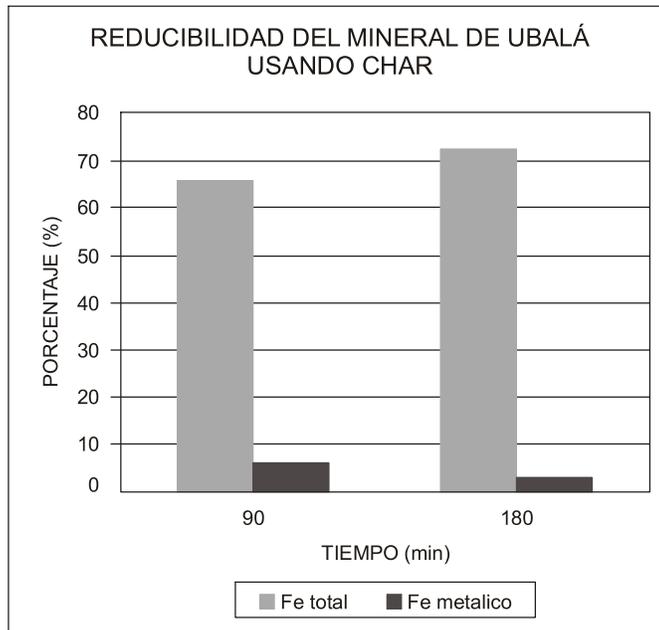


Figura 1. Marchas realizadas a 900 °C, a diferentes tiempos

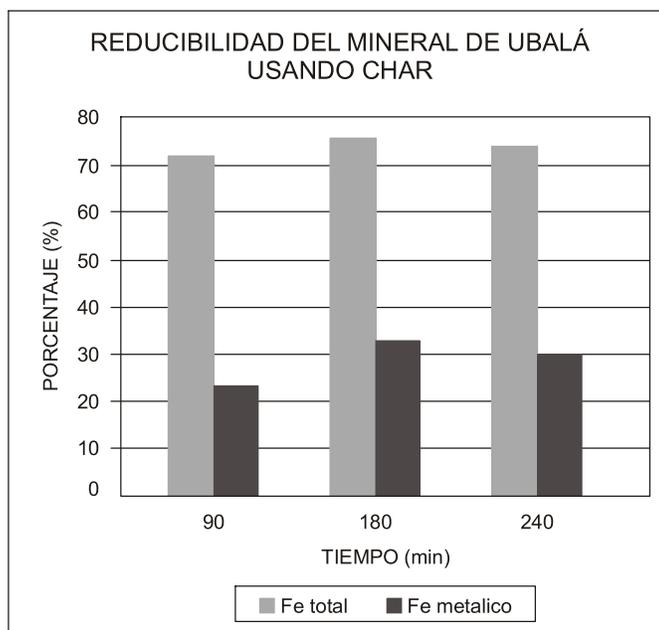


Figura 2. Marchas realizadas a 1050 °C, a diferentes tiempos

Las condiciones de diseño que permitieron obtener el mayor porcentaje de metalización fueron un tiempo de residencia de 180 minutos, a una temperatura de 1050 °C, con los resultados presenta-

dos en la tabla 7, en donde se muestran los porcentajes de hierro total, hierro metálico y de metalización del prerreducido, para las diferentes granulometrías.

Tabla 7. Análisis químico del prerreducido obtenido a 1050 °C y 180 minutos

Granulometría	% Fe total	% Fe metálico	% metalización
General	75.24	34.07	45.28
½ "	76.71	34.15	44.52
3/8 "	78.96	29.84	37.79

VI. CONCLUSIONES

- En general, las muestras del mineral de Ubalá, utilizando char como reductor, alcanzan una metalización baja, del orden del 45%, bajo los mismos parámetros de operación que con carbón.
- A 900 °C, el mineral de Ubalá no alcanza a reducirse, obteniéndose porcentajes de metalización entre 2 y 8%, como se ve en la figura 1. Esto se debe a que a esa temperatura difícilmente se lleva a cabo la producción del CO necesario para la reducción del mineral. A 1050 °C se obtienen mejores porcentajes de metalización, del orden de 45%. Este porcentaje no es satisfactorio, ya que en pruebas anteriores, usando carbón como reductor, se han obtenido metalizaciones del orden del 80%.
- El mejor comportamiento del mineral de Ubalá se presenta a 1050°C y 180 minutos, con una metalización del 45.28%. A la misma temperatura, pero con mayor tiempo de permanencia, 240 minutos, no se consiguió una metalización superior, lo que indica que no es indispensable el aumento del tiempo de reducibilidad, probablemente porque el char no es lo suficientemente reactivo para producir el CO necesario para el proceso de reducción aunque se incremente el tiempo.
- Con una granulometría entre ½" y ¼" para el char se obtuvo el más alto porcentaje de metalización, y por debajo de ella, entre 3/8" y 1/8", no mejoró la reducibilidad, lo que indica que probablemente la granulometría tampoco influye en el proceso de reducción directa con char, o que las partículas demasiado pequeñas presentan dificultad para reaccionar con los gases.

Los datos obtenidos de reducibilidad en todas las muestras permiten concluir que el mineral de Ubalá es difícilmente reducible con char bajo los parámetros establecidos para este trabajo, probablemente porque el char es un material de bajo contenido de materia volátil. Esto permite concluir que los volátiles participan en el proceso de reducción directa de un mineral de hierro, ya que están conformados por hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, vapor de agua, metano, fenoles y alquitranes en forma gaseosa, generadores todos estos de atmósferas reductoras. Además, el char es un material más estable químicamente, lo que le genera una reactividad más baja, aunque su naturaleza porosa proporcione mayor área de contacto. Sin embargo, las pruebas realizadas no son suficientes para concluir que el char no es un buen reductor en un proceso de reducción directa.

- Teniendo en cuenta que la utilización del char en un proceso de reducción directa traería grandes beneficios para el medioambiente, es necesaria realizar pruebas adicionales que consideren otras variables, como, por ejemplo, un char que contenga mayor porcentaje de materias volátiles, para poder determinar si estas verdaderamente intervienen en el proceso de reducción directa.

REFERENCIAS

- [1] A. H. Forero Pinilla, *Reducción directa de minerales de hierro. Primera parte*. Libro de Año Sabático. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Metalurgia. Tunja, 1995, 191 p.
- [2] Grupo de Materiales Siderúrgicos, *Diseño y construcción de un Horno Rotatorio a nivel de*

planta piloto para la obtención de prerreducidos a partir de minerales de hierro nacionales, en Acerías Paz de Río S.A: Primer informe técnico y financiero. Ene. 2003 – Jun. 2003.

- [3] Grupo de Materiales Siderúrgicos, *Proyecto de investigación Obtención de prerreducidos de hierro a partir de minerales nacionales en horno rotatorio a nivel de laboratorio: Informe final técnico y financiero.* Nov. 2000 – Oct. 2001.
- [4] C. Leiva, *Tecnología de la Reducción Directa.* 1997. 32 p.
- [5] J. A. Tovar Rodríguez y A. O. Vargas Velandia, *Caracterización de un mineral de hierro, y carbones utilizados en un proceso de Reducción Directa para Horno Rotatorio.* Trabajo de grado. Uptc. Facultad de Ingeniería. Escuela de Metalurgia. Tunja, 1995, 82 p.
- [6] J. G. Barón Motta y S. P. Pérez Velásquez, *Puesta a punto de un Horno Rotatorio a nivel semiindustrial para la producción de prerreducidos de hierro.* Trabajo de grado. Uptc. Facultad de Ingeniería. Escuela de Metalurgia. Tunja, 2002.
- [7] F. A. Medina Ciendúa, *Evaluación de la capacidad de peletización de finos de minerales de hierro de Topaipí y Tibiritá y su respuesta en ensayos de reducibilidad en el Horno Linder.* Trabajo de grado. Uptc. Facultad de Ingeniería. Escuela de Metalurgia. Tunja, 2002, 75 p.
- [8] J. A. Sánchez Rubio y E. A. Burgos Fonseca, *Obtención y evaluación de char como combustible sustituto del carbón para los hornos de las empresas productoras de cal.* Trabajo de grado. Uptc. Facultad de Ingeniería. Escuela de Metalurgia. Tunja, 2003, 111 p.
- [9] A. López Díaz; A. Medrano Rivera y F. R. Pérez Villamil, *Producción de prerreducidos de minerales de hierro en un Horno Rotatorio a nivel de laboratorio. Cuadernos Ocasionales. Separata de Pensamiento y Acción N.º 2 (2002), p. 7-19.* Tunja: Uptc.
- [10] C. A. Sandoval Fonseca *et ál.* “Correlación entre reactividad y rango de carbones antracíticos, coquizables y térmicos de la región centro-oriental de Colombia”. *Revista Facultad de Ingeniería.* Vol. 15, N.º 21 (jul.-dic. 2006), p. 48-54. Tunja: Uptc.

Fecha de recepción: 25 de septiembre de 2008
Fecha de aprobación: 10 de marzo de 2009