

**Determinación del grado de metalización de *pellets* de mezclas de minerales de hierro reducidos en horno Linder**

**Determination of degree of metallization of pellets from an iron mixture, reduced in a Linder furnace**

**Determinação do grau de metalização de péletes misturas de minero de ferro reduzidos em um forno Linder**

Para citar este artículo / To reference this article  
/ Para citar este artigo: Cuevas Soto, J. S., López Díaz, A., Lozano Gómez, L. F. y Rondón, F. C. (2016). Determinación del grado de metalización de *pellets* de mezclas de minerales de hierro reducidos en horno Linder. *Ingenio Magno*, 7(1), 46-61.

**Juan Santos Cuevas-Soto**

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Grupo de Materiales Siderúrgicos  
[juansantos.cuevas@uptc.edu.co](mailto:juansantos.cuevas@uptc.edu.co)

**Alfonso López-Díaz**

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Grupo de Materiales Siderúrgicos  
[alfonso.lopez@uptc.edu.co](mailto:alfonso.lopez@uptc.edu.co)

**Luis Fernando Lozano-Gómez**

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Grupo de Materiales Siderúrgicos  
[luis.lozano@uptc.edu.co](mailto:luis.lozano@uptc.edu.co)

**Francisco J. Rondón C.**

CVG Ferrominera Orinoco, Departamento de Investigaciones Aplicadas  
[franciscor@ferrominera.com](mailto:franciscor@ferrominera.com)

Fecha de recepción: 11 de febrero de 2016

Fecha de aprobación: 25 de abril de 2016

## Resumen

Este trabajo corresponde al estudio de reducción de *pellets* formados a partir de mezclas de un mineral de hierro procedente de Topaipí (Cundinamarca, Colombia) con dos minerales de hierro provenientes de Cerro San Isidro y Cerro Altamira (Bolívar, Venezuela). Esta técnica de beneficio de minerales ferrosos se aplica hace varias décadas en la industria siderúrgica para recuperar los materiales finos generados en los procesos previos a su utilización; en la actualidad se realizan mezclas entre minerales de baja ley con otros de alta ley. Se caracterizaron química, física y mineralógicamente los minerales de hierro, las mezclas y los compuestos de adición para elaborar los *pellets*, para lo cual se empleó difracción de rayos X y análisis químico. Después de secados, los *pellets* fueron sometidos a reducción en el laboratorio, en un horno tipo Linder, a 850 y 1000°C, durante 160 minutos. El propósito fue evaluar el grado de metalización y los índices de basicidad de los prerreducidos, para sustituir parcialmente la chatarra en el horno eléctrico de arco y la consecuente elaboración de productos ferrosos. Los análisis revelan que las mezclas consideradas incrementan el contenido de hierro y mejoran los índices de basicidad, pues se obtiene un grado de metalización con valores entre 81,20 y 95,1%. Esto permite concluir que la relación de mineral empleada en las mezclas es apropiada y los prerreducidos obtenidos cumplen con las especificaciones esperadas.

**Palabras clave:** basicidad, metalización, pellets, reducción, prerreducidos.

## Abstract

This work corresponds to a study on pellet reduction formed from mixtures of iron ore from Topaipí (Department of Cundinamarca, Colombia) with two iron ores coming from Cerro San Isidro and Cerro Altamira (State of Bolivar, Venezuela). This ferrous mineral benefaction technique has been used for several decades in the steel industry in order to recover fine materials, generated in the processes previous to their use; which in actuality mixtures are made between low grade and high grade metal are created. These iron ore metals, mixtures, and the components to be added to make the pellets were categorized by their chemical, physical, and mineralogical components through X-ray diffraction and chemical analysis. After drying, the pellets were reduced in the laboratory in a Linder furnace at 850 and 1000°C during 160 minutes. The purpose was to evaluate the degree of metallization and basicity indices of the direct reduced iron (DRI). This was done in order to partially substitute the scraps in the electric arc furnace and consequently, make ferrous products. The analysis showed that the mixtures increase the iron content and better the basicity indices. A metallization degree of 81.20 and 95.1% were obtained. This demonstrates that the ratio of mineral used in the mixture, taking into account the chemical composition of the minerals and the contents added in the production of the mixture, is appropriate and the DRI obtained meet the expected specifications.

**Keywords:** basicity, metallization, pellets, reduction, direct reduced iron (DRI).

## Resumo

O presente trabalho tem por objetivo o estudo da redução de péletes formados a partir de misturas de um mineral de ferro proveniente de Topaipí (Departamento de Cundinamarca, estado da Colômbia) com dois minerais de ferro provenientes da Serra de San Isidro e Serra de Altamira (Bolívar, estado da Venezuela). A técnica de benefício dos minerais ferrosos é aplicada há várias décadas na indústria siderúrgica para recuperar materiais finos, gerados nos processos prévios a sua utilização; na atualidade são feitas misturas entre minerais de baixo teor com outros

de alto teor são feitas. Os minerais de ferro, as misturas e os compostos de adição para a fabricação de péletes foram caracterizados química, física e mineralógicamente, utilizando a técnica de análise por difração de raios X e a análise química. Os pellets depois de ser secados, foram submetidos a redução no laboratório, num forno tipo Linder, a 850 e 1000 °C durante 160 minutos. O objetivo foi avaliar o grau de metalização e o índice de basicidade, obtendo-se um grau de metalização entre 81,20 e 95,1 %. O resultado permite concluir que a relação de mineral empregada nas misturas, a composição química dos minerais e os conteúdos de adições utilizadas para a elaboração das misturas, é apropriada e os pré-reduzidos obtidos cumprem as especificações esperadas.

**Palavras Chave:** basicidade, metalização de péletes, redução, pré-reduzidos.

## 1. Introducción

El prerreducido de mineral de hierro es producido a partir de finos de hematita o limonita en forma de *pellets*, para lo cual se emplea como agente reductor al carbón mineral. Este genera el monóxido de carbono, facilita la remoción del oxígeno del óxido de hierro y deja libre el hierro en forma de hierro metálico. El *pellet* se somete a calentamiento hasta la temperatura de reducción, sin llegar a la fusión, y se mantiene durante un tiempo de residencia específico, hasta alcanzar su máxima metalización.

El tema cobra cada vez más relevancia en virtud de la necesidad tecnológica de maximizar el aprovechamiento de los minerales de hierro colombianos, que se caracterizan por tener bajos contenidos de hierro y elevados contenidos de sílice; sin embargo, un manejo adecuado de mezclas permite tener nuevas alternativas en la producción de prerreducidos, para utilizarlos como sustituto parcial de la chatarra de hierro en el proceso de producción de acero en las siderúrgicas del país.

En este trabajo se mezcla mineral de Topaipí, Cundinamarca, con dos minerales de alta ley provenientes de la mina Cerro San Isidro y Cerro Altamira, del estado Bolívar, en Venezuela. Se espera con este proceso de mezclado mejorar sustancialmente las características químicas y mineralógicas del mineral de hierro, de tal forma que al ser sometido al proceso de reducibilidad se tengan altos porcentajes de metalización

y los contenidos de óxidos de silicio, aluminio, magnesio y calcio presentes en las mezclas puedan tener una influencia positiva en los índices de basicidad. Estos últimos están directamente relacionados con el comportamiento de la escoria que se forma y el consumo de energía durante el proceso de fusión del prerreducido (Przemyslaw y Mróz, 2011, pp. 1-7).

## 2. Procedimiento experimental

A continuación se describen los minerales de hierro por estudiar.

### A. Mineral de hierro colombiano

Los minerales de hierro se encuentran en la naturaleza en forma de óxidos, sulfuros y carbonatos. Los más empleados industrialmente son los óxidos, representados por la hematita, la magnetita y la limonita. En Colombia, los yacimientos más representativos se encuentran en Boyacá, en la mina del Uvo, municipio Paz del Río, y en la mina el Banco, municipio de Tasco. También en Cundinamarca, en inmediaciones de los municipios de Ubalá y Topaipí. Este último contiene goethita, limonita, chamosita, cuarzo, yeso y anhidrita (López, 2004, p. 2; (Forero y Díaz, 2007).

### B. Mineral de hierro venezolano

Venezuela posee gran cantidad de yacimientos; los más importantes se encuentran en el complejo de la Sierra de Imataca, en Guyana, donde están los yacimientos de Cerro Bolívar, El Pao y San Isidro. En Cerro Bolívar

afloran minerales de hierro de grano fino, cuyo tenor de hierro es de 62%. Los de Cerro el Pao se localizan a 45 km de San Félix. El cuadrilátero San Isidro se encuentra en el distrito Heres, estado Bolívar, formado por los yacimientos de San Isidro, San Joaquín, Los Barrancos, Santa Bárbara, Las adjuntas y Las Pailas (Vásquez, 2010, pp. 8-10).

Los minerales usados en las pruebas son provenientes de los yacimientos Cerro San Isidro, constituido por hematita, goethita, limonita y magnetita en cantidades de mayor a menor, en el mismo orden; y Cerro Altamira, con presencia de hematita, magnetita, goethita y limonita.

### 3. Análisis realizados

#### A. Al carbón

El carbón utilizado como agente reductor en la elaboración de los *pellets* para la reducción proviene de Tópaga, Boyacá. Su elección obedece a que en la actualidad es empleado en la empresa Acerías Paz del Río, así como a estudios precedentes realizados por el Grupo de Carbones y de Materiales Siderúrgicos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), que revelan características apropiadas para el proceso de reducción directa. Los análisis realizados al carbón seleccionado muestran valores que permiten un buen comportamiento como agente reductor (tabla 1).

Tabla 1. Análisis del carbón utilizado en las pruebas

ANÁLISIS INMEDIATO DEL CARBÓN DE TOPAGA						
% HUMEDAD	%CENIZAS	% MATERIA VOLÁTIL	C.F.	P.C.	%S	FSH
1.68	5.16	42.14	51.02	7540	0.91	3

Fuente: autores.

La relación carbono/hierro total ( $C/Fe_T$ ) es muy importante en el proceso de reducción, pues establece las proporciones de mineral de hierro y carbón bituminoso que deben ser cargadas para realizar un

ensayo de reducibilidad. Teniendo en cuenta estas consideraciones, en el sector industrial se opera, normalmente, con relaciones  $C/Fe_T$  entre 0,4 y 0,6, dependiendo de las calidades de las materias primas. La expresión para calcular la cantidad de carbón por emplear es la siguiente (Barbis, 2000, pp. 2-3):

$$P_c = \frac{\left[ \left( \frac{C}{Fe_T} \right) Fe_T (100 - H_2O_{(m)}) (P_m) \right]}{C_F (100 - H_2O_{(c)})}$$

Donde:

$P_c$  = peso del carbón

$Fe_T$  = hierro total del mineral

$\frac{C}{Fe_T}$  = relación de carbón y hierro total

$H_2O_{(m)}$  = humedad del mineral

$P_m$  = peso del mineral

$C_F$  = carbono fijo

$H_2O_{(c)}$  = humedad del carbón

Sin embargo, en el sector industrial se trabaja con un exceso, para garantizar la mayor reducción posible y compensar así las pérdidas por arrastre que se presentan. Se consigue así que el producto de la operación salga con un excedente de carbón (inquemados), lo que va a garantizar la no reoxidación de los prerreducidos durante el enfriamiento.

#### B. A los minerales de hierro

##### 1. Análisis químico

La determinación de los contenidos de hierro total, así como de hierro metálico presentes en los minerales, se realizó a través de análisis volumétrico, por el método de titulación, con una solución estándar de dicromato de potasio. La determinación del óxido de silicio, óxido de calcio y óxido de magnesio presentes en los minerales se realizó por métodos gravimétricos (tabla 2).

**Tabla 2. Análisis químico volumétrico y gravimétrico de los minerales de hierro de Topaipí, San Isidro y Altamira**

COMPUESTO	MINERALES		
	Topaipí	C. San Isidro	C. Altamira
SiO <sub>2</sub>	5,16	0,96	0,43
CaO	1,44	0,32	0,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,32	0,61	0,45
MgO	0,39	0,12	0,04
MnO	5,47	0,11	0,05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,33	0,41	0
PPC	9,48	5,59	0,6
Fe <sub>T</sub>	51,92	63,75	68,1
FeO	0,04	0,11	0,46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	74,21	91,04	96,88

Fuente: autores.

Estos resultados indican que, bajo parámetros internacionales en contenidos de hierro, los minerales de San Isidro y de Altamira presentan los porcentajes de hierro total altos, con respecto al mineral colombiano de Topaipí, como se observa en la tabla 2.

Los minerales venezolanos, además de presentar mayores contenidos de hierro, muestran bajos contenidos de óxido de calcio, óxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de magnesio y óxido de manganeso, lo cual conduce a generar bajos índices de basicidad (tabla 3).

**Tabla 3. Índices de basicidad de los minerales**

MINERAL	INDICES DE BASICIDAD DE LOS MINERALES					
	COMPUESTO				B2	B4
	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/SiO <sub>2</sub>	(CaO+ MgO)/(SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Topaipí	1,44	5,16	0,39	2,32	0,3	0,2
San Isidro	0,32	0,96	0,12	0,61	0,3	0,3
Altamira	0,33	0,43	0,04	0,45	0,8	0,4

Fuente: autores.

Las relaciones de índices de basicidad binaria (B2) y cuaternaria (B4) revelan valores por debajo de los

requeridos en la fusión de los prerreducidos. Los parámetros permisibles son del orden de 0,6 a 1,8 (Yang *et al.*, 2015, pp. 2087-2094.).

## 2. Difracción de rayos X

El equipo utilizado para el análisis de las muestras de hierro por difracción de rayos X corresponde a un difractómetro Phillips X'pert Pro Panalytical. Este análisis empleó una técnica cuantitativa que permitió identificar especies cristalinas y la presencia de las diferentes fases. Para el caso de minerales se aprovecha el hecho de que sus átomos se disponen en forma ordenada, según una red cristalina específica para cada mineral (Melgarejo, 2010, pp. 1-23).

El resultado es un espectro continuo sobre el que se destacan diferentes picos de alturas variables; cada pico es la respuesta a la difracción de los rayos X de un plano de la red cristalina del mineral que constituye la muestra. Estos resultados se comparan con un banco de datos, resultado del análisis acumulado de muestras puras de minerales y productos cristalinos obtenidos en laboratorio.

### a) Mineral de hierro de Topaipí

Los resultados indican que el 67,4% de este mineral está compuesto por goethita y el 22,3% por hemetita, lo cual está en concordancia con los resultados de los análisis químicos y petrográficos. Es importante indicar que las especies que están en muy baja proporción no logran ser detectadas por esta técnica, como es el caso de la sílice. De igual manera, es importante destacar la presencia de una gran cantidad de picos pequeños que se traslapan y hacen más difícil la definición de las especies presentes (figura 1).

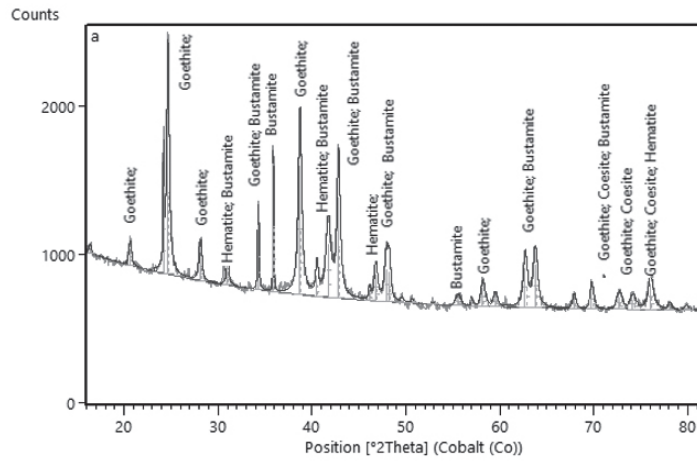


Figura 1. Diffractograma del mineral hierro de Topaipí

Fuente: autores.

**b) Mineral de hierro de San Isidro**

El diffractograma del mineral de hierro de San Isidro permite establecer que corresponde a un material con una composición mineralógica constituida por hematita

en un 65,7% y goethita en un 31,5%. Esto evidencia que responde a un elevado porcentaje de hierro y muy bajas impurezas (figura 2).

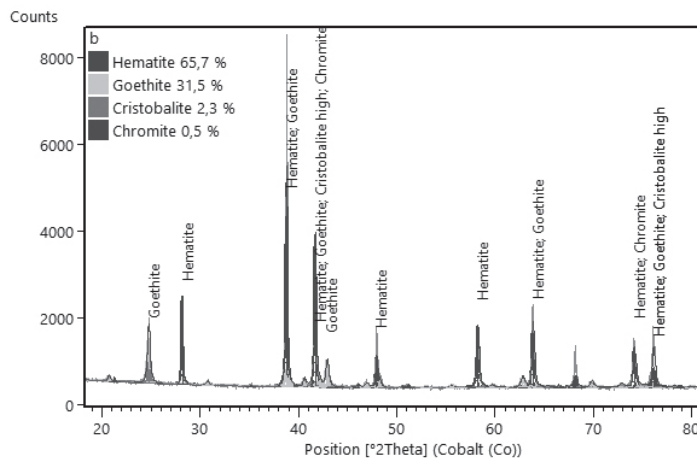


Figura 2. Diffractograma del mineral hierro de San Isidro

Fuente: autores.

**c) Mineral de hierro de Altamira**

El diffractograma del mineral de hierro del Altamira permite

establecer que corresponde a un material con una composición mineralógica constituida principalmente por

hematita. Fue necesario hacer una prueba de duplicidad para identificar la totalidad de la hematita, que arroja un 74,1%. Este porcentaje, sumado a la cantidad ya determinada, permite darle mayor precisión a la prueba e identificar con mayor exactitud la presencia de hematita.

También hay existencia de goethita en un 8,8%. Lo anterior muestra que este mineral contiene menor cantidad de impurezas, por lo cual sus porcentajes son tan pequeños que no se revelan en las pruebas (figura 3).

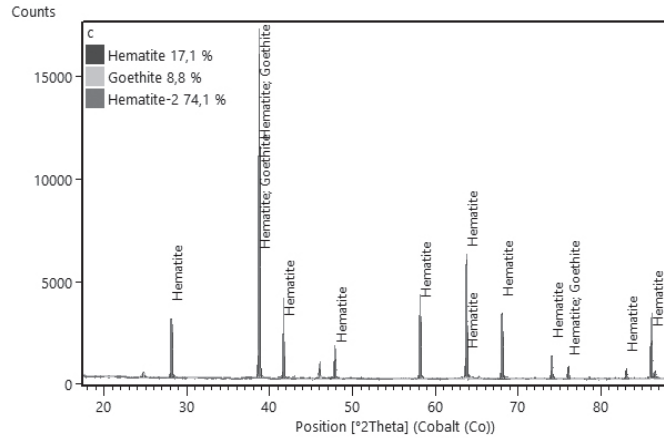


Figura 3. Diffractograma del mineral de hierro de Altamira

Fuente: autores.

#### 4. Mezclas de minerales

En este caso se realizaron mezclas en las siguientes proporciones, siempre en mayor cantidad el mineral colombiano: 80-20, 70-30 y 60-40 (porcentaje en peso).

#### A. Diseño experimental

El diseño se ha formulado asumiendo como variables independientes o factores las relaciones de masa y las temperaturas, cuyos niveles corresponden a las temperaturas de 850 y 1000 °C (tabla 4).

Tabla 4. Modelo de diseño experimental

Factores	AB		AC	
	Relación de mezcla (%)	Temperatura °C	Relación de mezcla (%)	Temperatura °C
Niveles	80/20 AB <sub>1</sub>	850	80/20 AC <sub>1</sub>	850
	70/30 AB <sub>2</sub>	1000	70/30 AC <sub>2</sub>	1000
	60/40 AB <sub>3</sub>		60/40 AC <sub>3</sub>	

Fuente: autores.

Donde A es el mineral de Topaipi, B es el mineral del Cerro San Isidro y C es el mineral del Cerro Altamira.

#### B. Análisis químico

Los análisis químicos de las mezclas fueron realizados

por volumetría, para determinar el hierro total y mediante disolución con ácido clorhídrico. Los análisis se valoran con permanganato de potasio o dicromato de potasio; posteriormente se emplea cloruro estano y finalmente se titula con dicromato de potasio; por gravimetría se

determinan los demás componentes presentes en las mezclas (tabla 5).

**Tabla 5.** Análisis químico de las mezclas de minerales (porcentajes en peso)

COMPUESTO	MEZCLAS DE MINERALES					
	AB <sub>1</sub>	AB <sub>2</sub>	AB <sub>3</sub>	AC <sub>1</sub>	AC <sub>2</sub>	AC <sub>3</sub>
SiO <sub>2</sub>	3,64	3,42	2,97	3,93	3,43	3,03
CaO	5,7	4,97	3,43	5,04	5,24	4,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,11	1,06	0,95	0,97	1,06	0,99
MgO	0,27	0,25	0,23	0,31	0,25	0,23
MnO	2,53	2,32	1,95	2,84	2,37	2,08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	0
PPC	13,96	13,35	11,59	14,53	12,5	10,84
Zn	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Fe <sub>T</sub>	45,92	47,63	50,61	44,66	47,99	50,46
FeO	0,07	0,08	0,07	0,03	0,03	0,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	65,58	68,02	72,29	63,84	68,59	72,14

Fuente: autores.

Los análisis químicos determinados en las mezclas son coherentes en términos de sus contenidos de hierro total, al confrontarlos con los cálculos teóricos de los balances de masa efectuados sobre las mezclas, al igual que con la relación de contenidos de los demás compuestos asociados. Estos análisis químicos permiten establecer el efecto positivo que tiene sobre el mineral colombiano de Topaipí, en su composición química, al mezclarse con los minerales venezolanos en las proporciones estudiadas.

Los índices de basicidad se incrementan para todas las mezclas realizadas con respecto a los índices de los minerales iniciales; sin embargo, resulta importante que los índices de basicidad binaria (B2) y cuaternaria (B4) estén dentro de los parámetros promedios permisibles (0,6 a 1,8) (Cores, 2009, pp. 207-227; Dwarapudi *et al.*, 2011, pp. 43-53) (tabla 6).

**Tabla 6.** Índices de basicidad de las mezclas

MEZCLA	INDICES DE BASICIDAD DE LAS MEZCLAS					
	COMPUESTO				B2	B4
	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO/SiO <sub>2</sub>	(CaO+ MgO)/(SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
AB1	5,7	3,64	0,27	1,11	1,6	1,3
AB2	4,97	3,42	0,25	1,06	1,5	1,2
AB3	3,43	2,97	0,23	0,95	1,2	0,9
AC1	5,04	3,93	0,31	0,97	1,3	1,1
AC2	5,24	3,43	0,25	1,06	1,5	1,2
AC3	4,17	3,03	0,23	0,99	1,4	1,1

Fuente: autores.



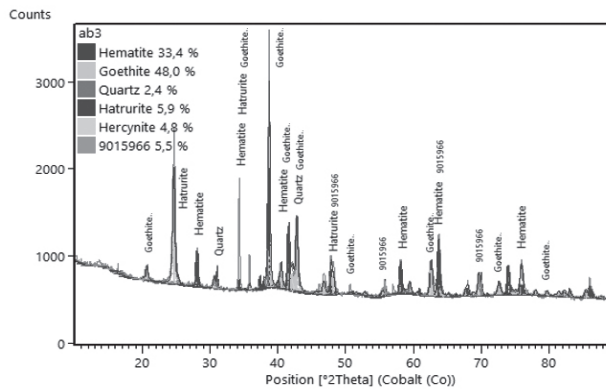
Lo anterior permite estabilizar las relaciones de basicidad de los prerreducidos, para así garantizar un buen desempeño en el proceso de fusión del material en el horno eléctrico de arco.

**C. Difracción de rayos X**

Se realizaron análisis por difracción de rayos X solo a las mezclas de minerales en las que se encontraba el mineral venezolano en proporción del 40%.

**1) Topaipi 60%, San Isidro 40%**

Los resultados del análisis de la mezcla de los minerales de Topaipi y San Isidro permiten establecer el incremento en la presencia de especies mineralógicas de hierro que presentan una fácil reducibilidad, como son la goethita en un 46,5% y la hematita en un 28,7%. Se logran incrementar los contenidos, en primer lugar, de las especies ferríferas y, en segundo lugar, de las impurezas (como la sílice) aportadas por el mineral de Topaipi (figura 4).



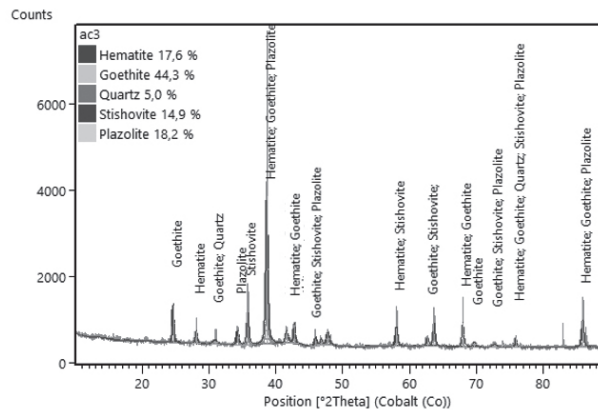
**Figura 4.** Difractograma de la mezcla de mineral de Topaipi y San Isidro, relación 60-40

Fuente: autores.

**2) Topaipi 60%, Altamira 40%**

El difractograma de esta mezcla muestra también una mayor presencia de especies ferríferas, representadas en la goethita en un 44,3% y en la hematita en un 17,6%.

De igual forma, se registra un contenido de óxido de silicio del 5%, lo cual se corrobora con los análisis químicos de gravimetría (figura 5).



**Figura 5.** Difractograma de la mezcla de mineral de Topaipi y Altamira, relación 60-40

Fuente: autores.

Los análisis cuantitativos de difracción de rayos X indican que las mezclas del mineral de Topaipi con minerales venezolanos van a aumentar los contenidos de especies mineralógicas de hierro, como la goethita y la hematita. De igual forma, se registra la presencia de impurezas como la sílice y especies no cristalinas, que se relacionan con el ruido en el fondo de los difractogramas. Las características químicas y mineralógicas de las mezclas aquí estudiadas (el mineral colombiano con minerales venezolanos) permiten afirmar que brindan las condiciones para la fabricación de los prerreducidos.

### 5. Preparación de pellets y ensayos de reducción

La formación de los pellets se realizó adicionando bentonita como material aglomerante en 15% y caliza en un 6%, para mejorar las propiedades mecánicas de los pellets reducidos. Estas cantidades son proporcionales a las que se usan en la industria, más un 10% de humedad, que se agrega durante la peletización en el disco apropiado para realizar este proceso, hasta obtener pellets en verde de tamaños entre 8 y 18 mm de diámetro. Luego se secaron los pellets a 105°C, durante 10 horas, en un horno de mufla.

Las pruebas de reducción se realizaron en un horno tipo Linder, a temperaturas de 850 y 1000° C. Para ello se tomaron como referencia estudios previos (Africano, 2005, pp. 29-33), que indican que en estos rangos se logran importantes niveles de metalización. El ciclo térmico empleado responde a los siguientes parámetros:

- *Rata de calentamiento:* de 5,5 °C/min, con suministro de 2,5 L/min de nitrógeno.
- *Tiempo de residencia:* 160 minutos.
- *Proceso de enfriamiento:* 2,5 horas, con suministro permanente de nitrógeno con un flujo de 2,5 L/min, hasta alcanzar una temperatura final de 30 °C y garantizar así la no reoxidación de los pellets.

#### A. Análisis químico por volumetría y gravimetría de los pellets reducidos

Para estos análisis se usaron las mismas marchas analíticas empleadas para estudiar los minerales y se incluyó la determinación del hierro en forma metálica. La tabla 7 muestra los análisis alcanzados.

**Tabla 7.** Composición química, en porcentaje, de las mezclas de minerales reducidos en forma de pellet

COMPUESTO	ANÁLISIS QUÍMICOS MEZCLAS DE PELLET REDUCIDO											
	AB1(80/20)		AB2(70/30)		AB3(60/40)		AC1(80/20)		AC2(70/30)		AC3(60/40)	
	850°C	1000°C	850°C	1000°C	850°C	1000°C	850°C	1000°C	850°C	1000°C	850°C	1000°C
Fe <sup>s</sup>	58,84	60,73	74,56	78,78	77,54	79,62	78,98	81,57	73,81	74,72	74,65	80,54
FeT	72,45	73,87	80,95	86,74	85,97	84,83	83,85	86,94	79,86	78,93	78,52	85,54
SiO <sub>2</sub>	6,52	5,89	5,32	4,95	4,00	3,95	6,82	5,05	4,83	3,96	4,31	3,91
CaO	5,05	4,17	3,03	3,5	4,65	4,02	4,92	4,03	3,84	3,30	3,12	3,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,98	0,98	0,99	0,95	0,98	1,07	0,38	0,93	1,02	1,00	1,09	1,02
MgO	0,25	0,24	0,25	0,23	0,24	0,21	0,30	0,23	0,25	0,22	0,23	0,24

Fuente: autores.

Se observa que los contenidos de hierro metálico, para cada una de las mezclas y a las temperaturas en que se realizó la reducción, tienden a aumentar, en primer lugar, cuando se aumenta la relación de mineral venezolano, debido al efecto del agente reductor que elimina el oxígeno del óxido de hierro. Por otro lado, al aumentar la temperatura, se presenta la tendencia a incrementar los contenidos de hierro metálico y, de igual forma, se eleva la cantidad de hierro total, lo cual se ve reflejado en los incrementos en el grado de metalización.

Esto además permite ver que los incrementos están en concordancia con los aumentos graduales de hierro total en los análisis químicos de las mezclas de minerales antes de elaborar los *pellets*. Estos resultados dejan ver la correspondencia con las fases ferrosas identificadas mediante los análisis de difracción de rayos X.

Los compuestos asociados a compuestos ferrosos se incrementan en forma significativa con relación

a las mezclas, debido a las adiciones de bentonita empleada como aglomerante y a la caliza para aumentar la resistencia de los *pellets*. Esto trae un efecto en los cambios en los índices de basicidad de los *pellets* reducidos, que posteriormente definen ciertos comportamientos de la escoria en el proceso de fusión.

El porcentaje del grado de metalización se determina mediante la siguiente relación:

Donde:

$$\% \text{Grado de metalización} = \frac{\%Fe^{\circ}}{\%Fe_T} * 100$$

$\%Fe^{\circ}$  = porcentaje de hierro metálico

$\%Fe_T$  = porcentaje de hierro total

La tabla 8 muestra el comportamiento para la mezcla Topaipí-San Isidro.

Tabla 8. Grado de metalización de las mezclas Topaipí-San Isidro a temperaturas de 850 y 1000 °C

MEZCLAS TOPAIPÍ - SAN ISIDRO				
MEZCLAS	T °C	%Fe° metálico	%FeTotal	%Grado de metalización
AB1(80/20)	850	58,84	72,45	81,2
	1.000	60,73	73,87	82,2
AB2(70/30)	850	74,56	80,95	92,1
	1.000	78,78	86,74	90,8
AB3(60/40)	850	77,54	85,97	90,2
	1.000	79,62	84,83	93,9

Fuente: autores.

Se observan los porcentajes del grado de metalización para cada una de las relaciones de mezcla con sus respectivas temperaturas, con un tiempo de residencia de 160 min y con incrementos a medida que cambian las relaciones de mezcla.

Este efecto demuestra que las proporciones determinadas sí son razonables para mejorar la reducibilidad y el

comportamiento de los prerreducidos durante la fusión en el horno eléctrico de arco. Cuando estas mezclas contienen altos contenidos de finos de limonita y compuestos asociados, generan vapor de agua en la reducción, con lo cual se incrementa la salida de los finos por las altas presiones.

La tabla 9 muestra el comportamiento para la mezcla Topaipí-Altamira.

Tabla 9. Grado de metalización de las mezclas Topaipí-Altamira a temperaturas de 850 y 1000 °C

MEZCLAS TOPAIIPI - ALTAMIRA				
MEZCLAS	T °C	%Fe <sup>o</sup> metálico	%FeTotal	%Grado de metalización
AC1(80/20)	850	78,98	83,85	94,2
	1.000	81,57	86,94	93,8
AC2(70/30)	850	73,81	79,86	92,4
	1.000	74,72	78,93	94,7
AC3(60/40)	850	74,65	78,52	95,1
	1.000	80,54	85,54	94,2

Fuente: autores.

Se puede ver una tendencia similar a las anteriores, pero estas presentan mayores grados de metalización, puesto que los análisis químicos y la difracción de rayos X manifiestan condiciones favorables en cantidades de hierro total, menos cantidades de compuestos asociados y fases bien definidas, con mayores porcentajes que los minerales y las mezclas del otro grupo. También

son menores las cantidades de limonita presente que pueden causar efectos adversos.

#### B. Difracción de rayos X del *pellet* reducido

La figura 6 muestra las especies formadas por efecto de la temperatura durante la reducción de los *pellets*, elaborados con una mezcla 80-20.

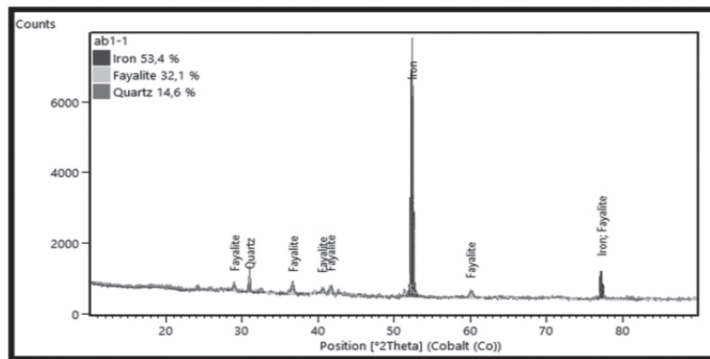


Figura 6. Difractograma del *pellet* reducido, conformado por la relación 80-20 de los minerales Topaipí-San Isidro

Fuente: autores.

El difractograma revela especies cristalinas y la presencia de sus diferentes fases, conformadas por hierro metálico, fayalita y cuarzo. También se forman agrupaciones de compuestos durante el proceso de

reducción, lo cual refleja que los componentes químicos son identificados mediante análisis químicos.

La figura 7 muestra las especies formadas por efecto de la temperatura durante la reducción de los *pellets*.

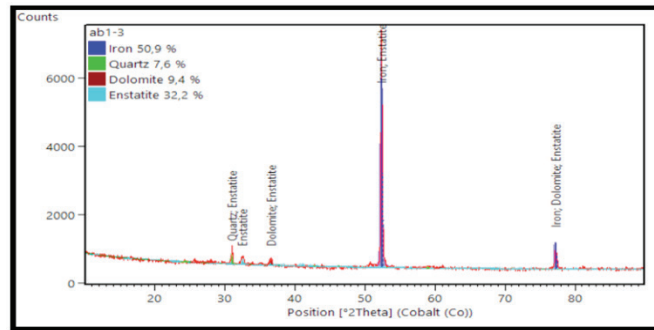


Figura 7. Difractograma del *pellet* reducido, conformado por la relación 60-40 de los minerales Topaipi-San Isidro

Fuente: autores.

En el difractograma se aprecia una especie cristalina correspondiente a hierro metálico, cuarzo, dolomita y enstatita, con fases diferenciadas, que forman parte de los componentes de los *pellets* después de ser reducidos para definir químicamente el material.

La figura 8 presenta las especies formadas por efecto de la temperatura durante la reducción de los *pellets*.

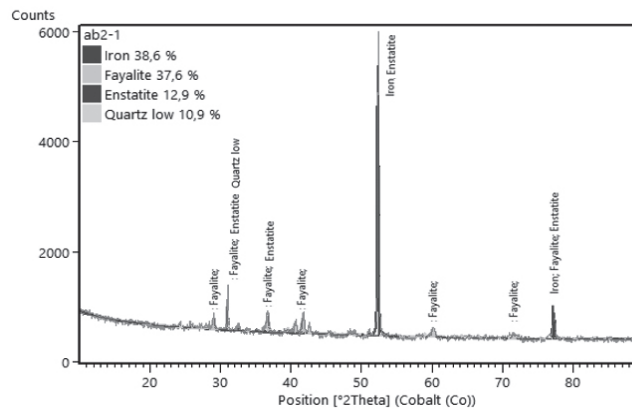


Figura 8. Difractograma del *pellet* reducido, conformado por la relación 80-20 de los minerales Topaipi-Altamira

Fuente: autores.

En este difractograma, se observan especies cristalinas como el hierro metálico, la fayalita, la enstatita y el cuarzo, igualmente con fases diferenciadas, que conforman el *pellet* reducido y dan identidad química propia al *pellet* reducido.

La figura 9 muestra las especies formadas por efecto de la temperatura durante la reducción de los *pellets*.

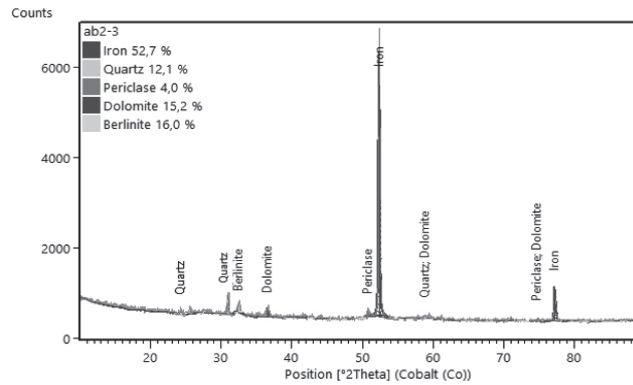


Figura 9. Difractograma del *pellet* reducido, conformado por la relación 60-40 de los minerales

Topaipí-Altamira

Fuente: autores.

El difractograma revela cinco especies conformadas por hierro metálico, periclase, berlinita, dolomita y cuarzo, que forman parte de las fases que constituyen los *pellets* reducidos con distribución uniforme.

Los análisis anteriores revelan cada una de las especies presentes en las diferentes mezclas de los *pellets* reducidos, que, al ser disueltos durante los análisis químicos por análisis volumétrico y gravimétrico, proporcionan de forma individual los contenidos reales del hierro metálico, hierro total y demás compuestos asociados en forma de impurezas.

## VI. Conclusiones

Las relaciones de minerales de Topaipí con la de San Isidro y Altamira, que conforman las mezclas, se comportaron de forma satisfactoria, en favor del rendimiento metálico y de comportamiento químico a nivel de laboratorio. Los resultados analizados permiten pensar en la posibilidad de aplicarlos en el sector industrial. A pesar de que el mineral colombiano es de baja ley y tiene elevados contenidos de impurezas, la alternativa de beneficio es viable.

La peletización de las mezclas respondió muy bien con los porcentajes de carbón calculados, así como con las adiciones de bentonita como aglomerante y de caliza para balancear el azufre y mejorar las propiedades mecánicas del *pellet* reducido.

Los resultados del grado de metalización demuestran que las temperaturas y el tiempo de residencia durante la reducción de estas mezclas en el horno fueron apropiados y pueden brindar buenos resultados también en el campo industrial. Se comprobó que al emplear temperaturas altas se incrementa el grado de metalización del prerreducido.

La mezcla que presenta las mejores condiciones de composición química, representadas en el más alto porcentaje de hierro total y hierro metálico, junto a las más bajas cantidades de impurezas, antes de realizar la reducción, es la de Topaipí-Altamira, con relación 60-40. En esta se obtuvo mejor comportamiento después de la reducción, ya que manifiesta mejores resultados en el grado de metalización (95,1%) e índices de basicidad de manera especial a 1000° C.

Las técnicas de análisis químico volumétrico y gravimétrico empleadas permiten hacer un pronóstico mucho más preciso en cuanto al comportamiento de la reducción, los índices de basicidad y el grado de metalización, pues se aproximan más a la realidad. Las demás técnicas empleadas son complementarias para corroborar las tendencias de fases, granos cristalinos, conformado de compuestos asociados, etc.

El efecto del carbón mineral bituminoso empleado como agente reductor fue favorable, a pesar de la presencia de azufre por debajo de 2%, ya que redujo las adiciones de caliza para desulfuración e hizo que los compuestos asociados no se incrementen, en detrimento de la composición química de las mezclas al momento de la reducción. Por otro lado, los contenidos de materia volátil y cantidades de cenizas, a pesar de estar por encima del promedio más favorable, permiten una buena reactividad, en favor de las condiciones de reducción de las mezclas de minerales por reducir.

## Referencias

Africano, H. (2005). *Obtención de pellet a partir de mineral de hierro empleando diferentes aglomerantes y carbón como agente reductor en procesos de reducción directa*. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Alcázar, J. (2011). Influencia del contenido de sílice del mineral de hierro en la resistencia al impacto del material briqueteado en caliente. *En Memorias de las IX Jornadas de Investigación 2011*, UNEXPO. Puerto Ordaz: C.V.G. Ferrominera Orinoco.

Barbis, R. (2000). Reducción de minerales de hierro (conferencia). Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Cores, A., Babich, A., Muñiz, M. y Mocho, J. (2010). The Influence of Different Iron Ores Mixtures

Composition on the Quality of Sinter. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/250161720\\_The\\_Influence\\_of\\_Different\\_Iron\\_Ores\\_Mixtures\\_Composition\\_on\\_the\\_Quality\\_of\\_Sinter](https://www.researchgate.net/publication/250161720_The_Influence_of_Different_Iron_Ores_Mixtures_Composition_on_the_Quality_of_Sinter)

Dwarapudi, S., Ghosh, T., Shankar, A., Tathavadakar, V., Bhattacharjee, D. y Venugopal, R. (2011). Effect of pellet basicity and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets. *International Journal of Mineral Processing*, 99, 43-53.

Forero P., A. y Díaz B., S. (2007). Beneficio de una magnetita para producción de pellets utilizados en procesos de reducción directa. *Scientia et Technica*, 36, 793-796.

Formoso, A. (2000). Estudio de la granulación de la mezcla de minerales de hierro en el proceso de sinterización. I parte. Granulación. *Revista Metalurgia*, 36, 244-253.

Grupo de Siderurgia UPTC (2003). *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 del Río S.A.* Tunja: Autor.

Gustafsson, G. (2013). Determination of bulk properties and fracture data for iron ore pellets using instrumented confined compression experiments. *Powder Technology*, 241, 19-27.

Macías, V., Camporredondo, J. y Soria, M. (2009). Análisis termodinámico del proceso de endurecimiento de pelet de mineral de hierro. *Prospectiva*, 7(1), 59-66.

Melgarejo, J. C. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 1-23.

Nellos, F. (2011). Automated image analysis of iron-ore pellet structure using optical microscopy. *Minerals Engineering*, 24, 1525-1531.

Przemyslaw, F. y Mróz, J. (2011). Ability for Self-Pelletization of Iron Ores and Magnetite Concentrates. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 18(6), 1-7.

Wu, S., Wang, Q, Bian, M., Zhu, J. y Long, F. (2011). Influence of Iron Ore Characteristics on FeO Formation During Sintering. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 18(5), 5-10.

Vásquez, J. (2010). *El mineral de hierro en Venezuela*. Caracas: Ministerio de Poder Popular para la Educación.

Yang, S., Zhou, M., Jiang, T., Wang, Y. y Xue, X. (2015). Effect of basicity on sintering behavior of low-titanium vanadium–titanium magnetite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25, 2087-2094.

Zhu, D., Chun, T., Pan, J. y Zhang, J. (2013). Influence of basicity and MgO content on metallurgical performances of Brazilian specularite pellets. *International Journal of Mineral Processing*, 125, 51-60.