

Evaluación de la fabricación de Pellas empleando como combustible sólido Coque Verde de Petróleo en sustitución de la Antracita en un 80% y 100%

W. Barrios^{a*}, E. Díaz^a, M. Barrera^a, G. Basanta^a

^a Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales, SIDOR, Puerto Ordaz, Venezuela.

*Autor de Correspondencia, E-mail: willianb58@gmail.com, Teléf.: +58 414 8851862

Recibido: 07-02-2022 Aceptado: 14-02-2022

Publicado: 31-03-2022

RESUMEN

El presente estudio muestra los resultados de la implementación a escala piloto del uso de coque verde de petróleo (CVP) en la fabricación de pellas a partir del mineral de hierro hematítico en la industria siderúrgica venezolana, que tiene como ventajas principales: menores costos de adquisición, disponibilidad en la región, mayor oportunidad de continuidad operativa y menor consumo de combustible. Las pruebas se diseñaron sustituyendo la antracita en 80 y 100%, manteniendo fijas el resto de las variables en el patrón de carga, como el porcentaje de dolomita, mineral de hierro y el perfil de quemado. Se evaluaron las propiedades físicas como índice de tambor (I.T), índice de abrasión (I.A) y resistencia a la compresión (R.C); y composición química y características microestructurales de las pellas, comparándose con pellas fabricadas con 100% antracita. Las propiedades físicas, químicas y microestructurales que presentan las pellas fabricadas a escala piloto con CVP cumplen con los requisitos mínimos requeridos para una pella quemada, determinándose que el coque como combustible sólido en la fabricación de pellas se comporta de manera análoga a la antracita con ligera tendencia a la disminución del índice de tambor y resistencia a la compresión, sin embargo, también se observa una tendencia que favorece el incremento del contenido de S en la pella quemada a medida que se aumenta el contenido de CVP en el patrón de carga. Microestructuralmente no se observan diferencias significativas entre pellas fabricadas con antracita o con coque.

Palabras claves: Peletización, hematita, piroconsolidación, antracita, coque.

Evaluation of the manufacture of Pellets using Green Petroleum Coke as solid fuel to replace Anthracite by 80% and 100%

ABSTRACT

This study shows the results of the pilot-scale implementation of the use of green petroleum coke (CVP) in the manufacture of pellets from hematite iron ore in the Venezuelan steel industry, which has the main advantages: lower acquisition costs, availability in the region, greater opportunity for operational continuity and lower fuel consumption. Substituting 80 and 100% for anthracite, keeping the rest of the variables in the loading pattern fixed, such as the percentage of dolomite, iron ore and the burn profile, design the tests. Physical properties such as drum index (I.T), abrasion index (I.A) and resistance to compression (R.C) were evaluated; chemical composition and microstructural characteristics of the pellets, compared to pellets made from 100% anthracite. The physical, chemical and microstructural properties presented by the pellets manufactured on a pilot scale with CVP meet the minimum requirements required for a burned pellet, determining that coke as a solid fuel in the manufacture of pellets behaves in a similar way to anthracite with slight tendency to decrease the drum index and resistance to compression, however a tendency is also observed that favors the increase of the content of S in the burned pellets as the content of CVP is increased in the loading pattern. Microstructurally, no significant differences are observed between pellets made with anthracite or coke.

Keywords: Pelletization, hematite, pyroconsolidation, anthracite, coke.

INTRODUCCIÓN

Las pellas son aglomerados de forma esférica de finos de mineral de hierro combinados con distintos aditivos que luego de un proceso de piroconsolidación se le confieren ciertas características químicas y físicas bien definidas que permiten su procesamiento en las plantas de reducción

para luego pasar a ser la materia prima en la producción de acero. Estos aditivos pueden ser dolomitas, calizas, bentonita, cal, también se puede adicionar combustible sólido, el cual tiene como función la introducción de energía térmica al proceso para el endurecimiento de la pella, proporcionando una distribución perfecta del calor

en el interior de la misma, durante la etapa de quema. Eso favorece la cinética de las reacciones de sinterización de las partículas del mineral entre sí y la formación de fases escoriificadas, contribuyendo a una mejoría en la calidad física de las pellas. Adicionalmente, también proporciona una reducción significativa del consumo de combustible o gas natural del horno [1].

Comúnmente se emplea como combustible sólido en la fabricación de pellas la antracita, sin embargo, podrían usarse otros combustibles sólidos como el coque verde de petróleo (CVP) en la fabricación de pellas, el cual tiene como ventajas principales: menores costos de adquisición, disponibilidad en la región, mayor oportunidad de continuidad operativa y menor consumo de combustible; por estas razones se realizaron pruebas a escala piloto sustituyendo parcial o totalmente la antracita por CVP para evaluar y contrastar sus propiedades químicas, físicas y microestructurales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar la evaluación del comportamiento del coque verde de petróleo (CVP) en la fabricación de pellas se adiciona al patrón de carga un 80% y 100% de CVP como combustible sólido en sustitución parcial o total de la antracita. Para ello se utilizó mineral de hierro hematítico. El procedimiento utilizado es el que se describe a continuación:

1. Secado, mezclado y homogeneización del mineral, según lo establecido en las normas COVENIN 3617:2000, “Minerales de Hierro y Productos Siderúrgicos. Métodos de Muestreo y Preparación de Muestras”; y la COVENIN 3794:2002, “Minerales de Hierro y Productos Siderúrgicos. Métodos de Muestreo y Preparación de Muestras para Ensayos Físicos”.
2. Análisis próximo a la antracita y al coque verde de petróleo (CVP): se determinó carbón fijo, material volátil y ceniza. Este se realizó con el equipo de análisis térmico

marca NETZSCH Júpiter F5, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM E1131-08, para ello la muestra es secada y luego pulverizada antes de ser calentada bajo una atmósfera inerte (N₂) hasta los 100°C, luego se mantiene una isoterma a esta temperatura por espacio de 5 minutos, esto se realiza con la finalidad de determinar el porcentaje de humedad de la muestra; al culminar este tiempo se empieza a elevar la temperatura hasta los 950°C y se realiza nuevamente una isoterma a esta temperatura bajo atmósfera inerte por 15 minutos para asegurar que el proceso de desvolatilización sea completo; transcurrido este tiempo se cambia la atmósfera inerte a una atmósfera oxidante (O₂) por 10 minutos para propiciar la combustión del material y determinar el porcentaje de carbón fijo.

3. Cálculo del patrón de carga en función del aporte calórico de la antracita para una mezcla de antracita-CVP en las siguientes proporciones:

- 20% Antracita y 80% Coque Verde de Petróleo.
- 100% Coque Verde de Petróleo.

4. Molienda del mineral de hierro y aditivos hasta obtener una fineza de 63% <45µm (Tamiz #325), esta fineza fue realizada por vía húmeda.

5. Fabricación de pellas verdes en disco peletizador a escala piloto, con lo cual se busca determinar las propiedades físicas de las pellas verdes realizando ensayos de resistencia a la compresión de pellas verdes (húmedas y secas), número de caídas, humedad de la pella y humedad de la mezcla.

6. La piroconsolidación de pellas se realizó en el Pot-Grate alcanzando temperaturas de quemado por encima de los 1250°C. A estas pellas quemadas se les realizaron los siguientes ensayos físicos:

- Resistencia a la compresión y porosidad, de acuerdo a lo establecido en la norma COVENIN 1943

“Minerales de hierro y productos siderúrgicos. Determinación de la resistencia a la compresión”.

- Índice de tambor e índice de abrasión, según la norma COVENIN 1615-1999 “Minerales de hierro y productos siderúrgicos. Ensayo de tambor y abrasión”.
- Ensayo de rompimiento de pellas, el cual consiste en la identificación y caracterización de defectos físicos en la estructura de pellas quemadas detectables a simple vista, el cual caracteriza y contabiliza pellas con núcleo compacto, núcleo fundido, núcleo sombreado y pellas magnéticas.

7. Se realizaron análisis químico a las pellas verdes y pellas quemadas fabricadas con las distintas proporciones de CVP para determinar C y S.

8. Se realizó una caracterización microestructural de las pellas con 80% y 100% de CVP y se compararon con pellas fabricadas con 100% de antracita, para esto las muestras de pellas fueron embutidas en frío y al vacío, con resina de fraguado rápido. El desbaste empleado fue un desbaste grueso y fino, y posterior pulido tanto grueso como fino, usando alúmina de 1 y de 0,3 μm . Además, se

realizó un registro fotográfico de las pellas, en microscopio óptico Nikon Eclipse 2000, con aumentos de 100X y 200X, realizando énfasis en el centro y borde de las muestras. Se usó luz paralela, y aplicación de filtros del tipo Sharpen para definición y resolución de bordes, luego se realizó el análisis cuantitativo de fases, y tamaños de poros y granos, en centro y borde de las pellas.

9. Los resultados obtenidos de los análisis químicos y ensayos físicos se compararon entre sí para determinar diferencias en las pellas fabricadas a escala piloto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1, se muestra que las partículas de la antracita (A) y del CVP (B) son irregulares lo que es conveniente, ya que esto permitirá a las partículas interconectarse a medida que se están formando las pellas y esto también permite aumentar el área superficial común, además los tamaños de granos de ambos materiales son similares, sin embargo, los granos de antracita presentan algo de relieve que le dan un aspecto rugoso lo que puede explicar la mayor cinética de reacción que posee la antracita con respecto al coque que presenta granos de aspecto más liso [2].

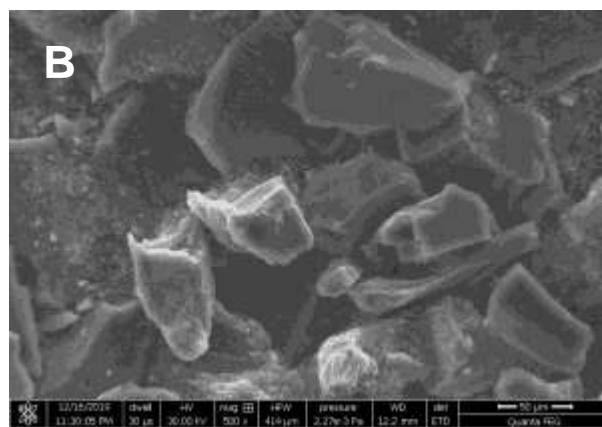
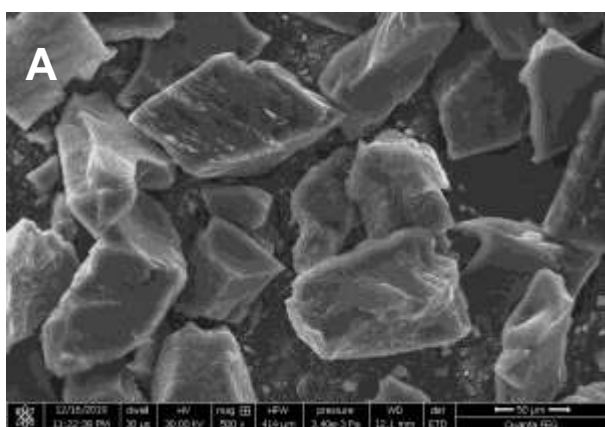


Fig. 1. Microestructura de la antracita (A) y coque verde de petróleo (B).

Los resultados obtenidos del análisis próximo de la antracita y del CVP se muestran en la tabla 1, donde se observa que debido al elevado poder calorífico del CVP

respecto a la antracita se puede estimar que la adición del CVP en menores proporciones puede suplir la energía que aporta la antracita al proceso de piroconsolidación lo que

reduce la masa de combustible sólido agregada a la pella verde.

Tabla 1. Análisis próximo de la antracita y del CVP. [2], [3]

Análisis Químico	Antracita	CVP
PC (kcal/kg)	6.382	8.131
MV (%)	7,79	12,89
CNZ (%)	14,32	5,27
C (%)	73,367	81,84
S (%)	0,615	5,38

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis próximo se estima el aporte calórico de la antracita al proceso de piroconsolidación, tal como lo expresa la tabla 2.

Tabla 2. Aporte calórico de la antracita al proceso de piroconsolidación.

Kg de Antracita	Poder Calorífico (Kcal/Kg)	Aporte Calórico (Kg)
0,780	6.382	4.977,96

En cuanto a los cálculos para determinar el aporte calórico tanto de la mezcla 20% antracita y 80% CVP, como del 100% CVP, se realizó una equivalencia calórica en función del poder calorífico que aporta la antracita y el CVP para determinar la proporción en masa que se agrega de cada uno de estos combustibles y la cantidad de S aportado en el patrón de carga de la pella verde (tabla 3).

Tabla 3. Cálculo del aporte calórico de ambos combustibles sólidos en el patrón de carga de pellas verdes.

Calor requerido (Kcal/kg)	Aporte ANT/CVP	Calor aportado Antracita	Calor aportado CVP	Aporte S (gr)
4.9977,96	20% ANT / 80% CVP Combustible (kg)	995,60	3.982,37	27,96
		0,158	0,490	
	100% CVP Combustible (kg)	0	4.977,96	32,45
		0	0,673	

El patrón de carga obtenido a partir del cálculo de equivalencias calóricas se muestra en la tabla 4 y se

contrasta con el promedio extrapolado del patrón de carga para fabricar pellas con 100% antracita, en este caso lo que más destaca es la menor cantidad de masa de combustible sólido que se emplea en la fabricación de pellas al utilizar CVP.

Para el proceso de pelletización se alcanzó una fineza en la molienda en seco del mineral de hierro y de los aditivos empleados de 63,3% <45 μm (325 mallas), con la finalidad de aumentar el área superficial de las partículas para que exista un área mayor y de mejor contacto generando así mayor unión entre las partículas y favorecer a los cristales más grandes durante la etapa final de quemado [4].

Tabla 4. Patrón de carga para fabricación de pellas PS10.

Condición	Mineral de Hierro (Kg)	Dolomita (Kg)	Antracita (Kg)	CVP (Kg)
80 % CVP	58,18	1,9	0,158	0,49
100 % CVP	58,18	1,14	0	0,673
100% Antracita	60	1,98	1,1	—

En las tablas 5 y 6, se muestran los resultados de las propiedades físicas medidas en la fabricación de pellas verdes y pellas quemadas a escala piloto con 80% y 100% CVP comparadas con pellas fabricadas con 100% antracita, demostrando que se pueden obtener propiedades físicas similares tanto en las pellas verdes como en pellas quemadas con la sustitución total o parcial de la antracita por CVP.

Tabla 5. Propiedades físicas de las pellas verdes fabricadas a escala piloto con 80% y 100% CVP.

Muestra	Res. Compresión Pella Seca	Res. Compresión Pella Húm.	N° Caídas
80 % CVP	1,58	2,57	5,3
100 % CVP	2,69	4,29	10
100% Antracita	4,22	2,05	6 mín.

Tabla 6. Propiedades físicas de las pellas quemadas fabricadas a escala piloto con 80% y 100% CVP, contrastadas con Pellas con 100 % Antracita.

Muestra	I.T (%)	I.A (%)	Por. (%)	R.C (Kg/F)
80 % CVP	94,79	3,66	22,22	299 - 338
100 % CVP	92,48	4,76	20,17	274 - 292
100% Antracita	94,70	4,95	21,75	295 - 315

Los resultados del análisis químico de la pella verde fabricada con 100% antracita se compara con los resultados obtenidos con un patrón de carga con 80% y 100% CVP, destacándose que el porcentaje de S es mayor en la pella fabricada con 100% CVP y esto se relaciona al mayor contenido de azufre que tiene el CVP (ver tabla 7).

Tabla 7. Propiedades químicas de las pellas verdes fabricadas con 80% y 100% CVP

Patrón de carga	100% Antracita	80% CVP	100% CVP
FeT (%)	—	65,73	65,54
FeO (%)	0,86	—	—
C (%)	1,130	1,030	1,020
S (ppm)	189,06	157	191

De acuerdo a los análisis químicos realizados a pellas quemadas no hay diferencias significativas en los datos comparados (ver tabla 8), sin embargo, se puede apreciar que el contenido de S es menor que en la pella verde lo que puede atribuirse a que el S enriquece los gases de combustión, favorecido por las altas temperaturas alcanzadas y a la atmósfera oxidante del proceso de piroconsolidación [3].

Durante la quema de las pellas con 80% CVP se alcanzaron temperaturas de quemado entre 1200 y 1290°C por al menos 7 minutos, observándose baja temperatura en la post-quema. Mientras que las temperaturas alcanzadas en la quema de pellas con 100% CVP fueron entre 1250 y 1300°C, además durante el proceso de piroconsolidación no se observa ningún evento anómalo [5].

Tabla 8. Propiedades químicas de pellas quemadas fabricadas con un 80% y 100% de CVP

Patrón de carga	100% Antracita	80% CVP	100% CVP
FeT (%)	66,72	65,92	65,44
FeO (%)	0,40	0,57	0,47
C (%)	—	0,007	0,005
S (ppm)	9,3	10	19
P.P.C (%)	0,06	0,07	0,08

Luego del ensayo de rompimiento de pellas se obtuvo que para la pella fabricada con 80% CVP el 80% de las pellas presentaron estructura compacta (que es lo que se busca en las pellas), mientras que un 16,67% eran pellas con núcleo sombreado (aparentemente crudas al centro) y un 3,33% pellas con núcleo incrustado, no se detectan pellas magnéticas [6]. En las pellas fabricadas con 100% CVP se obtuvo que el 23,33% de las pellas presentaron como defecto núcleos sombreados, no se detectan pellas magnéticas, por lo que se obtiene 76,67% de pellas compactas. En la figura 2, se visualiza la microestructura de las pellas fabricadas con 80 y 100% CVP, contrastadas con las pellas de 100% de antracita. Es posible observar, que las pellas con 100% de coque presentan una menor porosidad que las pellas con 80% de coque, además se puede evidenciar que en las mismas hay presencia de granos de gran tamaño rodeados por granos más pequeños, es decir, hay bi-modalidad en el tamaño de granos [7], con presencia de silicatos fundidos en las regiones cercanas a los granos de tamaño pequeño y formaciones de magnesioferrita en las regiones de granos grandes (ver figura 3), donde se observan detalles de los mismos. Estas pellas exhiben una RC de 299 kgf, similar a las pellas con 100% antracita que posee una RC de 295 kgf. También, se puede observar la microestructura de las pellas con 100% coque, donde se evidencia granos de tamaño más homogéneos que para la pella de 80% coque. En estas pellas destacan aspectos positivos que contribuyen a mejorar la RC como una alta presencia de granos de hematita, baja porosidad y alta proporción de Magnesioferrita [7, 8].

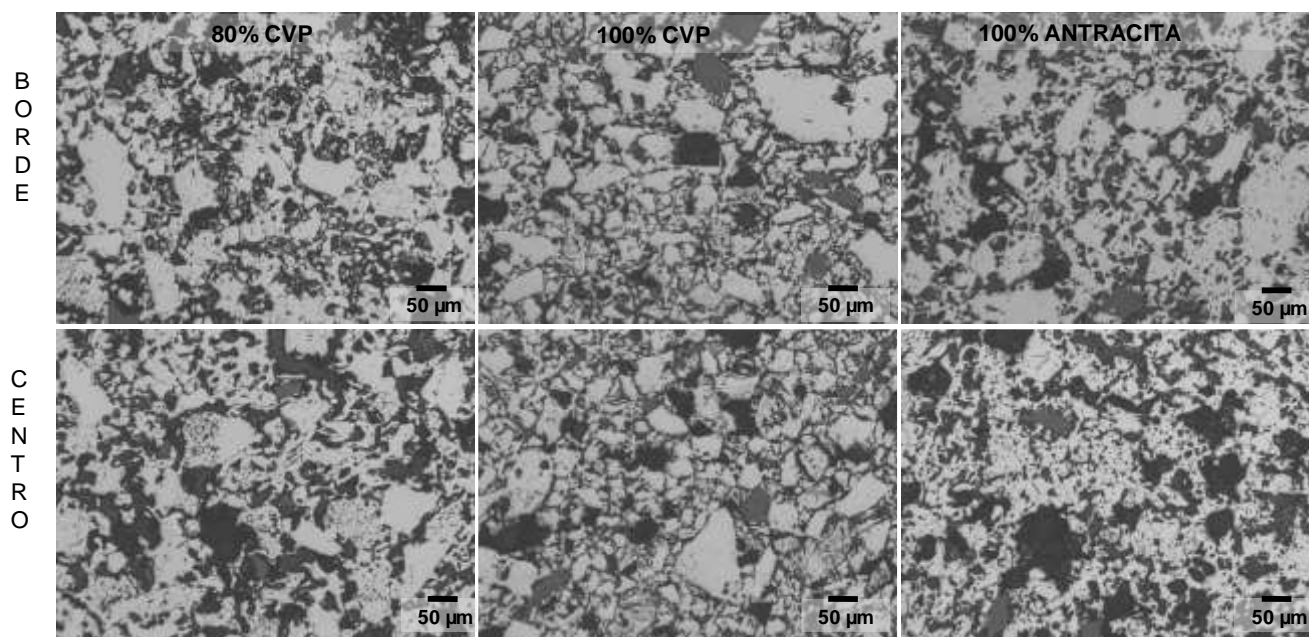


Fig. 2. Características Microestructurales de las Pellas con 80 y 100% de coque.

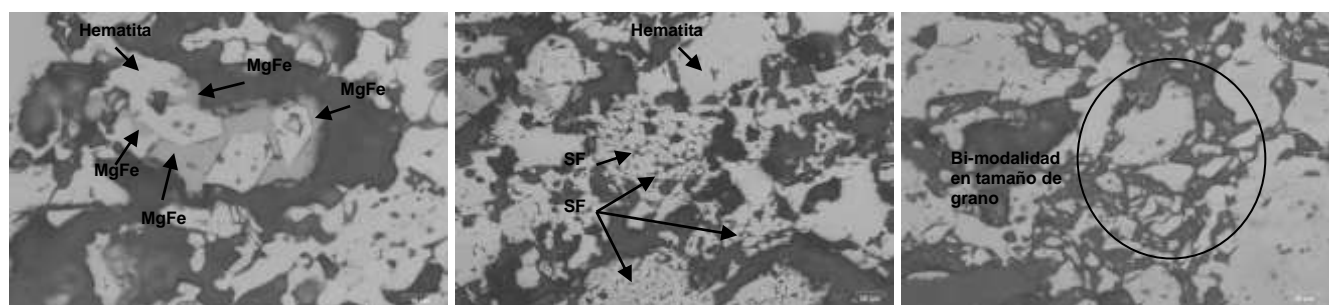


Fig. 3. Detalles de las fases microestructurales de Pellas con 80% de coque.

Los tres grupos de pellas, presentan resistencia a la compresión similar (ver tabla 9), sin una diferencia significativa marcada (≈ 4 kgf de diferencia entre los lotes); las pellas de 100% antracita presenta los mayores tamaños de granos (TG), de los que se esperaría la mayor resistencia, sin embargo, la elevada porosidad que posee contrarresta lo favorable del TG [7, 8].

La microestructura de las pellas de 80 y 100% coque son similares, aunque poseen menor TG en comparación con las pellas 100% antracita, también presentan menor porosidad y además presentan una cantidad de SF y MgFe favorables para generar una RC similar a las de 100% antracita [7, 8].

Tabla 9. Resumen de Características Microestructurales cuantitativas de las Pellas con 80 y 100 % de coque.

Composición	100% Antracita	80% CVP	100% CVP
RC	295	299	292
TG (μ^2)	2,27	2,15	2,15
TP (μ^2)	1,29	1,34	0,94
%G	40,67	44,27	46,09
%P	34,03	31,58	28,49
%SF	10,30	9,37	7,06
%GST	9,38	10,61	11,72
%MgFe	5,35	4,02	6,31

CONCLUSIONES

Las propiedades físicas, químicas y microestructurales que presentan las pellas fabricadas con 80% y 100% CVP

a escala piloto cumplen con los requisitos mínimos requeridos para los procesos de reducción.

A escala piloto se demuestra, que el coque verde de petróleo como combustible sólido en la fabricación de pellas, actúa en forma análoga a la antracita y su incremento en el patrón de carga en la pella incide en la disminución de propiedades físicas como índice de tambor y la resistencia a la compresión. Con tendencia hacia los valores mínimos de las propiedades físicas requeridas.

La adición de CVP en el patrón de carga, favorece el incremento del contenido de S en la pella quemada. En el presente estudio se destaca que la adición de un 80% CVP en el patrón de carga incrementa el contenido de S en la pella quemada en un 47% y en pellas con 100% CVP el porcentaje de S aumenta a 51% con respecto a pellas con 100% antracita.

AGRADECIMIENTO

Los autores quieren agradecer al Laboratorio de Materias Primas, Laboratorio de Planta Piloto y Simulación, Procesos de Planta de Pellas de SIDOR por el apoyo y soporte técnico prestado para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Campos A.R., Fonseca V.O. (2010) “*Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios*” (5ª Edición), Rio de Janeiro, CETEM/MCT, pp. 683-750.
- [2] Barrios W., Díaz F., Díaz E. (2020) “Evaluación del Efecto Producido por Adición de Coque Verde de Petróleo como Sustituto Parcial de la Antracita en la Fabricación de Pellas a Escala Piloto en una Proporción 40% CVP y 60% Antracita” *Informe IIMM-20-287P*, Puerto Ordaz, Venezuela.
- [3] Gorrin K. (2010) “Factibilidad de uso del Coque Verde de Petróleo (CVP) como sustituto parcial de la antracita en la fabricación de pellas a escala piloto,

para su escalamiento industrial” *Informe IM-10F-16*, Puerto Ordaz, Venezuela.

- [4] Meyer K. (1980) “*Pelletizing of Iron Ores*” Alemania, Springer-Verlag y Verlag Stableisen mbH, pp. 37-39.
- [5] Tekkalakote U., Naveen F., Sangamesh D., Pradipta M., Rameshwar S., Manjunath P. (2013) “Optimization of Firing Temperature for Hematite Pellets” *ISIJ Int.* 53:1673-1682.
- [6] Sidor. (2020) “Ensayo de Rompimiento de Pellas Quemadas” *Práctica Operativa PRAPPQ03003*, Puerto Ordaz, Venezuela.
- [7] Dwarapudi S., Devi U., Rao M., Ranjan, M. (2008) “Influence of Pellet Size on Quality and Microstructure of Iron Ore Pellets” *ISIJ Int* 48:768-776.
- [8] Srinivas D., Tamal K., Amitabh S., Vilas T., Bhattacharjee D., Venugopal R. (2011) “Effect of pellet basicity and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets” *Int J Miner Process* 99:43-53.