

Evaluation of parameters to determine the degree of coal dust explosibility

Elkin Casas Herrera ^a, Astrid Blandón Montes ^b & Jorge Martin Molina Escobar ^c

^a Ing. Geólogo, edcasas@unal.edu.co

^b Ph.D.-Universidad Nacional de Colombia- Medellín, asblando@unal.edu.co

^c Ph.D.-Universidad Nacional de Colombia- Medellín, jmmolina@unal.edu.co

Recibido para revisar: 16-Junio-2014. Aceptado: 17-October-2014. Versión final: 04-Noviembre-2014.

ABSTRACT

Coal dust is highly explosive and caused dozens of victims in Colombia. In this research the most important and direct influence on coal dust, especially those that cause combustion and explosion inside the mine factors were analyzed; is important to discuss the characteristics of each coal mined and processed, for actions that do not compromise the integrity of the staff or facilities. Four (4) channel samples of coal exploitation faces with High Volatile Bituminous C from Cerrejón Formation were collected and analyzed: Proximal (moisture, ash, volatile matter, fixed carbon, total sulfur and calorific value); petrographic (maceral counting and vitrinite reflectance) and Hardgrove mill index. The samples were crushed to obtain fractions corresponding to meshes 200, 270 and 325 considering those sizes could give greater risks of explosion.

The analysis showed that there is a direct relationship between the results of the Hardgrove mill index and the degree of explosiveness in the fraction corresponding to 200 mesh, meaning that a higher rate of milling the greater the degree of explosiveness; a direct relationship between calorific inertinite content range and also observed. The 325 mesh fraction for all samples showed the same degree of explosiveness, which indicates that the grain size and the type of coal maceral not influence the content and coal rank. The flash point decreased for finer grains for all samples. Thus, the size of carbon particle is very important as an indicator in the coal-dust explosion factor: finer particles have greater the likelihood of explosion. The percentage of inertinites has a close relationship with the explosivity index, the higher the content of this maceral, coupled with the fine grain, coal dust behaves like a highly explosive element and generate risks in mining operations.

Coal rank is an important factor regard to self combustion and explosion of particles with grain sizes greater 200 mesh. If a low rank coal has susceptible and unstable at high temperature elements and this is combined with high volatile matter and some other influential environmental parameters, such as blow air, dust concentration, humidity, and pressure, among others, the ideal combustion and then a likely violent explosion may affect a large portion of mine.

Keywords: coal dust explosion, combustion analysis.

Evaluación de parámetros para determinar el grado de explosividad del polvo de carbón

RESUMEN

El polvo de carbón es altamente explosivo y ha provocado decenas de víctimas en Colombia. En esta investigación se analizaron los factores más importantes y con influencia directa sobre el polvo de carbón, principalmente aquellos que ocasionan combustión y explosividad al interior de la mina; es importante discutir las características de cada carbón extraído y procesado, para realizar acciones que no comprometan la integridad del personal ni de las instalaciones. Cuatro (4) muestras de canal fueron tomadas en frentes de explotación de carbones Bituminosos Altos en Volátiles C de la Formación Cerrejón, y se analizaron: Próximos completos (humedad, ceniza, materia volátil, carbono fijo, azufre total y poder calorífico); petrográficos (conteo maceral y determinación de la reflectancia de la vitrinita) y el índice de molienda hardgrove. Las muestras se trituraron para obtener fracciones correspondientes a mallas 200, 270 y 325 por considerar que estos tamaños de grano son los que podrían presentar mayores riesgos de explosión, y a ellos se les realizaron ensayos de puntos de ignición y de explosividad.

Los análisis mostraron que existe una relación directa entre los resultados del índice de molienda hardgrove y el grado de explosividad en la fracción correspondiente a la malla 200, o sea que a mayor índice de molienda será mayor el grado de explosividad; también se observó una relación directa entre poder calorífico, rango y contenido de inertinita. En la fracción correspondiente a la malla 325 todas las muestras presentan el mismo grado de explosividad, lo cual indica que para este tamaño de grano y para este tipo de carbón no influyen el contenido

maceral ni el rango del carbón. Los puntos de ignición disminuyen en la medida que se hacen más finos los granos, y se comportan igual en todas las muestras granulométricas. Así, el tamaño de la partícula de carbón es un factor muy importante como indicador en la explosividad del polvo de carbón. Es decir que a partículas más finas, mayor es la probabilidad de explosividad. El porcentaje de inertinitas presenta una relación estrecha con el índice de explosividad, a mayor contenido de este maceral, sumado a la granulometría fina, el polvo de carbón se comporta como un elemento altamente explosivo y generar riesgos en las operaciones mineras.

La madurez del carbón es un factor importante con respecto a la auto combustión y a la explosividad de partículas con tamaños de grano mayores a malla 200. Si un carbón de bajo rango presenta elementos susceptibles e inestables a altas temperaturas y ello se combina con alto contenido de materia volátil y algunos otros parámetros influyentes del ambiente, tales como corrientes de aire, concentración del polvo, humedad, y presión, entre otros, se crea un entorno ideal para la combustión y luego una posible explosión violenta que afectará una gran porción de la mina.

Palabras claves: polvo de carbón, explosividad, combustión, análisis.

1. INTRODUCCIÓN

El Comité Internacional de Petrografía del Carbón define al carbón como: "Una roca sedimentaria combustible formada de restos vegetales en varios estados de preservación y afectada por una serie de procesos, que involucran la compactación del material enterrado en cuencas inicialmente de poca profundidad".

El carbón se puede considerar como el combustible fósil más abundante, seguro, de abastecimiento garantizado, limpio y económico y por lo tanto en estos momentos se estima como la mayor fuente de energía fósil utilizada en todo el planeta. Esta roca está constituida de componentes orgánicos (macerales) e inorgánicos (minerales).

1.1. Componentes orgánicos

El Carbón está constituido por una serie de grupos macerales los cuales son en primera instancia: vitrinita, liptinita e inertinita; diferenciados por sus propias características de reflectancia, tamaño, color y relieve. Así, cada grupo principal posee una subdivisión, de acuerdo con las características físicas visibles microscópicamente. Tabla 1.1.

1.2. Clasificación del carbón

El rango del carbón es el grado que alcanza el carbón dentro del proceso de carbonificación o maduración de la materia orgánica. Se consideran parámetros químicos (% humedad, % de materias volátiles, % de carbono fijo y poder calorífico) y físicos (reflectancia de la vitrinita y fluorescencia de las liptinitas). A partir de estas condiciones se puede clasificar en turba, lignito, sub-bituminoso, bituminoso y antracita de menor a mayor rango. (Tabla 1.2).

1.3. Combustión del carbón

Cuando el carbón está a la intemperie sufre deterioro en su estructura debido a la humedad presente en el ambiente, y a la oxidación producto del flujo de oxígeno a través de sus poros. Esta degradación del carbón influye sobre la temperatura de la pila a medida que el proceso de oxidación aumenta, al punto de provocar variaciones contrarias en los parámetros del carbón. Mientras se incrementan peso,

contenido de oxígeno y temperatura de ignición, disminuyen contenido de hidrógeno, poder calorífico y el tamaño medio de las partículas. La evolución de este fenómeno depende de la velocidad en el proceso de absorción de oxígeno en la superficie del carbón y de la cantidad de aire que circula, de tal modo que sea suficiente para aportar el oxígeno, pero deficiente para disipar el calor generado por el proceso de oxidación, dando lugar a una acumulación de energía que aumenta progresivamente.

Tabla 1.1. Macerales del grupo de la vitrinita, la liptinita y la inertinita, (ICCP, 1994)

GRUPO	SUBGRUPO	MACERAL
Vitrinita	Telovitrinita	Telinita
		Colotelinita
	Detrovitrinita	Vitrodetrinita
		Colodetrinita
	Gelovitrinita	Corpogelinita
		Gelinita
Liptinita	Esporinita	Tenuesporinita
		Crassiesporinita
		Microesporinita
		Macroesporinita
	Cutininita	
	Resinita	
	Alginita	Pila -alginita
		Reinchia-alginita
	Liptodetrinita	
	Fluorinita	
Bitumininita		
Exsudatinita		
Suberinita		
Inertinita	Macerales con estructura celular de plantas	Fusinita
		Semifusinita
		Funginita
	Macerales sin estructura celular de plantas	Secretinita
		Micrinita
		Macrinita
Inertinita fragmentada	Inertodetrinita	

Tabla 1.2. Etapas de carbonificación, ASTM

RANGO	REFL. Rm	M.V. %SLCz	CARBONO %SLCz	HUMEDAD DE EQUILIBRIO	PODER CALORIFICO CAL/gr	APLICABILIDAD DE LOS DIFERENTES PARAMETROS
TURBA	0.2					
LIGNITO	0.3		60	75		
	0.4			35	4000	
	0.5		71	25	5500	
SUB-BITUMOSO B	0.6			6 - 10	7000	CARBONO (SLCz)
	0.7		77			
C	0.8					
B	1.0					
A	1.2					
BITUMINOSO MEDIO VOLATIL	1.4		87		8560	
	1.6					
BITUMINOSO BAJO VOLATIL	1.8					
	2.0					
SEMI ANTRACITA	3.0					
ANTRACITA	4.0		91		8650	
META-ANT.						

El contacto del aire con el carbón implica presencia de oxígeno, y al ser este elemento el mejor oxidante, se inicia la reacción química de transformación del carbono en CO₂, liberando energía en forma de calor:



Durante este proceso la velocidad de oxidación del carbón aumenta con la temperatura, el tamaño de las partículas y la concentración de oxígeno, hasta aumentar gradualmente el desprendimiento de calor y se acumule en forma crítica en la mina, supere la temperatura de inflamación y provoque la combustión. Este fenómeno se denomina combustión espontánea del carbón.

1.4. Explosión de polvo de carbón

La presencia de polvo de carbón en cantidad significativa y de gases tales como el metano en el curso de las operaciones mineras, generan un grave peligro de explosión ante la fuente de ignición en la cual se constituye la alta temperatura producida por la oxidación del carbón ya referida.

Una vez se produce la explosión y debido a la onda de presión resultante, la explosión se desplaza a través del medio en el cual se encuentra. El polvo de carbón disperso y depositado en paredes, pisos y techos de las galerías, se suspende debido a la turbulencia generada por la energía de este evento, hasta provocar la aceleración de la llama; y esta a su vez, aumentará la violencia de la explosión.

1.5. Influencia de los parámetros nube de polvo en la explosión de polvo

A continuación se describe la forma cómo se estudió el efecto de los factores más importantes y con influencia directa sobre el polvo de carbón, y los cuales ocasionan combustión y explosividad al interior de la mina. Los parámetros considerados son: tamaño de partículas, nube y

concentración de polvo, y contenido de volátiles en las características de propagación de una explosión de polvo de carbón.

1.5.1. Tamaño de partículas en una explosión de polvo de carbón

El proceso de explosión, es dominado por el ritmo de la desgasificación y la combustión de la superficie de las partículas de polvo de carbón. Si se tiene en cuenta que las partículas de tamaños finos tienen mayor área específica, tasa de desgasificación, y reacción de la superficie que en el caso de una nube de polvo de carbón grueso, su proceso de combustión y explosión se desarrollará más rápido. Sin embargo, la influencia del tamaño de las partículas en la explosión de polvo de carbón se ve afectado por la concentración de este. A medida que aumenta la concentración de polvo, la influencia del tamaño de las partículas en el proceso de explosión disminuye, a tal punto que cuando la concentración es superior a cierto límite, la sobrepresión de explosión de la nube de polvo de carbón fino es muy similar a la de la nube de polvo de carbón grueso.

1.5.2. Influencia de la concentración de polvo en una explosión de polvo de carbon

Claramente, la concentración de partículas de polvo de carbón tiene un efecto significativo en su explosión, ya que ella no se puede propagar si la concentración de partículas es muy baja. Con la creciente concentración de polvo de carbón, la sobrepresión de explosión va en aumento y con una óptima concentración, el exceso de presión alcanza su valor máximo. A medida que la concentración se incrementa después de alcanzar el límite máximo para generar una mayor explosión, la presión disminuye gradualmente.

Las características de la explosión de polvo de carbón se diferencian visiblemente de las de una explosión de gas. Las variaciones en la sobrepresión de explosión con la distancia de propagación de polvo de carbón / aire están ligadas a la concentración ideal del material particulado presente en el ambiente.

1.5.3. Influencia del contenido de volátiles del carbón en el proceso de explosión

Un carbón con alto contenido de volátiles, normalmente puede presentar una explosión mayor debido al aumento de la sobrepresión del polvo de carbón y a la velocidad de propagación. Las variaciones en la sobrepresión máxima durante el proceso de explosión con la concentración ideal y con un alto contenido de volátiles (> 25%) es más violenta en relación con cantidades menores de material volátil en el polvo de carbón.

El contenido de cenizas por lo general, logra una disminución de la susceptibilidad del carbón a la combustión espontánea. Sin embargo, ciertas partes de las cenizas tal como los compuestos de caliza, sodio y el hierro, pueden tener un efecto catalítico, mientras que otros como la alúmina y la sílice, producen el efecto retardante.

1.6. Modelo del triángulo del fuego

Desde Lavoisier y su teoría denominada “Triángulo del fuego”, es bien sabido que la combustión no puede existir sin la conjunción simultánea de los tres elementos siguientes: combustible, oxidante (normalmente aire), y una temperatura adecuada o fuente de ignición. El combustible puede ser cualquier material capaz de reaccionar rápidamente y de forma exotérmica con un medio oxidante, en este caso el combustible es el polvo de carbón. Para una explosión de polvo, este se debe dispersar en el aire al mismo tiempo que se presenta la fuente de ignición. La oxidación rápida del polvo combustible, genera un vertiginoso aumento de la temperatura y de la presión. Esta explosión puede ser una deflagración o detonación, dependiendo de la tasa de reacción y la velocidad de la quema (Cashdollar, 2000).

La violencia que genera una explosión, depende de la tasa de liberación de energía debida a reacciones químicas relacionadas con el grado de confinamiento y las pérdidas de calor. Los requerimientos para una explosión de polvo a menudo se denominan el "pentágono de la explosión", (Stephan, 1990), el cual consta de: combustible, dispersión/suspensión, oxidante, fuente de calor/ignición, y confinamiento.

El confinamiento por lo general corresponde a las paredes de los equipos o estructuras en las que se dispersa el polvo, pero este podría también provenir del autoconfinamiento si la reacción es suficientemente rápida. Es posible tener una explosión destructiva, incluso al aire libre si la reacción es tan rápida que la presión generada en la nube de polvo sea más rápida que aquella desprendida en el borde de la nube, (Cashdollar, 2000).

El polvo puede propagar una llama a través de la oxidación directa en la superficie de la partícula, donde un tamaño de polvo más fino, puede reaccionar más rápido que polvo del mismo material con tamaño de grano más grande. Además, la forma de las partículas y la porosidad desempeñan papel importante que pueden afectar en gran medida, la superficie de dichas partículas y sus velocidades de reacción. Por lo tanto, el tamaño de las partículas de polvo y la forma, son de gran importancia en lo que respecta a las características de explosividad del polvo. Sin embargo, las partículas de polvo más grandes participan ineficientemente en lo que respecta al proceso de propagación de las llamas.

Es la fracción más fina de las partículas de polvo la que más contribuye al riesgo, debido a que posee una mayor área superficial por masa y reacciona con una mayor rapidez. Además es un punto relevante que estas partículas finas pueden ser arrastradas fácilmente por las corrientes de aire y permanecer allí más tiempo, lo que genera aún más riesgo en el caso de una explosión. En la Tabla 1.3 se resumen los factores con mayor incidencia en las explosiones de polvo de carbón.

Tabla 1.3. Parámetros influyentes en las explosiones de polvo de carbón modificado.

PARÁMETRO	AUMENTA CON	DISMINUYE CON
Explosividad del polvo	1. Menor concentración explosiva	1. Presencia de grupos químicos tales como Cl, Br, F
	2. Temperatura mínima de ignición	2. Presencia de material inerte en concentraciones por encima del 10-20%
	3. Baja energía mínima de ignición	3. El contenido de humedad superior al 30%
	4. Velocidad de combustión	
	5. Aumento de la tasa de presión máxima	
	6. Presencia de materia volátil en el polvo a niveles superiores al 10%	
	7. Proporción relativamente pequeña de finos	
	8. Aumento de la concentración de oxígeno	
Efecto del tamaño de las partículas sobre la probabilidad de iniciación de explosión	50-70 μ m <tamaño de las partículas (μ m) <500 μ m	500 μ m <tamaño de las partículas (μ m) <50-70 μ m
Concentración máxima permisible de oxígeno	Disminución de la temperatura de ignición del polvo	Aumento de la temperatura del polvo
Tasa máxima de aumento de presión	1. La disminución del tamaño de partícula	1. Aumento del contenido de humedad
	2. Aumentar el contenido de materia volátil	2. Aumento de las concentraciones de polvo inerte mezclado
	3. Aumento de la concentración de oxígeno	

2. FASE EXPERIMENTAL

Para esta fase se realizaron ensayos en el Laboratorio de Carbones de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

2.1. Ensayos de laboratorio

Existen muchos métodos o ensayos por medio de los cuales se puede determinar la susceptibilidad del carbón a la combustión espontánea, sin embargo para este trabajo, a las muestras recolectadas, solo se les realizaron los análisis nombrados en la Tabla 2.1, con sus respectivas normas.

Tabla 2.1. Ensayos de laboratorio

Análisis	Determinación	Normas
Próximos completos	Humedad residual	ASTM D3173
	Cenizas	ASTM D3174
	Materia volátil	ASTM D3175
	Carbono fijo	ASTM D3172
	Azufre total	ASTM D3249
	Poder calorífico	ASTM D5865
Ignición	Temperatura de ignición del carbón.	Método propio
Petrográficos	Vitrinita, Liptinita e Interinita	ASTM D2799 ASTM D2798
	Índice de molienda hardgrove	Grado de triturabilidad del carbón
Explosividad	Grado del explosividad del polvo de carbón.	De acuerdo a la NIOSH

2.1.1. Análisis próximos cortos

Según la norma ASTM, estos análisis se definen como el contenido de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo. Sin embargo, también se realizaron los análisis próximos completos, los cuales incluyen la determinación del poder calorífico y el azufre total.

2.1.2. Pruebas de ignición del carbón

Con la realización de este análisis se conoce la temperatura a la cual el carbón hace chispa por primera vez, para lo cual se requiere preparar las muestras, para posteriormente colocarlas en una pequeña porcelana dentro de una mufla a la cual se le aumenta gradualmente la temperatura, por cortos periodos de tiempo conocidos como tiempo de exposición, a medida que se va avanzando en el proceso, es necesario estar monitoreando las muestras. Con el fin de obtener resultados que ayuden a analizar los factores que influyen en la autoignición del carbón, cada una de las muestras se cuarteó y se pulverizaron de tal modo que todas las partículas pasaran la malla 200, 270 y 325.

2.1.3. Análisis petrográfico

El análisis petrográfico consiste en un estudio microscópico detallado de los componentes del carbón (vitrinita, liptinita, inertinita y minerales), y de la medición de la reflectancia media de la vitrinita, para lo cual se realizaron cuatro secciones pulidas con las muestras de carbón 111082, 111083, 111084, 111085. Con estas muestras, es posible identificar los diferentes macerales que constituyen el carbón y de esta manera poder clasificarlos y determinar el grado de carbonificación al que se ha sometido la muestra (rango del carbón).

El método utilizado en este análisis, consiste en realizar un conteo de mínimo 500 puntos para identificar los macerales presentes en la muestra, y cuantificarlos por medio de porcentajes que indican ciertas condiciones de formación. El rango del carbón, se determina a partir de la medida de la cantidad de luz que refleja la superficie pulida de la vitrinita, y la cual se mide con un fotómetro adaptado al microscopio petrográfico de luz reflejada y con objetivos de inmersión en aceite de 30 a 40 aumentos.

2.1.4. Análisis de explosividad de polvos de carbón

Para este ensayo se utilizó el medidor de explosividad de polvos de carbón (CDEM), ver Figura 2.2, el cual fue diseñado por el Centro de Soporte Técnico Americano; El medidor es un instrumento manual que proporciona una dimensión directa del grado de explosividad del polvo de carbón, independiente del tamaño de las partículas. El funcionamiento de este instrumento consiste en un sensor óptico conectado a una pequeña caja electrónica con una pantalla digital, por medio del cual se realiza la medición de la radiación infrarroja reflejada por la superficie de una mezcla homogénea de dos sustancias con diferentes reflectancias ópticas, como el polvo de roca y el polvo de carbón. Además sirve como dispositivo complementario para la medición de la mezcla polvo de carbón y de roca en diferentes proporciones, para mejorar la seguridad en las minas a través de las prácticas de inertizar el polvo de carbón. Con el equipo se puede medir el grado de explosividad de los polvos de carbón de manera cualitativa, es decir que los resultados arrojados por el dispositivo manual son dos colores, los cuales son indicadores del nivel de explosividad en términos de muy explosivo (Red), y no explosivo (Green).



Figura 2.2. Equipo para determinar el grado de explosividad del polvo de carbón (Coal Dust Explosibility Meter)

3. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Los ensayos realizados en el laboratorio a las muestras de carbón, arrojan unos resultados que sirven para realizar un análisis e interpretación de los factores que relacionan los polvos de carbón con la susceptibilidad a los cambios, de tal manera que puedan generar alguna clase de proceso, además

de propiciar fenómenos como la auto-combustión o la explosividad, ocasionando efectos negativos en la producción de las empresas del sector carbonífero.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los análisis realizados a las muestras.

3.1. Análisis próximos completos

Teniendo en cuenta que los Análisis Próximos Completos determinan el porcentaje de humedad residual, el contenido de cenizas, los porcentajes de materia volátil, carbono fijo y azufre y el poder calorífico de los carbones muestreados, es posible observar que los resultados no varían en un rango amplio. No obstante, hay indicadores relacionados con la tendencia a la auto-combustión del carbón que se deducen de la Tabla 3.1, tales como los que se enuncian a continuación:

- La mayoría de las muestras presentan humedades inferiores al 4%, sólo una de las muestras tiene humedad mayor al 8%.
- En cuanto a las cenizas, se observa que todas las muestras presentan valores por debajo del 5%.
- A partir del contenido de materia volátil libre de agua y ceniza (MV (lac)), es posible conocer el rango del carbón. Sin embargo, no se evidencia una correlación entre la materia volátil y la mayor o menor susceptibilidad a la explosividad del carbón. Las muestras tienen un contenido de materias volátiles (lac), que varían entre 38.66 y 42.26, lo cual indica que los carbones son bituminosos altos en volátiles B y A, es decir de rango intermedio; éste se constituye en un importante factor que incide directamente en la combustión del carbón, ya que parte de la materia orgánica se ha transformado en hidrocarburos líquidos y gaseosos.
- El contenido de azufre varía entre 0.52 y 1.10, lo cual indica una gran variación en los carbones analizados.
- El poder calorífico está directamente afectado por el rango, el contenido de humedad y las cenizas del carbón, para estas muestras varía entre 6882 y 7931
- El índice de molienda varía entre 46.3 y 49, lo cual indica que estos carbones se catalogarían como duros.

3.2. Pruebas de ignición del polvo de carbón

El análisis de ignición es de vital importancia para entender la relación entre el tamaño de las partículas y la temperatura de ignición de estas. Se puede observar que entre más fino sea el polvo es más rápida su ignición debido a que tiene un área superficial mayor en comparación a las partículas de mayor tamaño. Esto constituye un factor importante a la hora de realizar operaciones mineras con el fin de mitigar las posibles afectaciones a generar, y controlar los ambientes tanto al interior de la mina, como en el sitio de almacenamiento del carbón.

Tabla 3.1. Análisis próximos

Muestra	Humedad Residual	Ceniza	Materia Volátil	MV (lac)	Carbono Fijo
111082	2,12	4,75	36,00	38,66	57,13
111083	3,14	1,07	37,87	39,53	57,92
111084	8,12	4,30	37,01	42,26	50,57
111085	3,63	1,80	37,90	40,08	56,67

Muestra	Azufre Total	Poder Calorífico cal/g	Poder Calorífico (lac)	IMH
111082	1,10	7720	8289	48,3
111083	0,52	7931	8280	46,3
111084	0,84	6882	7858	49,0
111085	0,78	7735	8179	47,0

Al realizar este ensayo en partículas finas menores a malla 200, no se notan cambios sustanciales en el proceso hasta que la muestra ya está quemada.

Como se puede observar en la Tabla 3.2, el tamaño de la partícula incide en la temperatura de ignición. En general las muestras más finas, pasante malla 325 son las primeras en generar características para encenderse, pero con la particularidad de no mostrar superficie enrojecida. Es notorio el agrietamiento que sufre la muestra tras la liberación de material volátil generando un ligero olor a quemado.

Tabla 3.2. Prueba de ignición para todas las muestras analizadas

Muestra	Pasante Malla	Temperatura de ignición (°C)
111082	200	400
	270	350
	325	325
111083	200	400
	270	350
	325	325
111084	200	400
	270	350
	325	325
111085	200	400
	270	350
	325	325

Por lo resultados anteriores, se concluye que uno de los factores importantes a la hora de la combustión espontánea del carbón, es el tamaño de grano de las partículas. Entre más fino sea el tamaño de grano de las partículas presentes, es más fácil llegar a su temperatura de ignición y esto sumado a otras condiciones en el ambiente de la mina o de los sitios en donde

se maneje el carbón, incrementan notablemente los riesgos de la actividad minera.

3.3. Análisis granulométricos

Esta clase de análisis refleja el comportamiento de las partículas del carbón, donde se aprecia el tamaño de grano característico de las partículas en la muestra. Según los resultados que se presentan en la Figura 3.1, más del 50% de las muestras tienen partículas con tamaños de grano mayor a 1000 micras. La fracción con tamaños menores a 50 micras está por debajo del 6%. Ello evidencia que en las operaciones de transporte y manejo del carbón se produce material fino el cual si se concentra en algunos lugares confinados, es susceptible a la autoignición, y podría ser capaz de generar nubes de polvo en suspensión incrementando el riesgo de explosión.

Con respecto al tamaño de las partículas de muestras de carbón, tal como salen de los frentes de explotación, los resultados muestran que solamente entre el 3 y el 5.9% está por debajo de la malla 60 (< 150 micras), es decir que no tendrían tantos problemas, pues el porcentaje de polvo explosivo es relativamente bajo.

3.4. Análisis petrográficos, tabla 3.3 y 3.4

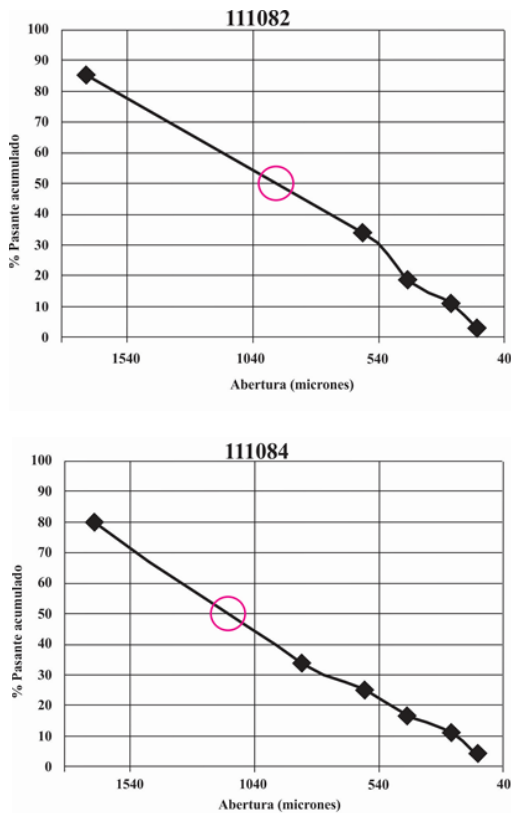


Figura 3.1. Análisis granulométrico de las diferentes muestras de carbón.

Los carbones son ricos en vitrinitas e inertinitas y relativamente pobres en liptinitas. Los contenidos de vitrinitas varían entre 52.82 y 62.00%, el maceral predominante es la colodetrinita, seguido por la colotelinita. Las vitrinitas varían entre 27.50 y 32.39%, el maceral que predomina es la semifusinita. Los macerales liptiniticos varían entre 6.76 y 11.79%, los macerales predominantes son la esporinita y las exsudatinitas,

El contenido de minerales varía entre 0.60 y 4.83%, y corresponden a carbonatos, arcillas piritas y mezclas con materia orgánica, Tabla 3.3. La reflectancia de la vitrinita varía entre 0.70 y 0.83, Tabla 3.4.

En la Figura 3.2, se pueden observar las características petrográficas generales de las muestras.

Este análisis que define los porcentajes de vitrinita, liptinita e inertinita, es un indicador característico de auto-combustión en los carbones. Los macerales vitrinticos y liptiniticos usualmente son generadores de gases y aceites asociados al carbón, mientras que el porcentaje de inertinitas es indicador de la madurez del carbón y lo lleva a que se comporte como una fuente importante de hidrocarburos y por lo tanto, es un aporte al proceso exotérmico generado por auto calentamiento.

Según los resultados obtenidos de los análisis petrográficos, las muestras con mayor susceptibilidad a la combustión espontánea debido a su contenido de vitrinitas

son las muestras 111082 y 111084, tal como se evidencia en la Tabla 3.3.

Figura 3.1. Características petrográficas de muestras analizadas, A = luz blanca (1/20 seg), B = luz fluorescente (1seg), 200x.

Tabla 3.3. Análisis petrográficos de las muestras de carbón

	111082	111083
	(%)	(%)
VITRINITAS	62,00	57,25
Telinitas	2,29	1,36
Colotelinitas	18,34	16,16
Colodetrinitas	39,81	34,29
Corpogelinitas	1,57	5,44
Gelinitas		
LIPTINITAS	6,76	10,42
Esporinitas	2,29	3,47
Cutinitas	1,09	1,96
Resinitas		
Alginitas		0,30
Liptodetrinitas	1,33	1,81
Bituminitas		
Exhudatinitas	2,05	2,87
Suberinitas		
Fluorinitas		
Rosarios		
INERTINITAS	27,74	31,72
Fusinitas	3,14	3,93
Semifusinitas	13,15	14,65
Funginitas	0,84	0,30
Secretinitas	2,90	2,42
Micrinitas		0,45
Macrinitas	2,05	3,63
Inertodetrinitas	5,67	6,34

MINERALES	3,50	0,60
Carbonatos	0,72	0,15
Arcillas	2,05	0,15
Piritas	0,24	0,15
MO+MM	0,48	0,15
Total	100	100
	111084	111085
	(%)	(%)
VITRINITAS	58,50	52,82
Telinitas	3,83	2,33
Colotelinitas	12,33	13,29
Colodetrinitas	28,17	30,40
Corpogelinitas	13,83	6,81
Gelinitas	0,33	
LIPTINITAS	9,17	11,79
Esporinitas	3,50	4,49
Cutinitas	2,00	2,82
Resinitas		
Alginitas	0,17	
Liptodetrinitas	0,50	0,66
Bituminitas		
Exhudatinitas	3,00	3,82
Suberinitas		
Fluorinitas		
Rosarios		
INERTINITAS	27,50	32,39
Fusinitas	4,67	3,65
Semifusinitas	12,00	17,11
Funginitas	0,67	0,50
Secretinitas	3,00	1,99
Micrinitas	0,17	0,17
Macrinitas	2,50	2,82
Inertodetrinitas	4,50	6,15
MINERALES	4,83	2,99
Carbonatos	1,17	0,33
Arcillas	2,00	0,17
Piritas	0,67	1,16
MO+MM	1,00	1,33
Total	100	100

Tabla 3.4. Porcentaje de reflectancia de las muestras

MUESTRA	REFLECTANCIA (%)
111082	0,83
111083	0,82
111084	0,70
111085	0,80

Los resultados de los análisis próximos concuerdan con los petrográficos y además confirman el mayor grado de madurez de la muestra 111082 con respecto a la 111084.

3.5. Análisis de explosividad de polvos de carbón, tabla 3.5

Inicialmente, se realizaron los análisis generales de explosividad de las muestras tomadas en la mina Cerrejón. Los resultados obtenidos en esta prueba se muestran en la Tabla 3.5, donde los respectivos indicadores de explosividad son: Red = Rojo, altamente explosivo y Green = Verde, no explosivo. A partir de estos datos es posible calcular la cantidad de material inertizante a aplicar en la mina para minimizar el riesgo de explosión por polvos de carbón, cabe anotar que para este caso se usó polvo de caliza.

Los resultados de la prueba de explosividad de polvo de carbón reflejan que estas partículas finas son altamente explosivas y requieren de un porcentaje de polvo de caliza, entre un 87% y 95% para su inertización. Figura 3.2. Las muestras 111082 y 111084 tienen mayor grado de explosividad.

Tabla 3.5. Indicador del grado de explosividad y porcentaje de inertización con polvo de caliza.

Muestra	Pasante Malla	Tamaño de grano en micras	Indicador de Explosividad		% de Inertización	
			Red	Green	% Polvo de Carbón	% Polvo de Caliza
111082	200	< 75	90	92	8	92
	270	< 53	94	95	5	95
	325	< 45	94	95	5	95
111083	200	< 75	85	87	13	87
	270	< 53	88	90	10	90
	325	< 45	94	95	5	95
111084	200	< 75	92	93	7	93
	270	< 53	92	93	7	93
	325	< 45	94	95	5	95
111085	200	< 75	86	88	12	88
	270	< 53	92	93	7	93
	325	< 45	94	95	5	95

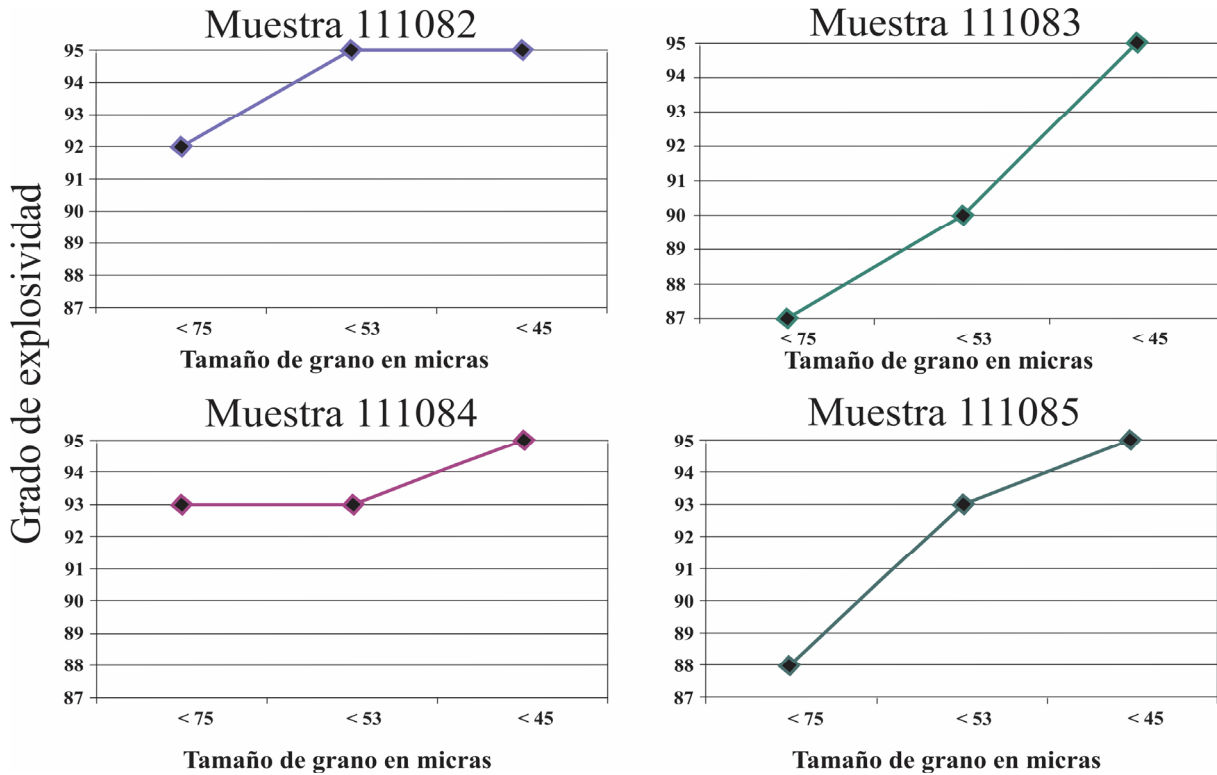


Figura 3.2. Variación de la explosividad de la muestras a diferentes tamaños de grano de las partículas (<75, 53 y 45 micras)

En la Figura 3.3 se puede observar como es el aumento de la tasa de explosividad con la disminución del tamaño de la partícula, entre más fina más explosiva. Así mismo para todas las muestras, cuando el tamaño de grano es inferior a malla 325 (< 45 micras) se requiere de 95% de polvo de caliza para su inertización, lo cual las cataloga como muy

explosivas. Es evidente que a este tamaño de grano las propiedades de carbón no tienen influencia en el grado de explosividad del polvo de carbón.

De tal manera que si se quiere ver el efecto de dichas propiedades en el grado de explosividad, es necesario tener tamaños de partículas pasante malla 200 (< 75 micras).

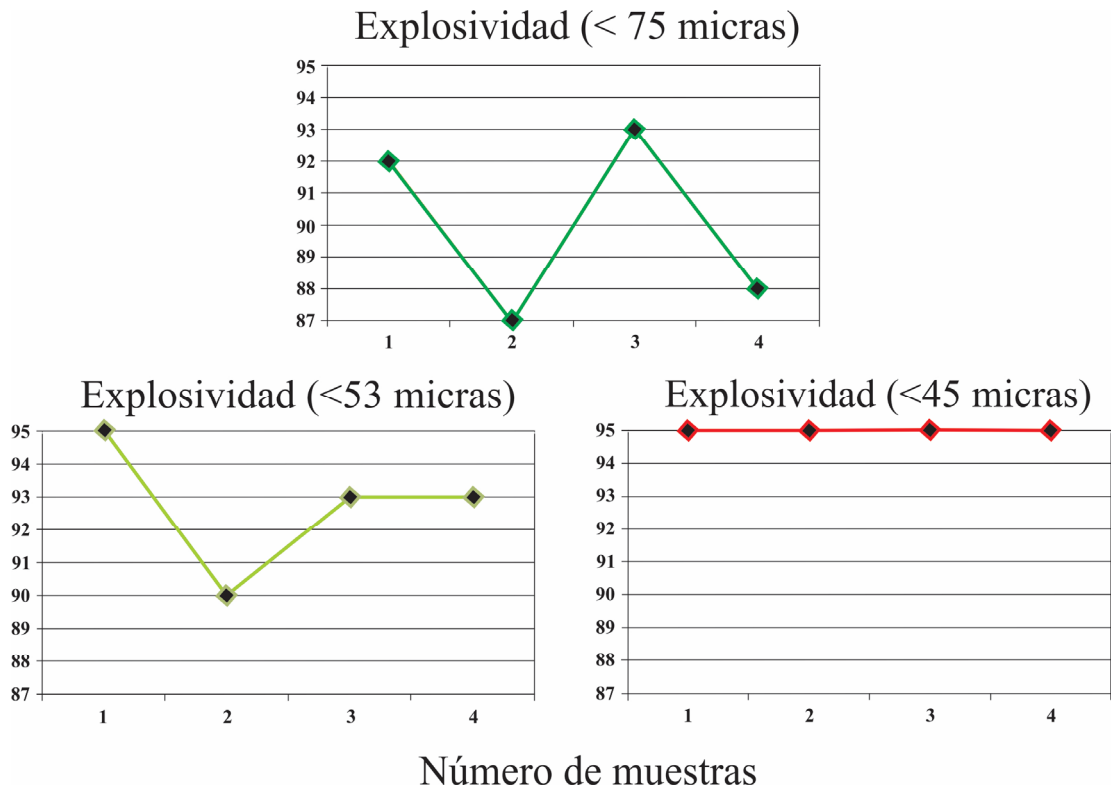


Figura 3.3. Grado de explosividad del polvo de carbón a diferentes tamaños de grano para las muestras de carbon

3.6. Relación IMH vs grado de explosividad

En la Tabla 3.6 se presenta el índice de molienda (IMH) para cada muestra.

Tabla 3.6. Índice de molienda IMH

MUESTRA	IMH
111082	48.3
111083	46.3
111084	49.0
111085	47.0

Los resultados arrojados en el índice de molienda Hardgrove en las muestras de carbón presentan una relación muy estrecha con los índices de explosividad realizados en el ensayo CDEM para las partículas de polvo de carbón por encima de la malla 200 (<75 micras). Esta comparación refleja la importancia del IMH en la explosividad del polvo de carbón dada su relación directa con el porcentaje de inertización del polvo de caliza. Las muestras más blandas, según el análisis realizado, son más susceptibles de generar partículas más finas en el proceso. Las muestras más duras no generan gran cantidad de material particulado, y por ello son menos susceptibles a generar concentraciones de polvo, y así se necesita menor cantidad de polvo de caliza para inertizar el carbón, Figura 3.4.

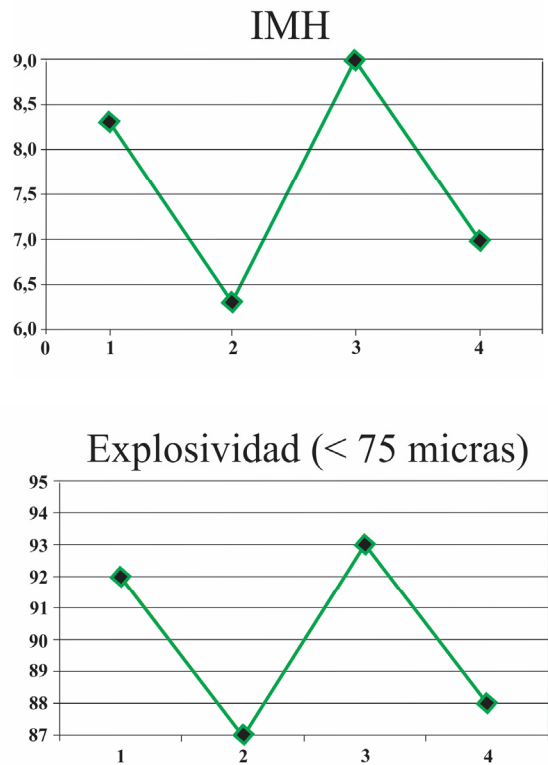


Figura 3.4. Relación entre IMH y el grado de explosividad.

3.7. Relación contenido maceral vs IMH

El contenido maceral característico de las muestras analizadas tiene relación con el indicador de explosividad, donde se tiene según la Figura 3.5, que el porcentaje de vitrinitas es un factor influyente en la explosividad del polvo de carbón por ser un generador importante de gases que ayuda a la aceleración del proceso de la autocombustion de este material particulado. Así existe una relación parecida entre el porcentaje de vitrinita y el grado de explosividad. De otro lado, el IMH es totalmente inverso al contenido de inertinitas, de tal modo que a menor IMH, mayor grado de explosividad.

3.8. Relación del poder calorífico (LAC) vs grado de explosividad.

Según los resultados de los análisis próximos del carbón, en relación con el grado de explosividad de las muestras correspondientes, se observa una relación inversa entre el poder calorífico (lac) y la explosividad del carbón. Así, en donde se tiene un alto grado explosivo, el poder calorífico (lac) es menor en relación con los demás, tal como se puede observar en la Figura 3.6. Donde la muestra 111084 posee el menor valor de poder calórico y el mayor de explosividad (pasante malla 200). En este caso a este tamaño de grano (< 75 micras) la explosividad depende del rango del carbón, es decir a menor rango, mayor grado de explosividad.

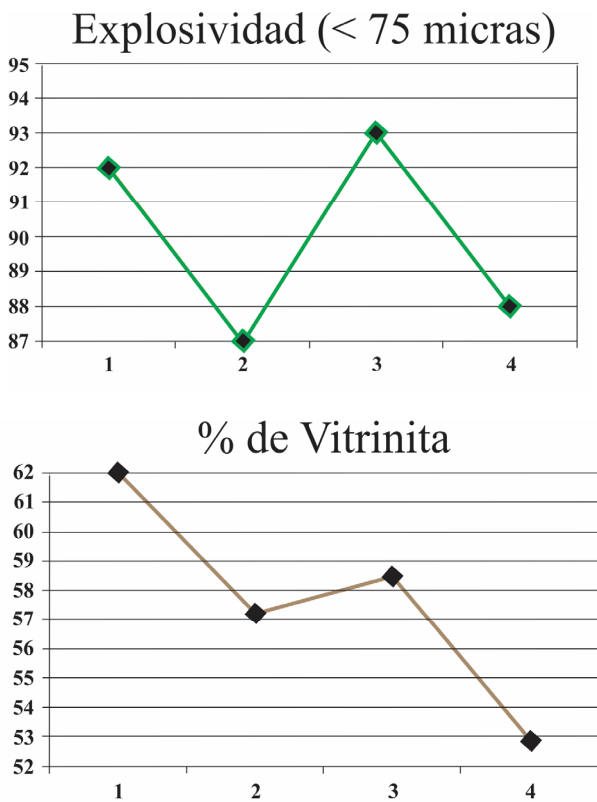
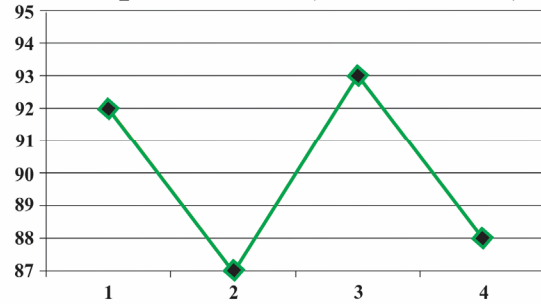


Figura 3.5. Relación del porcentaje de vitrinitas con el grado de explosividad en partículas de tamaño < 75 micras

Explosividad (< 75 micras)



PC (lac)

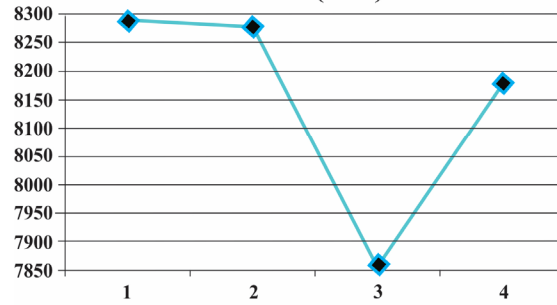


Figura 3.6. Relación inversa entre el poder calorífico (lac) y el índice de explosividad en las muestras de carbón con tamaño de partícula pasante malla 200.

3.9. Relación índice de explosividad vs porcentaje de reflectancia.

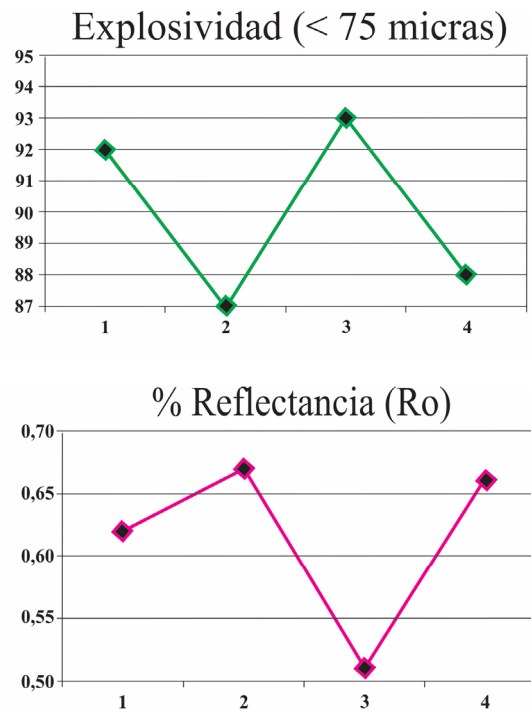


Figura 3.7. Relación inversa entre el porcentaje de reflectancia y el índice de explosividad de las muestras analizadas con tamaños de partícula pasante malla 200.

La reflectancia mide el grado de transformación de la de la materia orgánica y corresponde al rango del carbón, y al compararla con el índice de explosividad, se encuentra una relación inversa entre estos dos parámetros como se puede observar en la Figura 3.7. Las muestras con mayor grado de explosividad presentan un menor porcentaje de reflectancia (muestra 111084), y a menor índice de explosividad mayor es la reflectancia. Como ya se expresó, el grado de explosividad para tamaños de partículas pasante malla 200 (< 75 micras), depende del rango del carbón, así a menor rango, mayor el grado de explosividad.

4. CONCLUSIONES

Los análisis mostraron que la granulometría es un factor muy importante como indicador de la explosividad del polvo de carbón. Cuando las partículas son más finas, el material es más susceptible y se aumenta el riesgo de generar una explosión tras otra, con un área mayor de afectación.

El contenido maceral y su clasificación es de vital importancia en la caracterización del carbón, como se pudo evidenciar en los resultados obtenidos por esta investigación el porcentaje de vitrinitas presenta una relación estrecha con el índice de explosividad, ya que con un mayor contenido de este maceral sumado a la granulometría fina, este polvo de carbón puede comportarse como un elemento altamente explosivo y así generar riesgos en las operaciones mineras.

La madurez del carbón se constituye en un factor importante a considerar en la prevención de la autocombustión y la explosividad, ya que un carbón joven presenta elementos muy susceptibles e inestables a las altas temperaturas. Esto combinado con el contenido de materia volátil y algunos otros ya influyentes en el ambiente, tales como: las corrientes de aire, la concentración del polvo, la humedad y la presión, entre otros, crean un entorno ideal para dar lugar a la combustión y luego a una explosión violenta que afectará una gran porción del área donde se produzca.

El alto índice de explosividad de las muestras de polvo de carbón analizadas, evidencian la importancia de emplear métodos adecuados para no favorecer atmósferas ideales para una explosión. Se observó que el porcentaje de inertización es muy alto encontrando valores desde 88% en partículas malla 200, y 95% en partículas de malla 325. Además, estos polvos son muy propensos a generar altas concentraciones sobre las estructuras del lugar, y facilitan la creación de nubes en suspensión con lo cual se generaría aún más peligro tanto para el personal encargado de las operaciones, como de las mismas instalaciones.

En la realización de los ensayos y con énfasis especial en los de CDEM, se observó que independientemente de la variación de la composición maceral o del material volátil, las muestras de polvo de carbón tienen el mismo índice de explosividad para la granulometría de malla 325, lo que representa una uniformidad y fija un comportamiento para los granos de carbón finos haciéndolos altamente explosivos.

De acuerdo con los análisis realizados para la granulometría malla 200, las muestras tienen un rango de explosividad de mayor a menor en el siguiente orden:

111084, 111082, 111085, 111083. Para la granulometría malla 270 se tiene el siguiente orden de mayor a menor grado de explosividad: 111082, 111084, 111085, 111083.

La granulometría malla 325 arrojó los mismos valores de explosividad para las diferentes muestras analizadas, demostrando que las partículas finas son más altamente explosivas.

REFERENCIAS

- [1] Amyotte, P. R., S. Chippett, and M. J. Pegg. (1989) "Effects of Turbulence on Dust Explosions." *Progress in Energy Combustion Science*, pp. 293-310.
- [2] Amyotte, P. R., K.J. Mintz, and M. J. Pegg. (1995) "Effect of Rock Dust Particle Size on Suppression of Coal Dust Explosions." *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 73, Part B, pp. 89-100.
- [3] Cashdollar, K. L. (1996) "Coal Dust Explosibility." Special issue on dust explosions, ed. P. R. Amyotte. *Journal of Loss Prevention in the Process Industry* 9, pp. 65-76.
- [4] Cashdollar, K. L. (2000) "Overview of Dust Explosibility Characteristics." Special issue QII dust explosions, ed. P. R. Amyotte and K. L. Cashdollar. *Journal of Loss Prevention in the Process Industry* 13, pp. 183-199.
- [5] Dastidar, A. G., P. R. Amyotte, and M. J. Pegg. (1997) "Factors Influencing the Suppression of Coal Dust Explosions." *Fuel* 76, pp. 663-670.
- [6] Liu, Q. M., Bai, C. H., Li, X. D., Li, J., Dai, W. X., 2010. Coal Dust/Air Explosion in a Large Tube, *Fuel* 89, p. 329.
- [7] Proust, C., 2005. A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19, 104-120.
- [8] Taniguchi, M; Kobayashi, H; Kiyama, K and Shimogori Y, (2009). Comparison of flame propagation properties of petroleum coke and coals of different rank. *Fuel*, 88, 1478-1484.
- [9] Taniguchi, M; et al (2011). Prediction of lean flammability limit and flame propagation velocity for oxy-fuel fired pulverized coal combustion, *Proc. Combust. Inst.* 33, 3391-3398.
- [10] A.V. Fedorov, T.A. Khmel, V.M. Fomin, 2008. Analysis of the shock wave ignition and detonation in bituminous coal-dust suspensions. Institute of Theoretical and Applied Mechanics SD RAS, Siberian Division of Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya. Russia.
- [11] Facolta di Ingegneria, Universita' degli Studi di Roma. Roma, Italia enero de 2008.
- [12] M. Silvestrini, B. Genova, F.J. Leon Trujillo B. Correlations for flame speed and explosion overpressure of dust clouds inside industrial enclosures
- [13] Tasneem Abbasi, S.A. Abbasi, 2006. Dust explosions—Cases, causes, consequences, and control. Center for Pollution Control and Energy Technology, Pondicherry University, Pondicherry 605014, India.
- [14] Dr. S. A. Abbasi. Explosions in process industry and their classification Proceedings of the International Conference on Safety, Health, and Environment, Sharif University of Technology, Tehran, March 2008
- [15] Cashdollar, K. L., M. Hertzberg, and I. A. Zlochower. (1988) "Effect of Volatility on Dust Flammability Limits for Coals, Gilsonite and Polyethylene." Proceedings of the 22nd Symposium (International) on Combustion, the Combustion Institute, Pittsburgh.
- [16] Kauffman, C. W., S. R. Srinath, E. I. Tezok, et al. (1984a) "Turbulent and Accelerating Dust Flames." Proceedings of the 20th Symposium (International) on Combustion, the Combustion Institute, pp. 1701-1708.
- [17] Proust, C., and B. Veyssiere. (1988) "Fundamental Properties of Flames Propagating in Starch Dust/Air Mixtures." *Combustion Science and Technology* 62, pp. 149-172.
- [18] Cashdollar, K. L., M. J. Sapko, E. S. Weiss, et al. (1987) *Industrial Dust Explosions. In Laboratory and Mine Dust Explosion Research at the Bureau of Mines. Special Technical Publication 958. Philadelphia: ASTM*, pp. 107-123.

- [19] Liu, J., and J. Wang. (August/September 1994) "The DSS to Prevent and Control Coal Dust Explosion." Proceedings of the Sixth International Colloquium on Dust Explosions, ed. Deng Xufan and Piotr Wolanski, Shenyang, Peoples Republic of China, pp. 434-440.
- [20] Liu, Q., and C. Bai. (September 1998) "Dust, Vapour and Gas Explosions Induced by Combustion under Weak Ignition Conditions." Proceedings of the Eighth International Colloquium on Dust Explosions, Schaumburg, L. Schaumburg: Safety Consulting Engineers, pp. 175-185.
- [21] Proust, C. (2002) "Laser Ignition of Dust Clouds." Proceedings of the Fourth International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Bourges, France, ed. I. Sochet. Journal of Physics IV France 12, pp. 79-88.
- [22] Eckhoff, R., Dust Explosions in the Process Industries, 3rd Edition, Gulf Professional Publishing, 2003.
- [23] Sapko, M. J., Weiss, E. S., Cashdollar, K. L., & Zlochower, I. A. (2000). Experimental mine and laboratory dust explosion research at NIOSH. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13, 229e242, SI.
- [24] Proust, C., 2006. A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 19, p.104.
- [25] Taniguchi, M; et al (1996). Laser ignition and flame propagation of pulverized coal dust clouds, Proc. Combust. Inst., 26, 3189-3195.
- [26] Taniguchi, M; et al (2011). Prediction of lean flammability limit and flame propagation velocity for oxy-fuel fired pulverized coal combustion, Proc. Combust. Inst. 33, 3391-3398.