

Recibido: 25 / 11 / 2007, aceptado en versión final: 19 / 12 / 2007

## Disminución del contenido de azufre en carbón mineral, mediante procesos metalúrgicos para uso industrial

Decrease the content of sulphur in coal and mineral through metalurgic processes for industrial use

**Vidal Aramburú R\***; **Pablo Núñez J\*\***; **Ángel Azañero O\*\***; **Elard León D\*\***; **Sósimo Fernández S\*\***; **Pedro Gagliuffi E\*\*\***; **Víctor Vega G \*\***; **Pilar Aviles M\*\***; **Melitón Alpaca A\*\***; **Fernando Anaya M°**; **Manuel Bejar R°**; **Laura Paredes U\*\***; **Janet Aramburú P'**

### RESUMEN

La muestra, que es materia del presente trabajo de investigación, es un carbón mineral de tipo bituminoso, procedente del Cerro Huáscar, provincia de Oyón, departamento de Lima. Proporcionado por la Compañía Coal Mine Company.

La caracterización mineralógica de la muestra de carbón arroja la presencia de los siguientes minerales: Grafito (grf) y Pirita (py). La distribución porcentual indica 96,91% de grafito y 3,09% de pirita, las partículas mayormente están libres, en consecuencia el análisis modal indica que el grado de liberación del grafito y pirita es de 100%; es decir todas las partículas contadas están libres, como se puede observar en las figuras N° 1, 2, 3 y 4. En base a la caracterización realizada se puede concluir que el azufre se encuentra en la pirita, que es el que contamina el carbón.

Se realizaron pruebas metalúrgicas preliminares de gravimetría y flotación; siendo los resultados de la gravimetría no satisfactorios. Las tres pruebas metalúrgicas del proceso de flotación más representativas indican que en el concentrado obtenido baja el porcentaje de cenizas en 62,8%, mejora el % de carbón fijo en 19,2% y se incrementa el poder calorífico en 12,2% comparado con el carbón original (cabeza); esto indica que mejora la calidad del carbón.

En cuanto a la disminución del porcentaje de azufre la mejor prueba seleccionada es la N° 3, donde baja de 2,32% a 1,37%. También se concluye que a mayor tiempo de molienda se observa que las partículas de pirita ya empiezan a levantarse en el concentrado.

**Palabras clave:** Grafito, pirita, poder calorífico, volátiles, cenizas.

### ABSTRACT

The sample that is the object of this research work is a kind of bituminous coal, from the Mount Huáscar, province of Oyón, department of Lima. Provided by the Coal Mine Company.

The mineralogical characterization of the sample coal, to show the presence of the following minerals: Graphite (grf) and Pyrite (py). The percentage distribution indicates graphite and 96.91% 3.09% pyrite, the particles are mostly free, accordingly modal analysis indicates that the degree of liberation of graphite and pyrite is 100%, that is counted all particles are free, as can be seen in the photos N.º 1, 2, 3 and 4. Based on the characterization done it can be concluded that sulfur is in the pyrite, which is the polluter coal.

\* EAP Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.  
E-mail: vidalaramburu@hotmail.com

\*\* EAP Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

\*\*\* EAP Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

° EAP Ingeniería Química, Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

´ EAP Investigación Operativa, Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Metallurgical tests were conducted preliminary gravity and flotation; being the outcome of the gravity is not satisfactory. The three tests metallurgical more representative of flotation process, concentrate obtained indicate that the low percentage of ash in 62,8% improves the percentage of fixed carbon in 19,2% and increases the calorific power at 12,2% compared with the original coal (head); this indicates that improves the quality of coal.

As for the decrease in the percentage of sulphur the best test selected is No. 3, where low of 2,32% to 1,37%. Also more time milling notes that the particles of pyrite are already beginning to rise in concentrate.

**Keywords:** Graphite, pyrite, calorific power, volatile, ash.

## I. INTRODUCCIÓN

El carbón mineral es un combustible que incluye material inerte (rocas y humedad) con más de 50% de material carbonaceo. Fue formado de material vegetal compactado, endurecido, alterado por procesos químicos y de metamorfosis con la ayuda del calor, y altas presiones durante los períodos geológicos.

En la carbonificación existen dos grandes etapas: la diagénesis, en la que tiene lugar la descomposición de la materia orgánica por las bacterias hasta formar la turba, y el metamorfismo, en el que se continúa la carbonificación por la acción del calor y la presión. Durante la diagénesis ocurren procesos de descomposición de la materia orgánica debido al ataque de las bacterias aeróbicas. Durante esta etapa se produce una reducción de volumen de hasta un 50%. Una vez que las bacterias consumen todo el oxígeno, esta etapa finaliza y comienza la descomposición de la materia orgánica restante por las bacterias anaeróbicas.

En esta etapa continúa la descomposición de la materia orgánica produciéndose ácidos húmicos, los cuales van acidificando el medio hasta llegar a un pH 4 en el cual mueren las bacterias anaeróbicas. De esta forma se forma la turba sobre la cual se van depositando más restos vegetales que a su vez forman más turba, lo que hace que la temperatura de las capas inferiores vaya aumentando comenzando las transformaciones por metamorfosis cuando la temperatura alcanza los 100 °C. Con el transcurso de miles de años, más acumulaciones de turba y sedimentos van enterrando cada vez más carbón mineral que se está formando. Debido al aumento de la temperatura y la presión, el carbón mineral va evolucionando desde el lignito hasta la antracita, liberándose gases, sustancias volátiles y aceites, y enriqueciéndose cada vez más en carbono el carbón mineral formado.

El carbón mineral en general es un insumo muy importante en la industria, porque se utiliza como combustible, reductor y forma parte del producto final. El carbón tiene muchos usos importantes, los más significativos son: Generación eléctrica, fabricación de acero, fabricación de cemento, en procesos industriales de calentamiento, etc. En el mundo en

desarrollo es también importante el uso doméstico del carbón para calefacción y cocción [1, 5].

En el Perú tenemos buenas reservas de carbón como: Alto Chicama en La Libertad, El Santa en Ancash, Jatunhuasi en Junín, Piñipata en Cajamarca, San Marcos-Huallanca en Ancash-Huánuco, Pampahuay(Oyón) en Lima, Yanacancha en Cajamarca, etc. [9].

El problema que tenemos en el Perú, es que la mayor parte de los yacimientos de carbón sobrepasa el 1,5% de azufre y no son de buena calidad; motivo por el cual importamos éste insumo.

La industria siderúrgica en la fabricación de aceros, exige como máximo que el carbón tenga 1,5% de azufre, porque si sobrepasa éste límite la pieza que se obtiene tiene problemas de fragilidad y desgaste prematuro de los refractarios. Además el contenido de azufre en el carbón formará con el oxígeno en el transcurso del proceso el  $SO_2$ , que es un gas tóxico y contaminante del medio ambiente [7]. En la fabricación de cemento el carbón es un insumo muy importante, porque forma parte del producto obtenido por el contenido de cenizas. Pero el contenido de azufre debe ser mínimo, para evitar la contaminación ambiental con la formación del  $SO_2$ .

Para definir la calidad y la aplicación del carbón mineral, se tiene que determinar cuantitativamente: porcentaje de humedad, materia volátil, cenizas, carbón fijo, azufre y poder calorífico en Kcal/Kg.

## II.METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación se basa en el diseño de pruebas experimentales a nivel de laboratorio, utilizando los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Geológica de la UNMSM.

### Objetivos

Para la mediana, pequeña minería y la industria en general que se dedican a la utilización del carbón, es importante mejorar la calidad y disminuir el porcentaje de azufre del carbón mineral que tenemos en el país, mediante procesos metalúrgicos fundamen-

talmente con el proceso de flotación, para encontrar una tecnología limpia y apropiada.

### Hipótesis

Como hipótesis se plantea encontrar procesos metalúrgicos de separación como la flotación, que disminuirá el porcentaje de azufre y mejorará la calidad del carbón mineral extraído de la mina, para su uso en la industria y, por ende, para bajar la contaminación ambiental y que la actividad del carbón sea económicamente rentable.

### Equipamiento

Equipos empleados en la investigación de los procesos metalúrgicos:

Chancadora primaria y secundaria

Molino de bolas

Celdas de flotación

Hornos mufla

Crisoles de porcelana

Estufa eléctrica

Pulverizadora

Balanza analítica

Mallas

### Análisis Microscópico de la Muestra

El análisis microscópico de la muestra de carbón, indica como resultado lo siguiente:

- La caracterización mineralógica de la muestra de carbón ha arrojado la presencia de los siguientes minerales: Grafito (grf) y pirita (py), como se puede observar en las Fig. N° 1, 2, 3y 4
- La distribución porcentual indica: grafito = 96,91% y pirita = 3,09%.
- Las partículas mayormente están libres, motivo por el cual de acuerdo al análisis modal, el grado de liberación tanto del grafito y pirita es de 100%; es decir todas las partículas contadas están libres.

### FIGURAS DE MICROSCOPIA - 100 MALLA

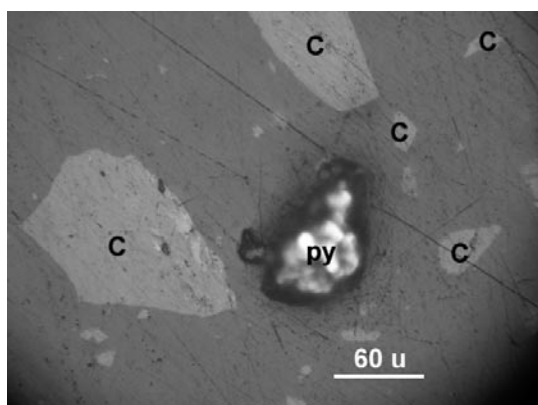


Fig. 1. Partículas libres de grafito (C) y de pirita (py). 200X.

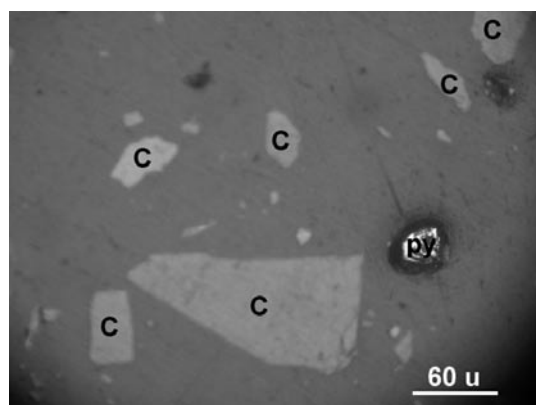


Fig. 2. Partículas libres de grafito (C) y de pirita (py). 200X.

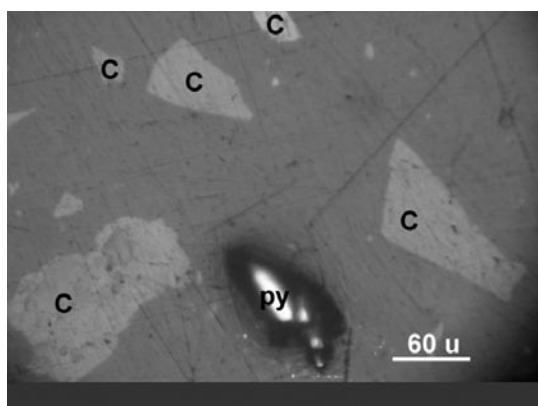


Fig. 3. Partículas libres de grafito (C) y de pirita (py). 200X.

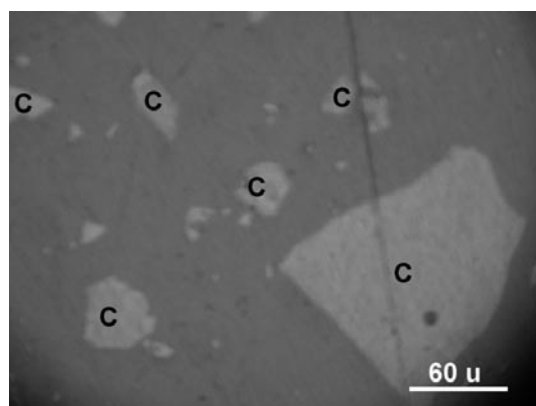


Fig. 4. Partículas libres de grafito (C). 200X.

### III. PRUEBAS EXPERIMENTALES

La muestra para las pruebas experimentales proviene del cerro Huáscar, provincia Oyón, departamento Lima; fue proporcionado por la Compañía Coal Mine Company.

Se realizó el muestreo de los mantos de carbón seleccionados entre los que se explotan, para tener una muestra representativa. La preparación de las muestras para las pruebas metalúrgicas de flotación se realizó mediante operaciones sucesivas de división de la masa y reducción del tamaño de grano, en concordancia con las normas ASTM; dicho trabajo se llevó a cabo en los laboratorios de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM [3].

El análisis microscópico confirma que el azufre se encuentra formando parte de la pirita y como el grado de liberación del grafito y pirita es 100%. Por las razones expuestas se realizó pruebas de separación

por el proceso de flotación, incrementando el pH para deprimir la pirita y como el grafito es hidrofóbico se realizó una flotación bulk, utilizando como reactivo solamente pequeñas cantidades de espumante (aceite de pino).

#### Pruebas Metalúrgicas de Flotación [2, 4, 6, 8]

##### Preparación de la muestra

La muestra es sometido a las operaciones de chancado, hasta obtener una granulometría de 100% - 10 malla

Las condiciones de la molienda son:

Peso : 500 grs  
 Agua : 750 cc  
 Tiempo : 10, 15 y 20 min.  
 R L/S : 3/2

La composición de la muestra original (cabeza) es:

**Cuadro N° 1**

% H <sub>2</sub> O	% M. Volátil	% Cenizas	% C.Fijo	P. Calorífico (Kcal/Kg)	% S
0,64	18,42	16,24	62,11	7252,17	2,32

#### Prueba N° 1

Condiciones de la prueba:

Granulometría o tamaño de partícula: 51,36 % - 200m

pH Inicial : 6  
 pH Flotación : 10  
 Densidad de pulpa : 1040 gr/lit  
 Tiempo de acondicionamiento : 5 min.  
 Tiempo de flotación : 5 min.  
 Aceite de pino(espumante) : 2 gotas

#### Resultados:

La composición del concentrado de flotación es:

**Cuadro N° 2**

% H <sub>2</sub> O	% M. Volátil	% Cenizas	% C.Fijo	P. Calorífico (Kcal/Kg)	% S	R.C
0,88	20,88	5,59	72,65	8172,10	1,47	1,63

#### Prueba N° 2

Condiciones de la prueba:

Granulometría o tamaño de partícula : 57,52 % - 200m  
 pH Inicial : 6  
 pH Flotación : 10

Densidad de pulpa	:	1040 gr/lt
Tiempo de acondicionamiento	:	5 min.
Tiempo de flotación	:	5 min.
Aceite de pino (espumante)	:	2 gotas

**Resultados:**

La composición del concentrado de flotación es:

**Cuadro N° 3**

% H <sub>2</sub> O	% M.Volátil	% Cenizas	% C.Fijo	P. Calorífico (Kcal/Kg)	% S	R.C
0,95	17,98	6,94	74,13	8047,11	1,37	1,61

**Prueba N° 3**

Condiciones de la prueba

Granulometría o tamaño de partícula	:	64,64 % - 200m
pH Inicial	:	6
pH Flotación	:	10
Densidad de pulpa	:	1040 gr/lt
Tiempo de acondicionamiento	:	5 min.
Tiempo de flotación	:	5 min.
Aceite de pino (espumante)	:	2 gotas

**Resultados:**

La composición del concentrado de flotación es:

**Cuadro N° 4**

% H <sub>2</sub> O	% M.Volátil	% Cenizas	% C.Fijo	P. Calorífico (Kcal/Kg)	% S	R.C
0,66	18,42	5,59	75,33	8191,29	1,44	1,57

**IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN**

- La microscopía de la muestra original del carbón mineral, procedente de Oyón, confirma que el mayor componente es el grafito en 96,91% y 3,09% de pirita.
- Durante las etapas de chancado y molienda, las partículas de grafito se rompen, destruyéndose preferentemente los enlaces moleculares, quedando las superficies fuertemente hidrofóbicas; esto favorece la flotabilidad natural del grafito, de tal manera que para flotar no se necesita un colector sino sólo un espumante.
- Mediante la microscopía, también se ha identificado partículas de pirita, donde se encuentra azufre.
- La muestra original que es la cabeza de la flotación tiene: 18,42% de materia volátil, 16,24% de cenizas, 62,11% de carbón fijo, 7252,17 Kcal/Kg de poder calorífico y 2,32% de azufre (cuadro N° 1).
- En las 3 pruebas de flotación, se ha mantenido las mismas condiciones de operación, variando la granulometría o tamaño de partícula.
- Si comparamos el concentrado de las 3 pruebas (cuadros N° 2, 3 y 4) con la cabeza (cuadro N° 1), podemos mencionar que el % de cenizas baja en 62,8%, mejora el % de carbón fijo en 19,2%, se incrementa el poder calorífico en 12,2%. En consecuencia, mejora la calidad del carbón original.

- El porcentaje de azufre en el concentrado de la primera prueba (cuadro N° 2) baja de 2,32% a 1,47%, en la segunda prueba (cuadro N° 3) a 1,37% y en la tercera prueba (cuadro N° 4) a 1,44%. Indica que a mayor molienda, las partículas de pirita ya empiezan a levantarse al concentrado.

## V. CONCLUSIONES

- La muestra que es materia de investigación es un carbón mineral de tipo bituminoso, compuesto de grafito y pirita.
- La mejor prueba seleccionada a nivel de laboratorio es la N° 2 (cuadro N° 3), donde el porcentaje de azufre baja a 1,37 en 40,95% y el poder calorífico mejora de 7252,17 a 8047,11 Kcal / Kg.
- En las 3 pruebas experimentales, el porcentaje de azufre en el concentrado llega al rango que exige la industria, minimizando la contaminación ambiental, evitando la fragilidad de las piezas en la siderurgia y alargando el tiempo de vida de los refractarios.
- Es necesario realizar pruebas metalúrgicas con diferentes tipos de carbones de mineral de otros yacimientos, variando el pH y la densidad de pulpa.
- La aplicación del presente trabajo de investigación hará posible que muchos yacimientos que hay en el país sean explotados, reduciendo de esa manera la importación y creando nuevas fuentes de trabajo.

## VI. AGRADECIMIENTO

Al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica; al Consejo Superior de Investigaciones; a la Dirección y Coordinación de la Escuela Académica

Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM. Finalmente a los profesores y alumnos que han colaborado en el desarrollo del Proyecto de Investigación N° 071601091.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Díaz Chávez, Álvaro; Barraza, Juan M. y Write Hernández, Álvaro (1998). Beneficio de los carbones de las industrias y las carboeléctricas del valle del Cauca y Cauca. En: Memorias IV Congreso Nacional y II Internacional en Ciencia y Tecnología del Carbón. Paipa (Boyacá), Colombia Mayo 19-22 de 1998; pp. 147-160.
2. Kawatra, S.K. and Eisele, T.C. (1988). Studies relating to removal of pyritic sulphur from coal by column flotation, in column, ed. K.V.S. Sastry, SME. Littleton.
3. Geer, M.R. and Yancey H.F. (1985). Evaluation of washery performance, U.S. Bureau of Mines, Report of investigation 8093.
4. Seitz, R.A. and Kawatra, S.K. (1987). Fundamentals of fine coal processing, Paper N° 8 – 7, SME Annual Meeting, Denver, Colorado, February.
5. Maradonne, C.P. and Killmeyer, R.P. (1988). Fine coal beneficiation via heavy-liquid cycloning.
6. Leja, J. (1983). Surface Chemistry of Froth Flotation, University of Columbia, Plenum Press, 1983.
7. Zegarra, Siancas J. (1986). Técnica de mezcla de carbón para la elaboración de coque metalúrgico, Lima.
8. Klassen, V.I.; Mokrousov, V.A. (1963). An Introduction to the Theory of Flotation, Butterworths.
9. Osorio, Avilés A. (1991). Estudio General del Carbón Mineral en el Perú, Lima.