

Recibido: 04 / 07 / 2007, aceptado en versión final: 19 / 08 / 2007

# El coque metalúrgico aplicado a protección catódica

Metallurgia coque applied to catodic protection

Yenny Rubiela Hernández Puerto\*, María del Pilar Triviño Restrepo\*\*

## RESUMEN

El coque metalúrgico es conocido ampliamente por sus aplicaciones como agente reductor y combustible en diferentes procesos de obtención de metales. El sector dedicado a la protección contra la corrosión hace uso del coque para una aplicación con requerimientos diferentes. Comprendiendo los requerimientos de uso, evaluando la incidencia de las materias primas y de las variables de coquización e implementando luego el proceso de producción determinado, puede llegar a satisfacerse esta necesidad especializada de uso del coque.

Este trabajo tiene como objetivo determinar la conductividad eléctrica de los coques obtenidos a partir de carbones de diferente rango y la influencia que ejerce la adición de breas de carbón y de petróleo, principalmente sobre esta propiedad y sobre la textura óptica de los coques preparados.

La adición de breas afecta de forma diferente la conductividad eléctrica de los coques, dependiendo del rango del carbón, de la procedencia y proporciones del aditivo utilizado.

**Palabras clave:** Backfill, coque metalúrgico, protección catódica, resistividad eléctrica.

## ABSTRACT

The metallurgical coke has been known by its applications how reductor and fuel agent in different processes of metals obtaining. The corrosion protection sector makes use of the coke for an application with different requirements to those. Understanding the requirements, the raw incidence and the coke making variables and implementing the certain production process then, it can end up being satisfied this specialized necessity of coke use.

This paper present to determination the electrical conductivity of the cokes obtained from different range coal and the addition of coal and petroleum pitches influence, mainly over this property and the optic texture of the make cokes.

The pitches addition affects in a different way the electrical conductivity of cokes, depending on the coal range, and the origin and proportions of additives.

**Keywords:** Backfill, metallurgical coke, cathodic protection, electrical resistivity.

## I. INTRODUCCIÓN

Aproximadamente un 75% de la producción del coque del altiplano cundiboyacense colombiano, se usa en procesos de alto horno, 10% en procesos de horno eléctrico, y el 15% restante en sectores como secado de granos, carburación de baños metálicos y obtención de aglomerados para industrias nacionales o extranjeras. Este renglón productivo se ha desarro-

llado debido a la existencia en esta región de carbones coquizables variados que permiten obtener coque siderúrgico de calidad. Es poco conocida la aplicación del coque como relleno de camas anódicas en sistemas de protección catódica por corriente impresa, en donde el coque debe satisfacer requerimientos como alta conductividad eléctrica, permeabilidad a gases adecuada y estabilidad química.

El presente trabajo se desarrolló para verificar la incidencia de breas de diferente procedencia como aditivos, sobre la conductividad eléctrica de coques a partir de carbones unitarios de diferente rango.

## II. MARCO TEÓRICO

**El coque como relleno en protección catódica.** Las tuberías y estructuras metálicas usadas para transportar y almacenar agua, petróleo y otros fluidos, y distintas estructuras enterradas o en ambientes acuosos se encuentran expuestas a ambientes que contienen suficiente cantidad de iones para causar la disolución del metal que conforma la estructura. Para reducir la velocidad con que se presenta este fenómeno, se utiliza la protección catódica con ánodo de sacrificio o la protección catódica por corriente impresa. El objetivo en ambos casos es suministrar una corriente catódica que permita disminuir la velocidad de corrosión. De estos dos métodos el que recurre al uso de coque, es el sistema de protección catódica por corriente impresa, que consiste en establecer un circuito electroquímico entre un ánodo y la estructura a ser protegida, suministrando electrones al metal de la estructura desde una fuente, de tal forma que se mantiene un exceso de ellos que compensa los que se pierden por dilución en el medio. Alrededor del ánodo mencionado se coloca un relleno o “backfill”, como se muestra en la Figura 1, de algún material carbonoso previamente seleccionado.

Este relleno se utiliza con tres fines: reducir la resistencia eléctrica del suelo; formar un contorno homogéneo del ánodo y, por lo tanto, permitir una salida de corriente uniforme en la superficie disminuyendo el desgaste del ánodo. La presencia del relleno en el sistema se justifica, entonces, por la heterogeneidad en las características de los suelos o los medios que rodean las estructuras.

El coque es un material que se obtiene a partir de la pirólisis a alta temperatura del carbón. Su comportamiento y características particulares están afectados

tanto por las materias primas como por las condiciones particulares del proceso. Con respecto a las materias primas, se prefiere un mínimo contenido de ceniza, por ser inerte, que se concentra en el coque e interfiere en el crecimiento de texturas anisotrópicas. El porcentaje de azufre se limita dependiendo de las exigencias ambientales vigentes, de la misma forma que otros elementos menores como el mercurio. Con respecto al comportamiento del carbón durante la pirólisis, se determinan parámetros tales como el Índice de Hinchamiento (FSI), el comportamiento plástico (plastometría) y la capacidad de contraerse o dilatarse (dilatometría). Estas medidas son importantes para proyectar y predecir el comportamiento de un carbón bajo diferentes condiciones de proceso, así como para diseñar y/o seleccionar equipos; además son de importancia práctica para la evaluación semi-cuantitativa de los carbones y las mezclas de carbón usadas en la producción de coque de características específicas (Speight, 1994).

En cuanto a las condiciones de fabricación del coque, se controlan parámetros tales como la granulometría de las materias primas, proporciones de mezcla entre carbones de diferentes características (Gruit y Gregory, 1981), uso de aditivos, tiempo de permanencia dentro de los hornos, grado de apisonado, entre otros. El grado de control que se ejerce sobre estas variables depende de la tecnología utilizada, es decir, tipo de horno y dispositivos y mecanismos de cargue y descargue, al igual que del nivel de conocimiento que mantenga el fabricante acerca de sus materias primas y la operación de su planta; estos factores repercuten directamente en las características del coque obtenido (Krebs *et al.*, 1996), (Amamoto, 1997), (Nakagawa *et al.*, 1998), (Nomura y Arima, 2000). Dependiendo de la aplicación, se exige del coque el cumplimiento de parámetros tales como contenido de ceniza, resistencia mecánica y reactividad química a gases como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). (Pearson, 1993), (Yamaoka y Suyama, 2003), (Chakraborty *et al.*, 1998).

En la Tabla N.º 1 se presentan los requerimientos del mercado para las aplicaciones usuales del coque, como materia prima en procesos siderúrgicos y como relleno en protección catódica.

Aunque no se encuentran referencias claras sobre la incidencia de parámetros tales como resistencia mecánica, azufre y reactividad para el coque que se utiliza como relleno de camas anódicas en sistemas de protección catódica, se evalúa como parámetros de calidad su conductividad eléctrica, ya que entre más conductor sea, más eficiente su desempeño y se requerirá menor cantidad de ánodos, como se verifica en la Tabla N.º 2 (ELTECH, 2000).

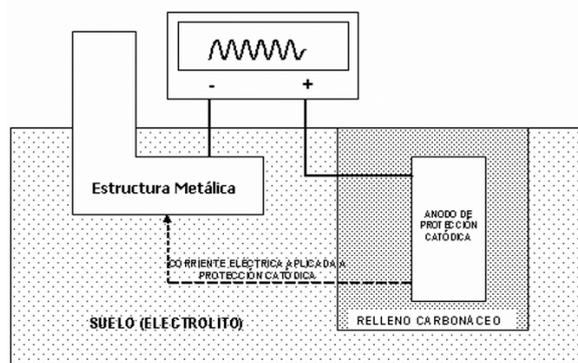


Figura N.º 1. Sistema de protección catódica por corriente impresa.

**Tabla N.º 1.** Comparación de parámetros exigidos al coque de acuerdo a su uso.

PARA USOS SIDERÚRGICOS	PARA PROTECCIÓN CATÓDICA
- Mínimo contenido de cenizas.	- Mínimo contenido de cenizas.
- Reactividad química a CO <sub>2</sub> a 1000 °C.	- No es importante la reactividad a elevadas temperaturas.
- Resistencia mecánica adecuada.	- La resistencia mecánica no se tiene en cuenta.
- Composición de cenizas, materia volátil, MICUM, CRI, CSR.	- Otros parámetros: composición de cenizas, resistividad eléctrica.

**Tabla N.º 2.** Impacto de la resistividad del backfill sobre el espaciamiento y la cantidad de ánodos requerida.

CORRIENTE	40 A			
PROFUNDIDAD ACTIVA	57 m (185 ft)			
DIÁMETRO DEL AGUJERO	20,3 cm. (8 in)			
RESISTIVIDAD DEL SUELO	5000 ohm-cm.			
DENSIDAD DE CORRIENTE DEL BACKFILL	1,61 A/m <sup>2</sup> (150mA/ft <sup>2</sup> )			
RESISTIVIDAD DEL BACKFILL (ohm- cm)	ESPACIAMIENTO DE LOS ÁNODOS		NÚMERO DE ÁNODOS REQUERIDOS	SALIDA POR ÁNODO (amps)
	m	ft		
1	11,3	37	5	8
3	11,3	37	5	8
10	7,0	23	8	5
25	4,6	15	12	3,3
50	3,0	10	18	2,3

**Tipos de relleno utilizados.** Para los sistemas de protección catódica por corriente impresa, se utilizan rellenos de tipo carbonáceo, por ser inertes y evitar que el ánodo se disuelva. Los materiales utilizados para este propósito incluyen grafito natural, coque metalúrgico y coque calcinado de petróleo. El parámetro por el cual se usan estos materiales es la baja resistividad eléctrica que ofrecen, que se encuentra en el orden de 50 Ω - cm. Además ofrecen una resistencia a la corrosión admisible, se encuentran disponibles con altos contenidos de carbono, son de bajo costo y fáciles de manipular. Algunas casas comerciales ofrecen simultáneamente coque de petróleo y coque

metalúrgico, como alternativas bajo diferentes referencias. En la Tabla N.º 3 se presentan características para coques metalúrgicos, disponibles en el mercado.

**Conductividad eléctrica en un coque.** Los materiales carbonosos naturales presentan diversos valores de resistividad eléctrica. Como se ve en la Tabla N.º 4, algunos materiales orgánicos son anisótropos. La conductividad eléctrica del carbón es explicada en parte, por la movilidad parcial de los electrones en la red estructural del carbón debido a la presencia de electrones no apareados o radicales libres; la materia mineral en el carbón puede reducir la conductividad eléctrica.

**Tabla N.º 3.** Características de coque metalúrgico para backfill de diferentes casas comerciales.

Casa comercial	% C.F	%Cz	%M.V	%H	%S	R (Ω.cm)	G (mm)	D(Kg./m <sup>3</sup> )
SSS	86 -89	10-12	1,4-1,8	0,6-1	0,6-1	50	0-1,1-5, 2-7,3-10	700 (compactado)
PROCAT	87 mín.	11,5 máx.	1,5 máx.	0,1	0,7 máx.	20 (150psi)	0,5 -4, 3 -10	700
CORRPRO	85-89	8-10	0,5	6-9	0,8	-	0,5-9,5	-
ELTECH★	70 mín.	-	-	-	-	50 (máx.)	0,1-3	-

▣ Estas son las características exigidas por ELTECH para el backfill que se debe utilizar con sus ánodos.

**Tabla N.º 4.** Resistividad eléctrica de diferentes materiales de ingeniería.

Material	Resistividad(ohm-cm)
Grafito	$(0,8-1,0) \times 10^{-3}$
Grafito	$4 \times 10^{-3}$
Antracita seca	
- Paralelo al lecho	$(7-90) \times 10^3$
- Perpendicular al lecho	$(17-34) \times 10^3$
Carbón bituminoso seco	
- Paralelo al lecho	$(0,004-360) \times 10^8$
-Perpendicular al lecho	$(3,1-530) \times 10^9$
Carbón pardo	
- 20 - 25% H <sub>2</sub> O	$10^4$
- Seco	$10^{10}-10^{13}$
Cobre	$1,7 \times 10^{-6}$
Agua (destilada)	$8,5-25 \times 10^6$

La resistividad eléctrica de los coques, a temperatura ambiente y en función de la temperatura de carbonización, disminuye muy rápidamente cuando la temperatura de carbonización aumenta entre 500 y 900 °C (en un orden de magnitud de 10 para un aumento de temperatura de 30 a 50 °C) y no tan rápidamente por encima de 1000 °C. Al considerar coques carbonizados a una misma temperatura, existe una clara influencia del carbón de partida, ya que los coques no grafitizables presentan mayor resistividad que los grafitizables. Por ejemplo, tomando la medida de una muestra pulverulenta fuertemente apisonada, coques de 1000 °C con carbones coquizables presentan resistividad de 0,012 a 0,032 ohmios-centímetro, mientras que coques de carbones de menor rango, con materia volátil de 35-38%, dan 0,025 a 0,050 ohmios-centímetro. Al recocer estos coques a 1500°C, los valores se reducen hasta 0,007 a 0,010 ohmios-centímetro para los primeros y hasta 0,010 a 0,030 ohmios-centímetro para los segundos, y alcanzan valores de 0,050 ohmios-centímetro para coques de carbones con 40% de materia volátil (Loción, 1986).

Los semicoques se comportan como semiconductores, su resistividad disminuye cuando aumenta la temperatura. Por ejemplo un semicoque de 600 °C, tiene 10 veces menos resistividad eléctrica a 400 °C que a 200 °C, y 10 veces menos a 200 °C que a temperatura ambiente. Los coques de alta temperatura se comportan como conductores metálicos, cuya resistividad aumenta un poco con la temperatura a la cual se hace la medición. A medida que se incrementa la temperatura durante la pirólisis, se incrementa la presencia de estructuras grafitoides en el coque. Por esta razón, la conductividad eléctrica en los coques está relacionada con la presencia de dichas estructuras, lo que significa que la conductividad eléctrica en los coques se debe a la deslocalización de los electrones

pi a través de las láminas atómicas hexagonales de carbono, como ocurre en el grafito.

Existe un ensayo normalizado por la American Society for Testing Materials (ASTM), para determinación de resistividad eléctrica por el método de los cuatro pines. A causa de las irregularidades existentes en la textura y de la red de fisuras de los coques, solo se pueden hacer medidas reproducibles sobre muestras granuladas o en polvo. Esta medida está influenciada por la granulometría y, sobre todo, por el apisonamiento de la muestra, porque las resistencias de contacto entre los granos influyen en la resistividad eléctrica de la muestra de coque. La humedad, aun a nivel de trazas, puede también modificar el resultado. Por esta razón, las condiciones de realización del ensayo deben ser claramente establecidas y especificadas.

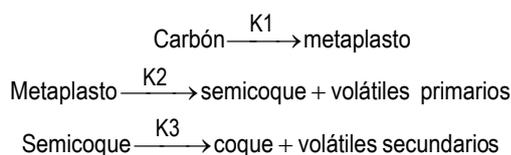
**Obtención del coque metalúrgico.** La coquización del carbón corresponde a un proceso de descomposición térmica que genera una serie de productos gaseosos, líquidos y sólidos. El rendimiento y la composición de estos productos depende de las propiedades de la materia prima y de las condiciones del proceso, especialmente de la temperatura a la que se obtengan. La pirólisis de los carbones ha sido estudiada a partir de compuestos modelo, esto es, polímeros de características previamente conocidas, sometidos a procesos controlados de pirólisis a diferentes temperaturas; también se han realizado estudios directamente con carbones. A partir de la información obtenida, se han hecho inferencias acerca de la relación entre las transformaciones químicas y físicas que se presentan en el carbón durante la coquización (Nomura, 1996).

Desde el punto de vista químico, a una temperatura ligeramente inferior a los 200 °C, predomina la eliminación de agua, óxidos de carbono y sulfuro de hidrógeno, como resultado de la descomposición térmica de los grupos térmicamente inestables. Por encima de 200 °C comienza la isomerización del carbono, evidenciada por las pequeñas cantidades de alquil-bencenos. Entre los 300 – 500 °C, comienza la descomposición térmica activa del carbón, caracterizada por el incremento en la pérdida de peso, debido a que en este rango se elimina aproximadamente el 75% de la materia volátil. La máxima evolución de material alquitranoso, hidrocarburos y gases combustibles se presenta en el rango de 450-500 °C, mientras el sulfuro de hidrógeno es eliminado entre 250-500 °C y el amoníaco a temperaturas por encima de 500 °C. Hacia los 550 °C, se completan virtualmente los cambios visibles del carbón y se obtiene un semicoque. Por encima de los 800-850°C, se completa la eliminación de materia volátil (metano, hidrógeno, y trazas de monóxido y dióxido de carbono); el semicoque mantiene sus propiedades visco-elásticas hasta 700

°C y se transforma en coque al elevar la temperatura hasta 1000 °C. Este proceso es acompañado por la eliminación de hidrógeno, el crecimiento y expansión de las lamelas aromáticas y la resolidificación del semicoque. El producto gaseoso predominante, el hidrógeno, probablemente se obtiene de las reacciones de condensación intermolecular e intramolecular de los sistemas aromáticos, que finalmente conducen a las extensas estructuras aromáticas en el coque.

Algunos autores identifican en la ocurrencia simultánea o no, de las reacciones de condensación y la primera pérdida de materia volátil, la diferencia en comportamiento entre los carbones que llegan a formar coque y los carbones que no lo forman, es decir, los carbones que presentan un rango plástico bien definido con posterior resolidificación (cambios físicos) y aquellos que solamente presentan cambios químicos (Henaó, 1982). Cuando un carbón no coquizable es calentado, se obtiene un residuo pulverulento y no compacto; en cambio, un carbón coquizable produce un residuo coherente, con grados variables de friabilidad e hinchamiento. Los cambios físicos que presentan los carbones coquizables hacen referencia al ablandamiento, fusión, hinchamiento y resolidificación dentro de un rango de temperatura característico de cada carbón, denominado "rango plástico", comprendido entre 350- 500 °C. La viscosidad y velocidad de desvolatilización de la masa plástica son tales que minimizan el hinchamiento intergranular, pero facilitan la adhesión entre las partículas vecinas de carbón. El coque así formado tiene poros bastante uniformes de diámetro pequeño, rodeados de paredes relativamente gruesas, asegurando, por lo tanto, buena resistencia a la abrasión. Este comportamiento ideal es más frecuente en los carbones de 20 a 32% de materia volátil. Los carbones cuyo contenido de materia volátil se encuentra fuera de este rango, experimentan la descomposición antes y durante el rango plástico, como se observa en la Figura N.º 2 (Speight, 1994).

La explicación cinética de los cambios soportados por el carbón durante la coquización, contempla tres etapas, mostradas en las siguientes reacciones:



donde k1, k2 y k3 son las respectivas constantes de velocidad de reacción.

En la primera reacción se presenta de-polimerización y el carbón se transforma en una fase intermedia

inestable, denominada metaplasto, que es la responsable del comportamiento plástico del carbón. Esta reacción es seguida por la transformación del metaplasto a semicoque, mediante la resolidificación, acompañada por hinchamiento, debido a la emisión de gases. Finalmente, se presenta la formación de un coque más compacto y coherente, por la pérdida de metano e hidrógeno del semicoque.

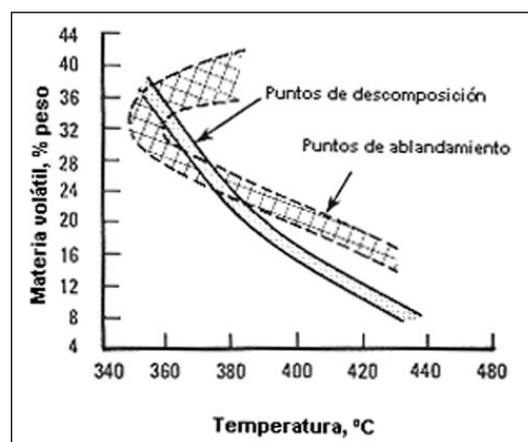


Figura N.º 2. Relación entre el contenido de materia volátil y los puntos de ablandamiento y descomposición del carbón.

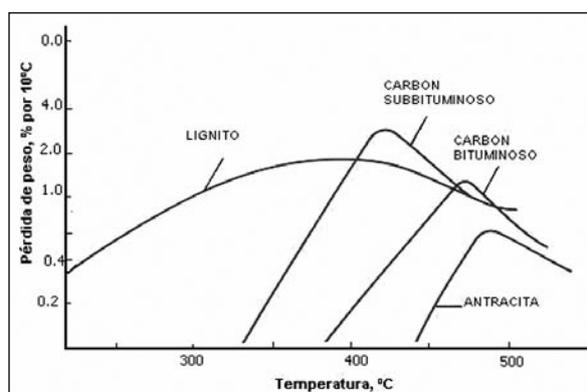


Figura N.º 3. Relación de la pérdida de peso con el calentamiento para carbones de diferente rango.

También se ha sugerido que el tipo y rendimiento de materia volátil dependen del tipo y rango del carbón, es decir, existe una relación directa entre el contenido de carbono del carbón (de la relación atómica C/H) y la magnitud, a la cual se descompone a una temperatura particular. Por ejemplo, a medida que se incrementa el contenido de carbono en un carbón, la descomposición térmica ocurre a rangos de temperatura consecutivamente mayores, y la máxima pérdida de peso disminuye sustancialmente, como se puede ver en la Figura N.º 3 (Speight, 1994).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una de las metodologías comprobadas para modificar las materias primas, es el uso de aditivos carbonosos, cuya adición se ha realizado "...con el fin de mejorar las propiedades plásticas de los carbones de bajo rango o de aquellos que no presentan buenas propiedades coquizantes" (Henaó, 1982), ya que se obtienen coques de condiciones mecánicas adecuadas, similares a las de coques a partir de carbones de mayor rango, es decir, la breña mejora la fluidez de las mezclas para la producción de coque. Este concepto resulta ser aplicable también en el caso de la conductividad eléctrica, como puede observarse en las Figuras N.ºs 6 y 7, en donde se presenta el efecto de la adición de tres cantidades diferentes de breña de carbón (b1) y breña de petróleo (b2), respectivamente, sobre la conductividad eléctrica de los coques a partir de carbones unitarios colombianos de alto rango (C1), rango medio (C2) y rango inferior (C3), cuyas características se presentan en la Tabla N.º 5.

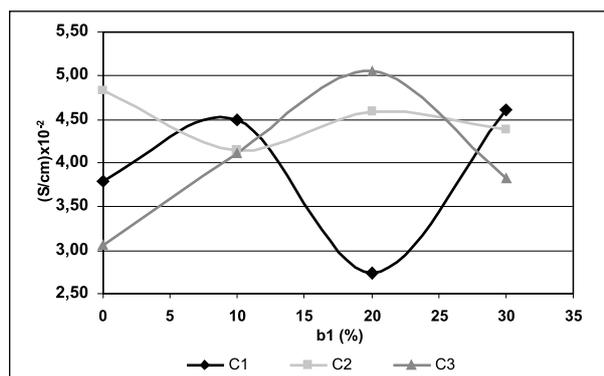


Figura N.º 4. Efecto de la adición de breña de carbón en la conductividad eléctrica de los coques, dependiendo del rango del carbón de partida.

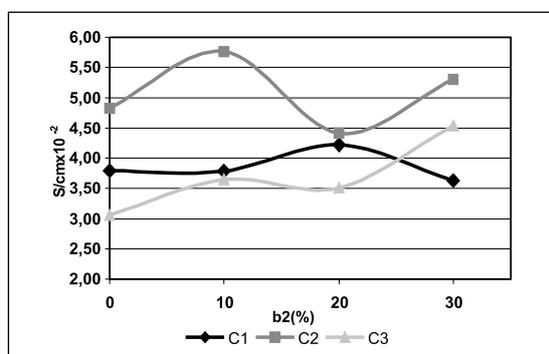


Figura N.º 5. Efecto de la adición de breña de petróleo en la conductividad eléctrica de los coques, dependiendo del rango del carbón de partida.

Tabla N.º 5. Análisis próximo y último de los carbones.

Parámetro	Carbón		
	C1	C2	C3
Humedad % w/w (ad)	1,47	1,39	2,14
Ceniza % w/w (ad)	9,58	11,26	11,17
Materia volátil % w/w (ad)	16,83	23,07	32,73
Carbón fijo	72,12	64,28	53,96
FSI	3,0	4,0	6,5
Poder calorífico BTU/lb (ad)	14140,12	14310,68	14900,06
Azufre % w/w (ad)	0,70	0,84	0,78

Como se presenta en la Figura N.º 4, las adiciones de 10 y 30% de breña de carbón aumentaron la conductividad eléctrica en los coques obtenidos a partir del carbón de mayor rango; para los coques a partir de C2, se evidencia que ninguna adición permite superar la conductividad del coque de carbón unitario; para los coques de C3, se incrementa la conductividad eléctrica con cualquier adición de esta breña, pero la más significativa es la adición del 20%. La Figura N.º 5 muestra que la adición de 20% de breña de petróleo mejora la conductividad eléctrica de los coques a partir de carbón bajo volátil; para los coques de carbón medio volátil, con adiciones de 10% y los coques de carbón de rango inferior, se requiere de adiciones de 30% de esta breña, para incrementar significativamente la conductividad, así como obtener mayor conductividad eléctrica que con el carbón unitario (Hernández, 2006).

Se observa entonces que se obtuvo el coque de mayor conductividad con carbón de medio volátil y una adición de 10% de breña de petróleo; el coque menos conductor se obtuvo con carbón de mayor rango, con adición de 20% de breña de carbón. De los coques de carbón unitario, presentó mayor conductividad el obtenido con carbón de medio volátil. Definitivamente, el carbón que se ve favorecido por la adición de cualquiera de las breñas, es el carbón de menor rango, resultados que se complementaron con el análisis de textura óptica de los coques, siguiendo los procedimientos de la Norma ASTM D 5061 y cuyos resultados se presentan en la Tabla N.º 6. La nomenclatura de identificación de los coques es la siguiente: CX1X2X3, donde:

X1 – Rango del carbón utilizado (B= bajo, M= medio y A= alto contenido de materia volátil)

x2 – Porcentaje de breña adicionado (1= 10%, 2= 20% y 3= 30%)

X3 – Tipo de brea adicionado (C= de alquitrán de carbón y P= de destilación de petróleo)

Para el carbón de mayor rango (C1), se observa en la Tabla N.º 6 que los mayores valores de conductividad eléctrica de los coques con brea de carbón (10 y 30% de brea) coinciden con una reducción en la presencia de texturas anisotrópicas circulares (Ac) y de bandas (Ab) y de material de relleno (R). El menor valor de conductividad, es decir con 20% de brea de carbón, coincide con la mayor formación de texturas isotrópicas (I) y anisotrópicas circulares y poca formación de texturas anisotrópicas lenticulares (Al). La presencia de la fase de relleno no tiene una incidencia evidente. En los casos en que se utilizó brea de petróleo, la obtención del coque más conductor, con 20% de adición, coincide con la mayor presencia de texturas anisotrópicas circulares; el coque menos conductor coincide con la mayor presencia de texturas isotrópicas y anisotrópicas de bandas.

Con el carbón de rango medio (C2), el uso de brea de carbón como aditivo no permite obtener conductividades superiores a las del coque de carbón unitario. Los componentes texturales que se reducen con la adición de esta brea son la anisotropía lenticular y la presencia de material de relleno, y se incrementa la presencia de texturas isotrópicas y anisotrópicas circulares. El coque menos conductor presenta la menor formación de anisotropía lenticular y la mayor formación de anisotropía de bandas. Con brea de pe-

tróleo, la mayor conductividad se obtiene con 10% de adición, valor que coincide con la menor formación de anisotropía circular e isotropía y la mayor formación de anisotropía lenticular. La conductividad eléctrica más baja la tienen aquellos coques que presentaron mayor presencia de isotropía, anisotropía circular y anisotropía de bandas, y menor cantidad de anisotropía lenticular y material de relleno.

El carbón de menor rango (C3) presentó, con 20% de adición de brea de carbón, el coque de mayor conductividad eléctrica, correspondiendo a la menor formación de texturas isotrópicas y presencia de fase de relleno, y con la mayor formación de anisotropía lenticular y de bandas. El coque de carbón unitario presenta, en este caso, la menor conductividad, con la mayor cantidad de textura isotrópica y de material de relleno, y la más baja formación de texturas anisotrópicas circular y de bandas. Con brea de petróleo, el coque más conductor tiene 30% de adición, correspondiendo al coque de mayor contenido de textura anisotrópica circular y menor presencia de anisotropía lenticular y de fase de relleno. En este caso también es menos conductor el coque de carbón unitario, con mayor presencia de textura isotrópica y material de relleno, y menor formación de anisotropía circular y de bandas.

Examinando la información anterior, se pone de manifiesto que la adición de cada tipo de brea afecta de forma diferente a cada rango de carbón.

Tabla N.º 6. Componentes de textura óptica de los coques

Componente Coque	I	Ac	Al	Ab	R	Conductividad (S/cm) x10 <sup>-2</sup>
CB0C	12,8	0,6	45,4	23,4	17,8	3,79
CB1C	11,4	0,0	40,8	19,8	28,0	4,50
CB2C	13,2	1,4	37,4	24,2	23,8	2,74
CB3C	13,0	0,2	55,2	14,0	17,6	4,60
CB1P	11,0	0,2	14,4	33,2	41,2	3,78
CB2P	13,2	1,8	34,4	24,2	26,4	4,22
CB3P	16,4	0,6	22,0	33,8	27,2	3,63
CM0C	9,8	0,0	58,8	2,8	28,6	4,83
CM1C	13,4	2,4	49,0	13,2	22,0	4,15
CM2C	22,4	3,6	54,2	0,0	19,8	4,59
CM3C	9,4	0,2	57,2	8,6	24,6	4,39
CM1P	9,2	0,0	60,6	12,8	17,4	5,76
CM2P	12,2	7,8	38,8	25,2	16,0	4,42
CM3P	12,0	2,8	56,8	9,6	18,8	5,30
CA0C	64,2	5,2	2,2	0,2	28,2	3,06
CA1C	47,2	32,8	1,0	0,2	18,8	4,11
CA2C	34,0	21,4	19,4	10,0	15,2	5,05
CA3C	41,2	18,0	13,2	9,6	18,0	3,82
CA1P	22,8	18,2	32,6	4,2	22,4	3,65
CA2P	11,0	10,8	42,4	10,8	25,0	3,51
CA3P	62,0	19,2	1,4	7,6	9,8	4,54

#### IV. CONCLUSIONES

En el caso de Colombia, los costos de producción del coque metalúrgico, en las condiciones actuales, representan una enorme ventaja con respecto al coque calcinado de petróleo que se importa para uso como relleno en camas anódicas de sistemas de protección catódica por corriente impresa. Se presenta como otra alternativa para el productor, el profundizar en el estudio de los parámetros e implementar un proceso que garantice la fabricación de un coque satisfactorio para esta aplicación.

Con respecto a los aditivos, se observa que la brea de carbón presenta mayor interacción con los carbones, pues al determinar la textura óptica de los coques no se observaron granos separados del coque de brea, como sí ocurrió con los coques que contenían brea de petróleo; la brea de carbón modifica la textura del coque, sin “sedimentarse”, debido a su naturaleza. La adición de cualquiera de las breas evaluadas, en las proporciones adecuadas, favorece la conductividad eléctrica de los coques, principalmente con carbones de alto contenido de materia volátil, ya que incrementa la presencia de texturas anisotrópicas. Con los carbones de mayor rango, se obtienen incrementos considerables de conductividad de los coques, con adiciones pequeñas de brea de carbón (10%).

El rango de los carbones de partida es un parámetro que afecta notoriamente la obtención de coques conductores, debido a que cada rango de carbón tiende a generar un tipo de textura en particular. Los carbones de alto rango presentan mayor formación de anisotropía de bandas; en los carbones intermedios, se presentan los mayores porcentajes de texturas anisotrópicas lenticulares, y en los carbones de menor rango predominan las texturas isotrópicas y anisotrópicas circulares.

Las texturas anisotrópicas lenticulares son las que favorecen el desarrollo de conductividad eléctrica en los coques. Esto se observa en el hecho de que el coque más conductor es el que presentó la mayor presencia de esta textura. De igual forma, el promedio más alto de conductividad eléctrica resulta ser el de los coques de carbón medio volátil, en los cuales se presenta con más frecuencia esta textura.

Sucintamente, una alternativa para optimizar la conductividad eléctrica del coque metalúrgico es el uso de aditivos que incrementen la formación de texturas anisotrópicas. La brea de carbón cumple con esta premisa. Esto sin relegar el contexto general del proceso de coquización.

#### V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amamoto, Kasuma (1997). Coke strength development in the coke oven.1. Influence of maximum

temperature and heating rate. *Fuel*. Vol. 76. N.º 1, pp. 17-21.

Amamoto, Kasuma (1997). Coke strength development in the coke oven. 2. Homogenizing the strength of coke throughout the coke oven chamber. *Fuel*. Vol. 76 N.º 2, pp. 133-136.

Chakraborty, B.; Prasad, B.N.; Ghosh, N.K. y Parthasarathy (1998). Micro-strength characteristics of high ash coke. *ISIJ International* Vol. 38, N.º 8, pp. 807-811.

Eltech Systems Corporation (2000). *Cathodic Protection Groundbed Design and Installation Guidelines*.

Gruit, A y Gregory, D.H. (1981). *Fuel*, Vol. 61, pp. 1105.

Henaó F., Luis Eduardo (1982). Estudio de la interacción de carbones y breas en la textura óptica de coques. Tesis para optar al título de Magister Scientiae. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Química. 184 pp.

Hernández P., Yenny Rubiela (2006). Influencia de breas de carbón y petróleo como aditivos en la conductividad eléctrica del coque. Informe final - Trabajo de grado. Maestría en Metalurgia y Ciencia de los Materiales. Facultad de Ingeniería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 113 pp.

Krebs, Véronique; Furdin, Guy y otros (1996). Effects of coal moisture content on carbon deposition in coke ovens. *Fuel*. Vol. 75, N.º 8, pp. 979-986.

Loción, Roger *et al.* (1986). El coque: principios de la fabricación y relación con la calidad. CERCHAR.

Nakagawa, Tomoyuki; Susuki, Takaki y otros (1998). Influence of fine particles on carbon deposition in the coke oven chamber. *Fuel*. Vol. 77, N.º 11, pp. 1141-1146.

Nomura, Seiji and Thomas K. Mark (1996). Some aspects of the generation of coking pressure during coal carbonization. *Fuel*. Vol. 75, N.º 7 p. 801 – 808.

Nomura, S., Arima, T. (2000). Coke shrinkage and coking pressure during carbonization in a coke oven. *Fuel*. Vol. 79 N.º 13, pp. 1603-1610.

Pearson, David E. (1993). *Influence of Geology on CSR (Coke Strength After Reaction with CO<sub>2</sub>)*. David E. Pearson & Associates Ltd.

Speight, James G. (1994). *The Chemistry and Technology of coal*. Marcel Dekker, Inc.

Yamaoka, Hideyuki y Suyama, Shinichi (2003). Prediction model of coke strength after gasification reaction. *ISIJ International*. Vol. 43, N.º 3, pp. 338 - 347.