

Producción de briquetas de residuos de polvo de coque como combustible alternativo para la industria*

Yessica Rodríguez^a ■ Sully Segura-Peña^b ■ Julián Segura Peña^c ■ César Franco^d

Resumen: Este documento presenta los hallazgos del proyecto de briqueteado de polvo de coque en la empresa Germán Franco Carbón SAS. Se usan como materia prima, residuos de polvo de coque de siete distribuciones granulométricas distintas, y como aglutinante, almidón de maíz mezclado con agua desmineralizada. Como resultado se obtiene un polvo de coque mesoporoso que al aglomerarse con el almidón de maíz se logra una briqueta con un poder calorífico 17 % menor que el obtenido de una muestra de coque comercial, pero semejante al obtenido en un carbón térmico de alto volátil (entre 5800 y 7800 kcal/kg). Así mismo, se alcanza una temperatura de ignición de 700 °C, la cual es 90 °C mayor que la muestra de coque. En conclusión, las briquetas son una alternativa al uso de coque en procesos de combustión, tienen la ventaja de no requerir carbón para su fabricación, ya que se usa polvo residual del proceso de coquización, siendo una alternativa que contribuye a procesos de productividad sostenible.

Palabras clave: coque; combustible; aglomeración; transición energética; sostenibilidad

* Artículo de investigación.

- a** Semillero de Nuevos Materiales y Nanotecnología, Grupo GCAT, de la Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia.
Correo electrónico: yessica.rodriguez@usantoto.edu.co; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4472-6319>
- b** Grupo GCAT, Departamento de Ciencias Básicas, de la Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia.
Correo electrónico: sully.segura01@usantoto.edu.co; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3758-8229>
- c** Grupo GCAT, Departamento de Ciencias Básicas, de la Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia.
Correo electrónico: julian.segura@usantoto.edu.co; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1868-4282>
- d** Aprovechamiento Energético de los Recursos Naturales (Aprena), de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
Correo electrónico: cgfrancor@unal.edu.co; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3294-4498>

Recibido: 08/07/2024 **Aceptado:** 21/10/2024 **Disponible en línea:** 11/04/2025

Cómo citar: Rodríguez, Y., Segura-Peña, S., Segura-Peña, J., & Franco Rodríguez, C. G. (2025). Producción de briquetas de residuos de polvo de coque como combustible alternativo para la industria. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 35(1), 71–86. <https://doi.org/10.18359/rcin.7475>

Production of Briquettes from Coke Dust Waste as an Alternative Fuel for Industry

Abstract: This document presents the results of a coke dust briquetting project conducted at Germán Franco Carbón SAS. Coke dust residues from seven different granulometric distributions were used as raw material, with corn starch mixed with demineralized water serving as the binder. The briquettes produced have a calorific value approximately 17% lower than that of commercial coke. However, despite this reduction, their calorific value remains comparable to that of high-volatile thermal coal, which typically ranges from 5,800 to 7,800 kcal/kg. Additionally, the ignition temperature of the briquettes was recorded at 700 °C, which is 90 °C higher than that of the commercial coke sample. In conclusion, briquettes present a viable alternative to coke in combustion processes. A key advantage is that they can be produced using residual dust from the carbonization process, eliminating the need for additional coal. This characteristic makes briquettes a more sustainable option, contributing to environmentally friendly and efficient industrial processes.

Keywords: Coke; Fuel; Agglomeration; Energetic Transition; Sustainability

Produção de briquetes a partir de resíduos de pó de coque como combustível alternativo para a indústria

Resumo: Este documento apresenta os resultados do projeto de briquetagem de pó de coque na empresa Germán Franco Carbón SAS. Como matéria-prima, utilizam-se resíduos de pó de coque de sete distribuições granulométricas distintas, e, como aglutinante, amido de milho misturado com água desmineralizada. O resultado é um pó de coque mesoporoso que, ao ser aglomerado com o amido de milho, forma um briquete com um poder calorífico 17% inferior ao de uma amostra de coque comercial, mas semelhante ao de um carvão térmico de alto teor volátil (entre 5800 e 7800 kcal/kg). Além disso, alcança uma temperatura de ignição de 700 °C, 90 °C superior à da amostra de coque. Conclui-se que as briquetes são uma alternativa ao uso de coque em processos de combustão, com a vantagem de não requerer carvão para sua fabricação, pois utilizam pó residual do processo de coqueificação, representando uma opção que contribui para a produtividade sustentável.

Palavras-chave: coque; combustível; aglomeração; transição energética; sustentabilidade

Introducción

Para impulsar el desarrollo de nuevas tecnologías, fomentar el crecimiento económico y optimizar el uso de los recursos, la innovación, la mejora de infraestructuras y la industrialización inclusiva y sostenible desempeñan un papel fundamental. En los últimos años ha surgido la necesidad de pensar en producción sostenible, evitando la degradación medioambiental, según el objetivo 12 de los ODS de las Naciones Unidas, “Producción y consumo responsables” [1].

Actualmente, reincorporar los desechos de los procesos productivos *in situ* es clave para el reto de cero residuos o su eliminación eficaz [2]. Este artículo propone el reciclaje y reutilización de los desechos de la fabricación del coque industrial, con el objetivo de reducir la emisión de gases efecto invernadero (GEI) generados en los hornos de coquización, así como disminuir los costos y extender el espectro de materias primas para incluir combustibles no fósiles [3, 4]. De esta manera, se aporta una metodología de fabricación de briquetas innovadora, dado que se hace una caracterización completa de la materia prima, con el uso de los análisis próximos, cuya finalidad es establecer las propiedades globales del carbón, dando un estimado de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo de las muestras. Se incorporan, a su vez, las medidas como el tamaño general, el de poro y el área superficial, por el método de Brunauer, Emmett, Teller (BET), junto con el poder calorífico de las briquetas producidas. Así mismo, se presenta una caracterización completa del producto terminado, teniendo en cuenta la resistencia mecánica a temperaturas bajas y altas. Se considera que este tipo de información debería ser incluida en la hoja de seguridad del producto ofrecido al mercado. Cabe mencionar que el diseño metodológico del presente documento se refiere a una serie de pruebas realizadas una única vez, dado que estuvo enmarcado en el desarrollo de una pasantía de un estudiante durante un corto periodo de tiempo en la compañía Germán Franco Carbón SAS (GFC SAS).

En el departamento de Boyacá se encuentra ubicada una de las empresas más experimentadas

en la producción de coque, la compañía GFC SAS, ubicada en Samacá. Produce coque en dos granulometrías: de una a dos pulgadas y de dos a ocho mm. El material de menor tamaño, denominado “finos de coque”, residuo de la molienda y el cribado de coque, no representa ninguna utilidad en la industria, debido a su alto contenido de cenizas; este se almacena al aire libre y representa un riesgo para la calidad del aire, ya que puede dispersarse y contaminar el ambiente. Si es inhalado, puede ocasionar enfermedades respiratorias.

Diferentes investigaciones se han enfocado en desarrollar procesos de briqueteado de los finos de coque y de carbón, con y sin aglutinante [5-8]. Existen muchos tipos de bioaglutinantes producidos a partir de fuentes renovables, como la goma arábica, el alginato, el agar, la goma xantana, el *tall oil*, la celulosa, el glicerol, las proteínas y los almidones. Uno de los más económicos y asequibles es el almidón de maíz, el cual es un adhesivo eficiente por la combinación de su estructura amorfa y la proporción de amilosa/amilopectina que posee. Las regiones amorfas proporcionan flexibilidad y capacidad de adaptación a las superficies, mientras que la interacción específica entre amilosa y amilopectina optimiza la formación de enlaces y la resistencia del adhesivo. Al considerar estos factores químicos, se puede concluir que la estructura del almidón y la disposición de sus componentes moleculares contribuyen directamente a sus propiedades adhesivas y a su eficiencia como material de bajo costo [9].

El objetivo de esta investigación es aglomerar las partículas de coque con una granulometría inferior a 2,40 mm, utilizando almidón de maíz como aglutinante para la producción de briquetas. El proceso se inicia caracterizando, por medio de análisis próximo, siete granulometrías, junto con la determinación del área superficial. Se procede a realizar el proceso de briqueteado con almidón de maíz al 50 % de peso/peso (p/p) y agua desmineralizada al 50 % de volumen/peso (v/p), para generar briquetas en verde, es decir, con un alto contenido de humedad. Finalmente se someten a un secado a 100 °C, durante 90 min. Para determinar la calidad de las briquetas obtenidas se someten a análisis próximo, Drop Shatter Test, temperatura de ignición, poder

calorífico y análisis Coke Reactivity Index (CRI) y Coke Strength After Reaction (CSR).

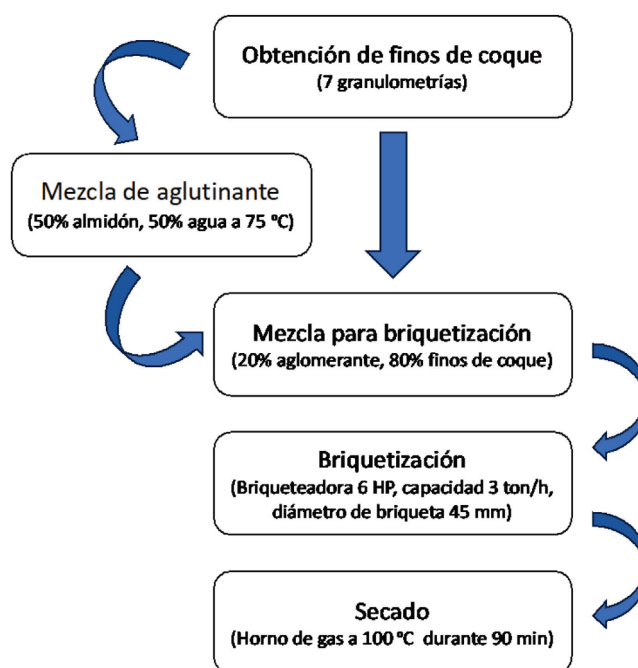
Mediante este trabajo se puede determinar que es factible obtener briquetas con características similares al coque usado como combustible en industrias como la calera, la arrocera y la cafetera. Sin embargo, no se recomienda como alternativa para reemplazar el coque metalúrgico utilizado en la fabricación de acero en alto horno, debido a que no es posible obtener una medida del índice CSR en estas briquetas, es decir, que no es apto para su

aplicación como agente reductor en el alto horno para fabricar acero.

Materiales y métodos

El proyecto se desarrolla con el empleo de finos de coque resultantes de la producción de coque en la etapa de molienda y cribado, de una granulometría menor a 2,40 mm o menor a malla No. 8, tal como se observa en la figura 1. Se usan siete granulometrías distintas descritas en la tabla 1.

Figura 1. Proceso de obtención de briquetas a partir de finos de coque



Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Granulometrías de finos de coque usadas en el proceso de briquetado

No.	Tamiz	Granulometría
1	Menor a malla No. 30	0,00 mm a 0,50 mm
2	Menor a malla No. 18	0,00 mm a 1,00 mm
3	Menor a malla No. 10	0,00 mm a 2,00 mm
4	Menor a malla No. 8	0,00 mm a 2,40 mm
5	Menor a malla No. 18, mayor a malla No. 30	0,50 mm a 1,00 mm
6	Menor a malla No. 10, mayor a malla No. 18	1,00 mm a 2,00 mm
7	Menor a malla No. 8, mayor a malla No. 10	2,00 mm a 2,40 mm

Fuente: elaboración propia.

1.1 Elaboración de briquetas

Los finos de coque se almacenan al aire libre (figura 2). Para recolectar el material necesario para las pruebas, se realiza una toma de muestra en espiral, tal como se observa en la figura 3, que consiste

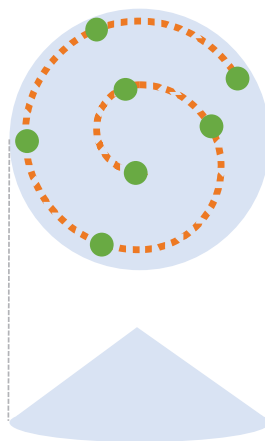
en realizar una excavación manual a lo largo de la pila, tal como explica la norma ASTM D2234 [10]. Se obtiene una muestra inicial de 300 kg y se procede al tamizaje para disminuirla a 10 kg de cada granulometría descrita en la tabla 1.

Figura 2. Fino de coque al aire libre



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Esquema de toma de muestras en una pila de carbón



Fuente: elaboración propia a partir de [10].

Para la producción de briquetas, por lo general, se emplea el almidón, ya que tiene la capacidad de formar una matriz sólida, permitiendo mantener unidos los componentes empleados. El mecanismo de adhesión del almidón se da cuando este se mezcla con agua, generando una gelificación en la cual las moléculas absorben el agua y aumentan su volumen, formando una red tridimensional que le permite actuar como aglutinante.

En la preparación del aglutinante se usa almidón de maíz (Bondstar, 08472004CE 182)

suministrado por la compañía Smartcol SAS. Así mismo, se usa agua desmineralizada, calentada a 75 °C. Las proporciones se encuentran descritas en la tabla 2. Luego de calentar el agua, se procede a mezclar con el almidón de maíz hasta que la mezcla aglutinante adquiere una consistencia homogénea. Posteriormente se añade la mezcla gradualmente a los finos de coque, hasta obtener una consistencia homogénea.

Tabla 2. Formulación de la mezcla para las briquetas

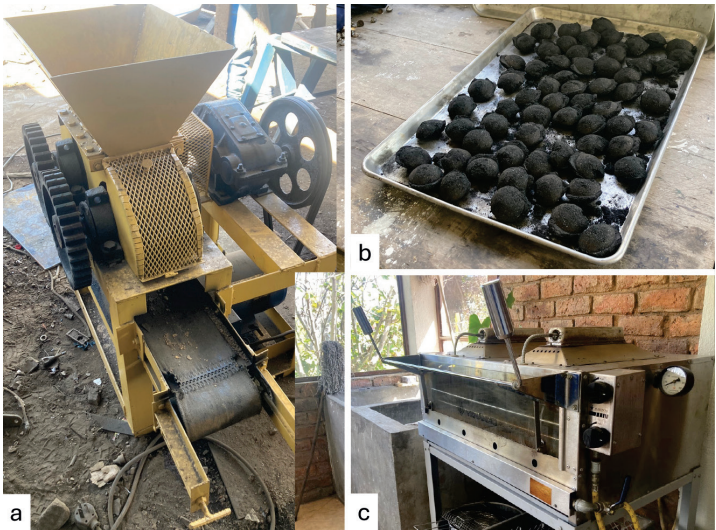
Fino de coque	8000 g
Agua desmineralizada	1000 ml
Almidón	1000 g
Total	10.000 g

Fuente: elaboración propia.

Las briquetas se fabrican en una briquetadora comercial que tiene una potencia de 6 HP y capacidad de carga de 3 ton/h (Figura 4a). La mezcla de finos de coque y aglutinante se va añadiendo a la máquina, y como resultado se obtienen briquetas en verde de 45 mm de diámetro, aproximadamente, y un peso cercano a los 23 g (figura 4b). Finalmente, luego de un tiempo de secado al

ambiente cercano a los 50 min., las briquetas en verde se llevan a un horno de gas comercial, donde se someten a una temperatura de 100 °C durante cerca de 90 min (figura 4c). La temperatura de secado se escoge debido a que solo se quiere retirar la mayor cantidad de humedad de las briquetas obtenidas y así lograr una mejor adhesión del almidón de maíz.

Figura 4. Proceso de briqueteado. a) Briquetadora. b) Briquetas. c) Horno de secado



Fuente: elaboración propia.

1.2 Evaluación de propiedades

Se utiliza el análisis próximo para determinar el contenido de humedad, material volátil y cenizas [11-13], y calcular el contenido de carbono fijo [14] de las muestras de finos de coque, las briquetas obtenidas y una muestra de coque metalúrgico comercial, como control, para comparar el cambio de propiedades en las distintas muestras. Inicialmente se toma una muestra de cerca de 10 kg, de acuerdo con la norma ASTM D2234 [10], luego se procesa según la norma ASTM D2013 [15], para obtener aproximadamente 150 g de muestra inferior a malla No. 60 (250 μ m), que se usa para obtener el análisis próximo.

Para cuantificar el porcentaje de cenizas presente en los finos de coque, se usa un crisol vacío de cerámica esmaltada, donde se pesa 1,0 g de muestra, para luego ingresarlo a una mufla a 950 °C, durante cuatro horas, de acuerdo con el protocolo de la norma ASTM D3174 [12], y luego se enfría en un desecador. Posteriormente se toma lectura del peso del crisol más la muestra y se calcula el porcentaje p/p (ecuación 1):

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{C-A}{C-B} \times 100 \quad (1)$$

A: peso después del secado

B: peso crisol vacío

C: peso crisol + muestra

El material volátil en los carbones se entiende como el porcentaje de combustible gaseoso que emana de la muestra al someterse a un rango de temperatura específico [11]. Para calcularlo se pesa 1,0 g de muestra en un crisol de cromo níquel y se lleva a un horno tipo Hoskin (horno tubular diseñado específicamente para hacer este análisis), a una temperatura de 950 °C, por siete minutos, de acuerdo con la norma ASTM D3175 [11]. Luego este se deja enfriar y se registra el peso para obtener el porcentaje p/p (ecuación 2):

$$\% \text{ Material volátil} = \frac{C-A}{C-B} \times 100 \quad (2)$$

A: peso después del secado

B: peso crisol vacío

C: peso crisol + muestra

La humedad intrínseca se obtiene al pesar un crisol de vidrio vacío con 1,0 g de muestra, la cual entra a un horno a 110 °C durante dos horas, de acuerdo con la norma ASTM D3173 [13]. El crisol se deja enfriar y se pesa para determinar el porcentaje p/p (ecuación 3):

$$\% \text{ Humedad intrínseca} = \frac{C-A}{C-B} \times 100 \quad (3)$$

A: peso después del secado

B: peso crisol vacío

C: peso crisol + muestra

Finalmente, para obtener el carbono fijo se usa la norma ASTM D3172 [14], en la que se tiene en cuenta el contenido de humedad intrínseca, material volátil y cenizas (ecuación 4):

$$\% \text{ Carbono fijo} = 1 - \% C - \% MV - \% H \quad (4)$$

C: contenido de cenizas (%)

MV: contenido de material volátil (%)

H: contenido de humedad (%)

Cabe anotar que la información alcanzada por medio del análisis próximo se puede obtener mediante un análisis termogravimétrico, sin embargo, en la industria del carbón y el coque, desde sus inicios, se usa de manera habitual el análisis próximo, dada su fácil implementación en los laboratorios de control de calidad de las empresas, y por las normas estandarizadas con las que se cuenta para hacer estos análisis.

Después se lleva a cabo el ensayo para la determinación del área superficial específica de las muestras de finos de coque. Las muestras se pesan en celdas de borosilicato de 9,0 mm de diámetro. Luego se desgasifican a 150 °C y seis Pa durante 10 horas, en un equipo Vac Prep 061. La captura de las isothermas de adsorción de nitrógeno se realiza a una temperatura de -196 °C, utilizando un equipo 3FLEXTM, en un intervalo de presión relativa (P/P01) que varía entre 0,0025 y 0,3000. Para el análisis de los datos se emplea el programa 3FLEX V.4.03, provisto por el equipo.

El análisis de poder calorífico se realiza tanto para una muestra comercial de coque como para las briquetas. Este se determina mediante una bomba calorimétrica, quemando una masa de

ácido benzoico en oxígeno. Se quema una cantidad comparable de la muestra a analizar en las mismas condiciones en el calorímetro. El valor calórico de la muestra se calcula multiplicando el aumento de temperatura corregido, ajustado para tener en cuenta los efectos del calor ajeno, por la capacidad calorífica y dividiendo el resultado por la masa de la muestra [16].

Se determina la temperatura de ignición por medio de la elevación gradual de la temperatura hasta el punto de chispa, de acuerdo con la Resolución No. 0062 de 2007 del Ideam [17]. Este análisis se realizó para una muestra de coque comercial y las briquetas preparadas en este estudio.

Asimismo, se lleva a cabo el Drop Shatter Test, un método de ensayo de rotura por caída que permite evaluar la capacidad del coque para resistir fracturas durante su manipulación en los patios de acopio y durante el tránsito hasta el consumidor. Este ensayo se realiza con una muestra de unos 5000 g y consiste en dejar caer las briquetas sobre una lámina de acero de seis mm de espesor desde una altura de 1,83 m, repitiendo el proceso cuatro veces. Luego, se pesa el material desprendido y se reporta como un porcentaje.

Finalmente, para determinar los índices CSR y CRI se toma una muestra de coque seco y se hace

reaccionar con gas CO_2 a una temperatura de 1100 ± 5 °C, durante 120 minutos. Se determinan dos índices, el de reactividad del coque (CRI, por sus siglas en inglés) y el de resistencia del coque tras la reacción (CSR, por sus siglas en inglés), utilizando el residuo de coque reaccionado [18]. Este análisis se cumple con una muestra de coque comercial y con la muestra de briquetas.

2. Resultados

2.1 Caracterización de los finos de coque

Las siete muestras de finos de coque se caracterizaron por medio del análisis próximo en base seca (tabla 3). Aunque el porcentaje de carbono fijo es predominante en todas las muestras, se observa una disminución en las muestras 5, 6 y 7, atribuible principalmente a su alto contenido de cenizas.

Así mismo, se determina el área BET, el volumen total de poro y el tamaño de poro de las siete muestras de finos de coque (tabla 4). Las muestras analizadas se clasifican como mesoporosas, según la clasificación de la IUPAC, ya que el tamaño de los poros se encuentra en el rango de 2 a 50 nm.

Tabla 3. Análisis próximo fino de coque (base seca)

No.	Granulometría	Cenizas (%)	Mat. volátil (%)	Carbono fijo (%)
1	0,00 mm a 0,50 mm	23,7	4,7	71,7
2	0,00 mm a 1,00 mm	24,5	5,5	70,0
3	0,00 mm a 2,00 mm	25,8	6,2	68,1
4	0,00 mm a 2,40 mm	27,6	5,8	66,7
5	0,50 mm a 1,00 mm	29,8	4,4	65,8
6	1,00 mm a 2,00 mm	29,4	4,9	65,7
7	2,00 mm a 2,40 mm	31,0	5,1	63,9

Fuente: elaboración propia.

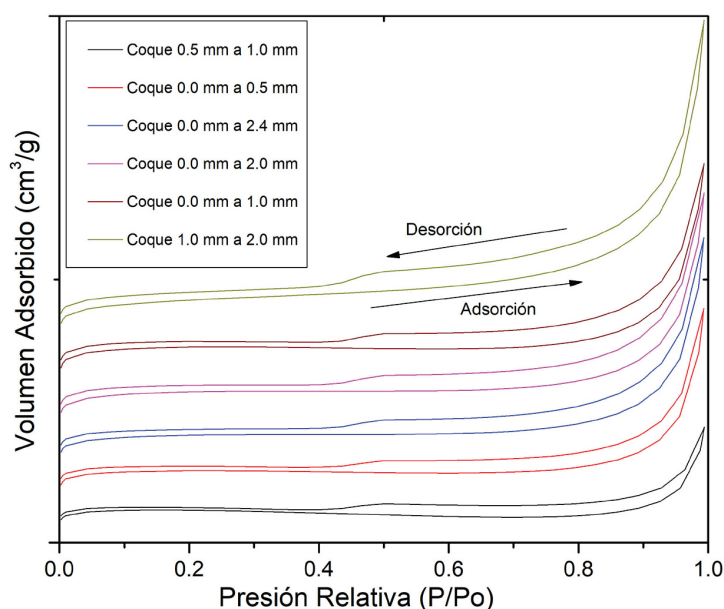
Tabla 4. Área superficial de las muestras de fino de coque

No.	Granulometría	Área BET (m ² /g)	Volumen total de poro (cm ³ /g)	Tamaño de poro-ВН (nm)
1	0,00 mm a 0,50 mm	3,8	0,0025	38,9
2	0,00 mm a 1,00 mm	5,6	0,0037	34,4
3	0,00 mm a 2,00 mm	5,0	0,0039	33,0
4	0,00 mm a 2,40 mm	4,0	0,0033	33,6
5	0,50 mm a 1,00 mm	3,3	0,0015	41,0
6	1,00 mm a 2,00 mm	4,3	0,0051	24,3

Fuente: elaboración propia.

En las isothermas (figura 5) se destaca que el polvo de coque con una granulometría entre uno y dos mm presenta la mayor capacidad de adsorción, alcanzando ocho cm³/g. En contraste, el material con una granulometría de 0,5 mm a un mm mostró

la menor capacidad, adsorbiendo aproximadamente tres cm³/g. Así mismo, en la totalidad de las muestras se presenta el fenómeno de histéresis, por lo que se consideran muestras de material mesoporoso tipo IV, de acuerdo con la clasificación de la IUPAC.

Figura 5. Isothermas de adsorción del fino de coque a diferentes granulometrías

Fuente: elaboración propia.

2.2 Caracterización de las briquetas obtenidas

Una vez finalizado el proceso de briqueteado, se realiza el análisis próximo de las briquetas obtenidas (tabla 5). Es importante destacar el aumento en el porcentaje del material volátil, atribuible a la adición de almidón de maíz como aglutinante.

Como consecuencia, se observa una disminución en el porcentaje de carbono fijo de las briquetas producidas.

Para evaluar la resistencia a la rotura de las briquetas se realiza el Drop Shatter Test (tabla 6), en el que se evidencia una buena resistencia a la rotura, en especial las muestras uno a cuatro, en las que se reportan valores menores a 2 %.

Tabla 5. Análisis próximo de las briquetas (base seca)

No.	Granulometría	Cenizas (%)	Mat. volátil (%)	Carbono fijo (%)
1	0,00 mm a 0,50 mm	25,0	12,8	62,1
2	0,00 mm a 1,00 mm	27,3	13,0	59,7
3	0,00 mm a 2,00 mm	26,8	13,5	59,7
4	0,00 mm a 2,40 mm	26,2	12,0	61,7
5	0,50 mm a 1,00 mm	24,5	12,4	63,1
6	1,00 mm a 2,00 mm	24,5	12,9	62,6
7	2,00 mm a 2,40 mm	27,0	11,5	61,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Resultados del Drop Shatter Test de las briquetas obtenidas

No.	Granulometría	Desprendimiento (%)
1	0,00 mm a 0,50 mm	1,42
2	0,00 mm a 1,00 mm	1,13
3	0,00 mm a 2,00 mm	1,21
4	0,00 mm a 2,40 mm	1,31
5	0,50 mm a 1,00 mm	3,09
6	1,00 mm a 2,00 mm	1,91
7	2,00 mm a 2,40 mm	2,01

Fuente: elaboración propia.

Como uno de los ods es reincorporar los desechos de los procesos productivos *in situ*, clave para el reto de cero residuos o su eliminación eficaz [2], la compañía determina que es necesario usar la mayor cantidad de materia prima posible (en forma de finos de coque), motivo por el cual se selecciona la muestra No. cuatro (0,00 mm a 2,40 mm), ya que es la que agrupa la mayor cantidad de materia prima (dada su distribución granulométrica), una de las de mayor contenido de carbono fijo (61,7 %), una de las que tiene mayor área BET (4,0 m²/g) y una de las que tiene menos desprendimiento (1,31 %). Por estos motivos se continúa con la caracterización de poder calorífico, temperatura

de ignición e índices CSR y CRI para las briquetas obtenidas de dicha muestra.

La tabla 7 muestra el poder calorífico en base seca de la muestra No. cuatro, y la tabla 8 presenta la temperatura de ignición obtenida para la misma muestra.

Finalmente, la tabla 9 revela los índices CSR y CRI de la muestra No. cuatro, en la que se evidencia un índice de reactividad del coque (CRI) de 33,95 %. Así mismo, se presenta un índice de resistencia del coque tras la reacción (CSR) de 0,0, debido a que no presenta granos mayores a 3/8 de pulgada, luego de someter la muestra a la rotación del tambor requerido por la norma.

Tabla 7. Poder calorífico de la muestra de briquetas No. 4 (base seca)

No.	Granulometría	Poder calorífico (Kcal/kg)
4	0,00 mm a 2,40 mm	5816

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Temperatura de ignición de la muestra de briquetas No. 4 (base seca)

No.	Granulometría	Temperatura de ignición (°C)
4	0,00 mm a 2,40 mm	700

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Índices CRI y CSR de la muestra de briquetas No. 4

No.	Granulometría	CRI (%)	CSR (%)
4	0,00 mm a 2,40 mm	33,95	0,00

Fuente: elaboración propia.

3. Discusión

3.1 Análisis de área BET de los finos de coque

De acuerdo con los diferentes resultados obtenidos en esta investigación, el área BET de los finos de coque es similar a la reportada para el coque bruto [19] y el carbón mineral [20, 21].

Sin embargo, el tamaño de poro mencionado en la bibliografía (tabla 10) es inferior al registrado para los finos de coque en la tabla 4. Además, en la tabla 4 se observa una relación directa entre el tamaño de la granulometría y el volumen total de poro. La mesoporosidad de estos materiales podría aprovecharse en actividades catalíticas y como una alternativa para materiales filtrantes [21-23].

Tabla 10. Revisión bibliográfica de áreas superficiales de otros carbones

Tipo	Área BET (m ² /g)	Volumen total de poro (cm ³ /g)	Tamaño de poro-BJH (nm)	Fuente
Coque bruto	3	0,008	10,3	[19]
Carbones comerciales	500-1200	0,2 - 1,0	0,7 - 50	[24]
Carbón mineral	3,23	0,01	298,6	[20, 21]
Carbón bituminoso	1000 - 1200		1 - 1000	[25]
Carbón lignítico	600 - 820		1 - 1000	[25]
Polvo de coque de distintas granulometrías (0,00 a 2,40 mm)	3,3 - 5,6	0,0015 - 0,0051	23,3 - 38,9	Autor

Fuente: elaboración propia a partir de [19]

3.2 Comparación de resultados entre las briquetas obtenidas y una muestra de coque comercial

Se toma una muestra de coque comercial de granulometría de una a dos pulgadas, fabricado por la empresa GFC SAS, se somete al análisis próximo y sus resultados se comparan con los de la muestra de briquetas No. cuatro (0,00 mm a 2,40 mm).

Como se observa en la tabla 11, las propiedades del coque metalúrgico son superiores a las de

las briquetas, en especial el carbono fijo, el cual es 22,2 % mayor. Este fenómeno se explica debido a que los polvos de coque tienen una concentración mayor de cenizas, que en este caso es cercana al 11 %. Sin embargo, el aumento en material volátil de las briquetas se debe a que el almidón de maíz tiene una estructura amorfa que contiene combustibles gaseosos [26, 27], por lo que en el momento del aumento de temperatura durante la medición de material volátil, este se vuelve gas y no se consolida como una estructura cristalina.

En el caso del coque, este presenta una estructura mayoritariamente cristalina, parecida a la del grafito, y un pico en el ángulo 2θ de $25,54^\circ$, sin embargo, también contiene asociaciones de FeO , Al_2O_3 y SiO_2 , por lo que el contenido de material volátil es menor que el de las briquetas [33].

El poder calorífico de la muestra de coque es un 17 % mayor a la muestra de las briquetas (tabla 12). Esto se puede explicar por la estructura misma del coque, en la que hay una mayor disponibilidad de átomos de carbono para generar el proceso de combustión.

Además, la temperatura de ignición del coque es 90°C menor que la de las briquetas (tabla 13). Es importante recordar que la temperatura de ignición es aquella en la cual se genera calor por combustión [28-30]. Dado que el coque es más reactivo en presencia de oxígeno, se espera que esta temperatura sea inferior en el coque en comparación con las briquetas.

Así mismo, se comparan los índices CSR y CRI entre la muestra de coque y las briquetas. El índice CRI es menor en el coque que en las briquetas, debido a su estructura mayoritariamente compuesta por anillos condensados de carbono [33], lo que hace que su proceso de combustión sea más lento en comparación con el de las briquetas, que presentan una mayor estructura amorfa debido a la presencia de almidón de maíz como aglutinante, como se observa la tabla 14. El coque muestra un buen índice CSR, adecuado para su uso en el alto horno como agente reductor en la fundición de acero, ya que puede soportar abrasión mecánica debido a su estructura, mientras que las briquetas presentan un índice CSR de 0,0, lo que indica que no hay presencia de estructuras mayores a $3/8$ de pulgada, resultado de la presencia de estructuras amorfas sin consolidar procedentes del aglutinante; esto se debe a que el aglutinante experimenta un proceso de combustión durante el análisis CRI y deja a los polvos de coque sin soporte mecánico que los consolide.

Tabla 11. Análisis próximo de muestras de briquetas y coque (base seca)

Tipo	Granulometría	Cenizas (%)	Mat. volátil (%)	Carbono fijo (%)
Briqueta	0,00 mm a 2,40 mm	26,2	12,0	61,7
Coque	1 a 2 pulgadas	15,1	1,0	83,9

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Análisis del poder calorífico de las muestras de briquetas y coque

Tipo	Granulometría	Poder calorífico (Kcal/kg)
Briqueta	0,00 mm a 2,40 mm	5816
Coque	1 a 2 pulgadas	6832

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Temperatura de ignición de las muestras de briquetas y coque

Tipo	Granulometría	Temperatura de ignición ($^\circ\text{C}$)
Briqueta	0,00 mm a 2,40 mm	700
Coque	1 pulgada a 2 pulgadas	610

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Análisis CSR/CRI de las muestras de briquetas y coque

Tipo	Granulometría	CRI (%)	CSR (%)
Briqueta	0,00 mm a 2,40 mm	33,95	0,00
Coque	1 pulgada a 2 pulgadas	19,28	53,47

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Briquetas sinterizadas a 500 °C

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, a modo de control, se ejecuta una prueba de sinterizado del aglutinante, ingresando cuatro briquetas a una mufla con una rampa de 12 h desde temperatura ambiente hasta 500 °C, para después apagarla y dejarla enfriar hasta el día siguiente. Como resultado se obtienen briquetas de color marrón oscuro, que se deshacen al contacto con los dedos del investigador (figura 6), demostrando así que el mecanismo de adhesión del aglutinante se debe a la gelificación de las moléculas del almidón y que al someterlo a temperaturas de sinterización esta propiedad se pierde totalmente.

4. Conclusiones

Es posible obtener briquetas a partir de finos de coque residual de la compañía GFC SAS. Así mismo,

aunque es factible obtenerlas con distintas granulometrías, en términos generales, las propiedades no cambian mucho, por lo que la granulometría que requiere menos procesos de selección es la de 0,00 mm a 2,40 mm.

Los finos de coque en sus distintas granulometrías presentan una baja área superficial BET, acorde con las reportadas en la literatura, así mismo, este material es catalogado como mesoporoso, por lo que podría tener aplicaciones catalíticas y filtrantes.

Los finos de coque, en sus diversas distribuciones granulométricas, presentan un alto contenido de cenizas y uno bajo de carbono fijo. Sin embargo, tras la fabricación de las briquetas, se observa un aumento en el contenido de material volátil debido a la adición de almidón de maíz, lo que resulta en

una disminución del contenido de carbono fijo en las briquetas.

Luego de someter a las briquetas al Drop Shatter Test, se observa que presentan alta resistencia mecánica en frío, por lo que la metodología de aglomeración está acorde con los requerimientos de manipulación y transporte de las mismas.

Así mismo, el poder calorífico de las briquetas, aunque menor en un 17 % al de las muestras de coque, es comparable con el de un carbón térmico de altos volátiles, que se encuentra en el rango de 5800 y 7800 kcal/kg [31].

La temperatura de ignición de las briquetas es 90 °C mayor en comparación con la muestra de coque, pero se encuentra en un rango de trabajo habitual en procesos de combustión.

Sin embargo, las briquetas no presentan índice CSR porque el aglutinante se combustiona durante el análisis, lo que las hace inviables para su uso como agente reductor en la fabricación de acero.

Finalmente, las briquetas presentan un índice CRI que las hace factibles para su uso en los procesos de combustión, como es el caso de la obtención de cal, el secado de arroz o de café.

Las briquetas son una alternativa al uso de coque en procesos de combustión, tienen la ventaja de no requerir carbón para su fabricación, sino que se usan polvos residuo del proceso de coquización.

5. Recomendaciones

Se recomienda explorar alternativas para disminuir el contenido de cenizas en los finos de coque, con el objetivo de obtener briquetas con un mayor carbono fijo.

También se aconseja analizar las propiedades catalíticas y filtrantes de los polvos de coque, ya que por su mesoporosidad pueden tener aplicaciones de alto valor agregado en la industria.

Se deben explorar otros aglutinantes con mecanismos diferentes de adhesión, con el objetivo de mejorar el índice CSR y así convertir a las briquetas en una alternativa al coque para la fabricación de acero en el alto horno.

Aunque el almidón de maíz es un aglutinante relativamente barato y fácil de conseguir en el mercado, al ser obtenido de un alimento de consumo humano puede competir con la seguridad alimentaria de la población, por lo que se recomienda explorar otros tipos de aglutinantes, como son los casos de la bentonita y el alquitrán.

Se invita a la comunidad científica a validar con metodologías estadísticas robustas los resultados del presente documento.

Agradecimientos

El presente proyecto fue financiado con recursos de la compañía Germán Franco Carbón SAS.

Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas (ONU), "Infraestructura - Desarrollo Sostenible." Accessed: Jul. 29, 2024. [Online]. Disponible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- [2] M. A. Díez, R. Álvarez, and J. L. G. Cimadevilla, "Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production," *Fuel*, vol. 114, pp. 216-223, Dec. 2013, doi: 10.1016/J.FUEL.2012.04.018.
- [3] M. G. Montiano, E. Díaz-Faes, and C. Barriocanal, "Effect of briquette composition and size on the quality of the resulting coke," *Fuel Processing Technology*, vol. 148, pp. 155-162, Jul. 2016, doi: 10.1016/J.FUPROC.2016.02.039.
- [4] K. Kamunur, T. Ketegenov, S. Kalugin, A. Karagulanova, and M. Zhaksibaev, "The role of the alkaline promoter on the formation of strength and burning of coal briquettes," *S Afr J Chem Eng*, vol. 42, pp. 156-161, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.SAJCE.2022.08.009.
- [5] L. Florentino-Madiedo, E. Díaz-Faes, and C. Barriocanal, "Mechanical strength of bio-coke from briquettes," *Renew Energy*, vol. 146, pp. 1717-1724, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.07.139.
- [6] M. Castro-Díaz, M. F. Vega, E. Díaz-Faes, C. Barriocanal, U. Musa, and C. Snape, "Evaluation of demineralized lignin and lignin-phenolic resin blends to produce biocoke suitable for blast furnace operation," *Fuel*, vol. 258, p. 116125, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.FUEL.2019.116125.

- [7] V. Zubkova and A. Strojwas, "Influence of briquetting on thermal behavior of bituminous coal oxidized during storage," *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 152, p. 104969, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.JAAP.2020.104969.
- [8] E. Yustanti, A. Muharman, and A. T. Mursito, "The Effect of Wood Tar and Molasses Composition on Calorific Value and Compressive Strength in Bio-coke Briquetting," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 11, no. 3, pp. 600-607, Aug. 2022, doi: 10.14710/IJRED.2022.39298.
- [9] A. Benk, A. Delibaş, and A. Çoban, "Economical biobinders and their blends suitable for the production of coal briquettes, heat insulating materials and other industrial applications," *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, vol. 42, no. 11, 2022, doi: 10.1080/19392699.2021.1974849.
- [10] ASTM International, "ASTM D2234/D2234M-20 Standard Practice for Collection of a Gross Sample of Coal," 2020. doi: 10.1520/D2234_D2234M-20.
- [11] ASTM International, "ASTM D3172-13 (Reapproved 2021) Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke," 2021. doi: 10.1520/D3172-13R21E01.
- [12] ASTM International, "ASTM D20/D2013M-21 Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis," 2021. doi: 10.1520/D2013_D2013M-21.
- [13] ASTM International, "ASTM D3175-20 Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke," pp. 1-14, 2020, doi: 10.1520/D3175-20.
- [14] ASTM International, "ASTM D3174-12 (Reapproved 2018) Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal," pp. 1-6, 2018, doi: 10.1520/D3174-12R18E01.
- [15] ASTM International, "ASTM D3173/D3173M-17a Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke," 2017. doi: 10.1520/D3173_D3173M-17a.
- [16] ASTM International, "ASTM D5865/D5865M-19 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke," 2019. doi: 10.1520/D5865_D5865M-19.
- [17] Ideam, "Resolución No. 0062. Por la cual se adoptan los protocolos de muestreo y análisis de laboratorio para la caracterización fisicoquímica de los residuos o desechos peligrosos en el país," 2007. Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Disponible: www.ideam.gov.co
- [18] ASTM International, "ASTM D3038-93 Standard Test Method for Drop Shatter Test for Coke," 2018. doi: 10.1520/D3038-93R10.
- [19] ASTM International, "ASTM D5341/D5341M-19 Standard Test Method for Measuring Coke Reactivity Index (CRI) and Coke Strength After Reaction (CSR)," pp. 1-5, 2019, doi: 10.1520/D5341_D5341M-19.
- [20] D. Rico, Y. Agámez, E. Romero, M. Á. Centeno, J. A. Odriozola, and J. de J. Díaz, "Colombian metallurgical coke as catalysts support of the direct coal liquefaction," *Fuel*, vol. 255, p. 115748, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.FUEL.2019.115748.
- [21] L. M. Uribe, M. E. López y A. G. González, "Activación de carbón mineral mediante proceso físico en horno tubular horizontal y atmósfera inerte," *Revista Colombiana de Materiales*, no. 4, pp. 25-40, Apr. 2013, doi: 10.17533/UDEA.RCM.15080.
- [22] W. González, L. D'elia, M. Valera y O. Ocanto, "Preparación de sólidos base carbono microporosos-mesoporosos a través de la activación química de coque retardado venezolano con disoluciones de NaOH," *Sociedad Venezolana de Catálisis*, vol. 8, pp. 48-54, 2019.
- [23] L. F. Cardona, M. Betancur y J. D. Martínez, "Transformación termoquímica de neumáticos usados en una sola etapa en atmósfera de CO₂ para la obtención de carbón activado y comparación con el obtenido en dos etapas," *Revista investigaciones aplicadas*, vol. 9, no. 1, pp. 57-69, 2015, doi: 10.18566/RIA.V09N01.A09.
- [24] X. Zhang, X. Tian, Y. Song, J. Wu, T. Yang, and Z. Liu, "Boosting Zn-ion storage capacity of pitch coke-based activated carbon via pre-oxidation assisted KOH activation strategy," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 333, p. 111721, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.MICROMESO.2022.111721.
- [25] ASTM International, "ASTM D6556-21 Standard Test Method for Carbon Black-Total and External Surface Area by Nitrogen Adsorption," 2021. doi: 10.1520/D6556-21.
- [26] G. Díaz-Ignacio, "Experimentación de la adsorción en un coque proveniente de una mina de carbón," Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.

- [27] E. Agama-Acevedo, E. Juárez-García, S. Evangelista-Lozano, O. L. Rosales-Reynoso y L. A. Bello-Pérez, “Características del almidón de maíz y relación con las enzimas de su biosíntesis,” *Agrociencia*, vol. 47, no. 1, pp. 1-12, 2013.
- [28] Y. Gui, F. Zou, J. Li, Y. Zhu, L. Guo, and B. Cui, “The structural and functional properties of corn starch treated with endogenous malt amylases,” *Food Hydrocoll*, vol. 117, p. 106722, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.FOODHYD.2021.106722.
- [29] C. F. Alarcón-Chisino, “Evaluación de mezclas de carbones térmicos y coquizables en procesos de combustión,” Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2017.
- [30] Y. Qin, Q. Ling, W. He, J. Hu, and X. Li, “Metallurgical Coke Combustion with Different Reactivity under Nonisothermal Conditions: A Kinetic Study,” *Materials*, vol. 15, no. 3, Feb. 2022, doi: 10.3390/MA15030987.
- [31] S. Zhao *et al.*, “Properties, combustion behavior, and kinetic triplets of coke produced by low-temperature oxidation and pyrolysis: Implications for heavy oil in-situ combustion,” *Pet Sci*, vol. 18, no. 5, pp. 1483-1491, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.PETSCI.2021.08.005.
- [32] ASTM International, “ASTM D388-23 Standard Classification of Coals by Rank,” 2023. doi: 10.1520/D0388-23.
- [33] C. Franco, A. Triana, and C. A. Guerrero-Fajardo, “Obtaining Graphene Oxide from Colombian Metcoke Using Liquid Phase Exfoliation (LPE) Method,” 2024, *Phantoms Foundation, Madrid*. doi: 10.13140/RG.2.2.17600.96007.