

RIESGO POTENCIAL DE EXPLOSIONES DE POLVO COMBUSTIBLE EN MINAS SUBTERRÁNEAS DE CARBÓN

WILLIAM CASTRO MARÍN

Profesor Asociado Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia.

CLAUDIA P. MARTÍNEZ G.

Ingeniera de Minas y Metalurgia, Investigadora - Centro del Carbón

RESUMEN

En este artículo se estudian las características necesarias para que el polvo de carbón sea considerado como una fuente potencial de riesgo de explosión, las fuentes potenciales de inflamación, los efectos de los golpes de polvo, los parámetros que permiten conocer el grado de explosividad que presenta una determinada muestra de polvo de carbón y para establecer índices los cuales proporcionan clasificaciones relativas o delimitan en una primera aproximación el posible riesgo de explosión en la zona estudiada.

Finalmente se proponen algunas técnicas de prevención y control en el caso de una eventual explosión de polvo.

PALABRAS CLAVES

Frente de llama, frente de presión, nube de polvo, función de explosividad, temperatura mínima de inflamación, concentración mínima explosiva, energía mínima de inflamación, presión máxima de explosión, índice de explosividad, coeficiente de explosividad.

ABSTRACT

This article deals with aspects related to the risk of dust explosions in coal mines, namely:

The necessary characteristics that render the coal dust a potential source of explosions

- The most common causes of ignition
- The effects of dust outbursts
- The parameters through which the degree of explosivity of a particular coal sample are recognized.
- The experimental indexes that, as a first approximation, indicate the possibility of explosion at a particular area of the mine.

The study and analysis of these factors, considered as indicators, points out to a high susceptibility of the coals under consideration to the explosion phenomenon and to the need to implement means to forestall the risk of initiation of an explosion, to control its propagation and to suffocate the explosion that has happened.

Techniques of prevention and control of dust explosions are presented.

KEY WORDS

Flame front, pressure front, dust cloud, explosivity function, minimum inflammation temperature, minimum explosive concentration, minimum energy of inflammation, maximum pressure of explosion, explosivity index, explosivity coefficient.

1. INTRODUCCIÓN

El Centro de Investigaciones del Carbón de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín con el apoyo financiero de Colciencias y Ecocarbón

y con la especial colaboración de La Regional No. 5 Amagá, realizó el proyecto "Condiciones Ambientales de la Minería Subterránea del Carbón en la Cuenca Amagá - Angelópolis".

Entre los fenómenos estudiados se tiene el de Riesgo potencial de las explosiones de polvo combustible para lo cual se eligieron cuatro minas que por su mecanización y nivel de producción presentan una generación apreciable de material particulado.

Los procesos de comminución, minería mecanizada, cedencia del sistema de entibación, voladuras, operaciones de cargue, transporte y trituración pueden considerarse fuentes de polvo en aperturas subterráneas.

Todo material con características combustibles reducido a un tamaño muy fino, puede dar lugar a una mezcla potencialmente explosiva cuando se pone en suspensión, la cual mediante una fuente de ignición puede producir combustión ocasionando una onda de presión y un frente de llama, explosión de polvo, con consecuencias desastrosas.

Algunas cifras significativas que muestran la peligrosidad de las explosiones de polvo a nivel mundial son:

- En EE.UU. entre 1900 y 1977 se produjeron 1430 explosiones con aproximadamente, 700 muertos y más de 2200 heridos¹
- En Alemania y países vecinos, entre 1960 y 1972, se produjeron más de 4000 explosiones de polvo, es decir una explosión por día de trabajo².
- En Inglaterra, entre 1958 y 1976 se sumaron 679 explosiones causando 30 muertos y 925 heridos³.
- En Polonia entre 1922 y 1970, se cuentan 47 explosiones en minas, interviniendo el polvo de carbón en 22 y siendo el único responsable en 8

¹ Resumen histórico de las explosiones de carbón en EE.UU.; Bureau of Mines, 1983.

² Explosiones de polvo de carbón y su supresión; Cybulski, Waclaw, 1975.

³ Explosiones de polvo; Handbook of powder technology, 1981.

de ellas. El número total de muertos fue de 240, de los cuales 176 se debieron a accidentes de explosiones de polvo de carbón.

En España, se conocen accidentes en minas cuya causa se atribuye al polvo de carbón, tales como Mina Clara en 1944, que causó 34 muertos, en Pozo Montsacro y en Pozo Espiel en 1982 se produjeron explosiones que causaron la muerte a 5 hombres y 9 heridos graves⁴.

En Colombia, no se han tenido datos lo suficientemente completos; sólo se han tenido reportes aislados referentes a accidentes ocurridos en minas, dentro de los cuales se conoce un accidente de una explosión en una de las minas de la cuenca carbonífera Amagá-Angelópolis, en la cual se produjeron numerosas víctimas; además no se ha definido si la explosión se debió sólo al grisú o si el polvo influyó también y en qué medida.

2. CONDICIONES PARA QUE SE PRESENTE UN GOLPE DE POLVO Y SUS EFECTOS

El polvo de carbón que se deposita en las galerías se origina en operaciones de cargue, transporte y trituración; en frentes de desarrollo y explotación debido a la minería mecanizada, voladuras, soportes, procesos de comminución y operaciones de cargue; en tolvas y puntos de transferencia de bandas; en las salidas de los tajos y en los retornos de ventilación etc.

Al generarse las partículas de polvo por las operaciones descritas atrás, éstas son transportadas por la corriente de ventilación permitiendo concentraciones locales de polvo y posterior depositación en aquellos sitios donde la velocidad de la corriente de aire disminuye. Estos lechos de polvo pueden ser puestos en suspensión formando una nube en cualquier momento, ya sea por manipulaciones repentinas, vibraciones y en el caso mas delicado por el incremento de velocidades de aire (mayores a 5 m/s) producidas durante la iniciación de un golpe de polvo.

⁴ La seguridad en las minas españolas; Economía Industrial, 1984.

La nube de polvo generada es más estable mientras más finas sean las partículas y mientras más rápida y turbulenta sea la corriente de aire.

La explosión de polvo se presenta cuando además de la nube formada existe un suministro de oxígeno y una fuente de ignición.

Una condición básica para que se presente una explosión de polvo es que las partículas muy finas con alta área superficial, estén espaciadas de tal manera que llegue suficiente oxígeno entre ellas para la combustión completa, pero lo suficientemente cercanas para que el calor producido al arder una partícula induzca la combustión de la partícula vecina y así sucesivamente.

Cuando se alcanzan localmente las condiciones mencionadas, puede producirse la explosión de una primera y pequeña nube de polvo, explosión denominada primaria de no excesiva importancia. Esta explosión primaria genera ondas de presión que aumentarán la turbulencia del ambiente y favorecerán el que una cierta cantidad de polvo depositado sea suspendido, alcanzándose de nuevo las condiciones necesarias para la explosión y es la propia explosión primaria la que inicia el nuevo fenómeno, denominado secundario. Los efectos de esta segunda explosión, que al propagarse puede dar lugar a sucesivas explosiones en diferentes zonas de la instalación, son los realmente catastróficos debido a la gran cantidad de energía que se libera en forma repentina.

A lo largo de una galería de una mina de carbón se ha comprobado experimentalmente que por delante del frente de llama viaja una onda de presión que levanta parte del carbón depositado creando una nube que es posteriormente inflamada por el frente de llama que viaja detrás (Figura 1).

La velocidad de la onda de presión se mantiene constante y es superior a la del frente de llama, que suele disminuir, por lo cual la distancia entre ambos aumenta a medida que la explosión se propaga.

Cuando la onda de presión viaja a velocidad supersónica alcanza el extremo abierto de la galería

generando una onda de expansión que progresa hacia el interior de ésta. La onda de expansión interactúa con el frente de llama que seguía a la onda de presión a cierta distancia con una velocidad superior a la del aire, resultando acelerado.

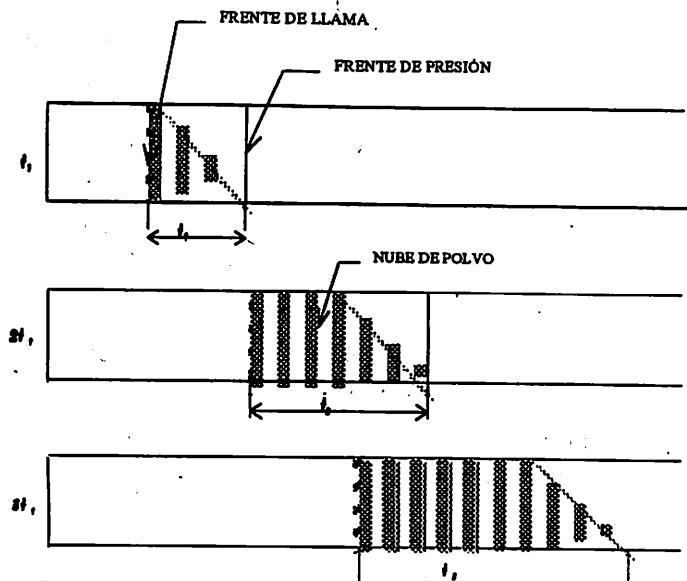


Figura 1 Propagación de la explosión de polvo. $t_1, 2t_1, 3t_1$ tiempos. t_1, t_2, t_3 distancia entre el frente de llama y el frente de presión en las etapas $t_1, 2t_1, 3t_1$; se tiene $t_3 > t_2 > t_1$.

2.1 FUENTES POTENCIALES DE INFLAMACIÓN

Todos los fenómenos capaces de calentar localmente una nube o una capa de polvo hasta la temperatura de ignición, constituyen las fuentes potenciales de inflamación. Estas fuentes son:

- Explosiones de grisú. La mayoría de explosiones de polvo de carbón en minas han sido iniciadas por una combustión de grisú que genera la onda de choque inicial y el frente de llama.
- Voladuras. Un deficiente retacado o una voladura de una carga mediante retardos, puede convertirse en un peligro inminente de explosión ya que el material explosivo iniciado mediante uno de los retardos, permite la formación de una nube de polvo que a su vez es inflamada por la explosión de la carga que la precede.

2.2. EFECTOS DE LOS GOLPES DE POLVO

2.2.1. Efectos dinámicos

Los efectos dinámicos ocasionados por la onda de choque son considerables y se originan en los incrementos locales de presión. Algunos de estos efectos son:

- Ruptura de muros de 30 cm de espesor para presiones absolutas de 1.14 bares.
- Volcamiento de vagones cargados y destrucción de muros de ladrillo para presiones del orden de 1.5 bares
- Muerte de las personas proyectadas sobre un obstáculo para presiones de 1.14 bares.
- Precipitación al piso de las personas para presiones mayores a 1.2 bares.
- Ruptura de timpanos para presiones de 1.33 bares
- Destrozos pulmonares para presiones de 2 bares

2.2.2. Efectos térmicos

Como las reacciones de combustión que se llevan a cabo durante la explosión son exotérmicas, se produce un fuerte incremento de la temperatura que conlleva a graves riesgos para las personas, equipos y elementos de trabajo y para el yacimiento ya que en él puede declararse un fuego de grandes proporciones.

2.2.3. Contaminación de la atmósfera

Las reacciones de combustión que se producen durante la explosión, son en parte incompletas, por tanto, se desprenden grandes cantidades de CO las cuales junto con el CO₂ y los demás gases desprendidos contaminan la atmósfera. Este efecto se puede manifestar en zonas alejadas del sitio de la explosión, en el sentido de avance de las corrientes y hasta en los retornos generales de la mina, es decir, su zona de influencia es muy grande y a este efecto se debe la mayoría de las víctimas que se han presentado durante los golpes de polvo.

3. FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA EXPLOSIVIDAD DEL POLVO DE CARBÓN

3.1. MATERIA VOLÁTIL

La explosividad del polvo de carbón depositado se ve incrementada con el aumento del contenido de materia volátil, así:

<i>Polvo</i>	<i>Materia volátil</i>
Inflamables	> 12%
Poco inflamables	9% < M.V < 12%
No inflamables	< 9%

Durante mucho tiempo se tomó como único criterio para determinar la explosividad del polvo de carbón el contenido de materia volátil.

3.2. HUMEDAD DEL CARBÓN Y DE LOS DEPÓSITOS DE POLVO

La explosividad se reduce con la presencia de agua, aunque la humedad no impide la combustión del polvo en caso de un incendio o explosión.

Una cantidad de agua del 15% puede oponerse a una explosión débil y a su propagación. Para una explosión violenta se requiere del 30 al 40% de agua y del 50% si el polvo y el agua no se encuentran mezclados.

3.3. CENIZAS

La explosividad se reduce con la presencia de sólidos inertes, pues éstos absorben calor de la reacción de combustión y recubren las partículas combustibles dificultando el acceso de calor.

Según el decreto 1335 expedido en 1987 por el gobierno colombiano, para mantener un depósito en condiciones de incombustibilidad debe tenerse un contenido de inertes del 60 - 70%.

Otros parámetros que se han considerado importantes en la explosividad del polvo de carbón son el carbono elemental, el hidrógeno y el azufre.

3.4. CONCENTRACIÓN Y GRANULOMETRÍA

La concentración mínima de polvo combustible en la nube formada para que ocurra una explosión, es del orden de 100 g/m³. Por debajo de este valor la combustión se puede extinguir. Al aumentar la concentración a partir de este valor el proceso se acelera, la velocidad de propagación de la llama aumenta y los efectos derivados de la explosión se incrementan, aunque se ha estimado que para concentraciones del orden de 5000 g/m³ el fenómeno se autoextingue.

La granulometría es otro parámetro a tener en cuenta ya que depende de ella que los lechos de polvo puedan ser puestos en suspensión por la onda de choque generada en el efecto iniciador.

Las partículas menores de 0.2 mm son las que dan lugar a las explosiones de polvo de carbón. Un polvo combustible al ser suspendido en el aire puede ser explosivo, más aún si las partículas son menores de 250 micrones.

En la Tabla 1 se presentan las concentraciones mínimas de carbón en la nube para que se inicie, se mantenga y se propague el fenómeno de explosión.

Tabla 1. Concentraciones límites de polvo de carbón en la nube.

Materias Volátiles	Granulometría < 80 μ m	Concentración Límite (g/m ³)
≈ 20%	85% → polvos muy finos	140
	20-25% → polvos finos	200
> 30%	85% → polvos muy finos	70
	20-25% → polvos finos	100

En las minas seleccionadas para el estudio «Condiciones ambientales de la minería subterránea del carbón en la cuenca Amagá-Angelópolis», se realizó una campaña de muestreo en la cual se tomaron dos tipos de muestras así: muestras de polvo de carbón depositado, tanto en tramos de galería como en puntos de descarga del mineral, cubriendo paredes, piso, techo y sostenimiento; y muestras de carbón fresco. A los dos tipos de muestras se les determinaron los parámetros que se presentan en la Tabla 2.

Desde el punto de vista de materia volátil, las cuatro minas estudiadas pueden considerarse pulverulentas porque el porcentaje de materia volátil oscila entre 29 y 41%, mucho mayor que el límite máximo permisible del 12%.

Los valores más altos de materia volátil en los depósitos de polvo se encontraron en los retornos de ventilación de todas las minas.

En cuanto al contenido de humedad, se tiene que la mayoría de los resultados son inferiores al porcentaje mínimo (15%) necesario para contener una explosión débil, portanto se podría presentar un golpe de polvo, a menos que se tomen medidas preventivas.

Con base en el contenido de cenizas se tiene que los resultados obtenidos son inferiores al valor mínimo establecido por el reglamento (60 - 70%); sin embargo, se observa un enriquecimiento natural de material incombustible en el polvo depositado, lo que se traduce en una neutralización parcial de estos depósitos. Se nota también una disminución en el contenido de materia volátil en ellos, cuando se comparan con las muestras de carbón fresco.

En cuanto al carbono elemental se puede apreciar una diferencia notable entre el porcentaje de las muestras de carbón provenientes del manto y de las muestras de polvo de carbón debido a la contaminación gradual que sufre el polvo en el ambiente subterráneo.

El menor porcentaje de hidrógeno se registró en las muestras de polvo, lo que es normal ya que hay un desprendimiento de una parte de este gas de la matriz que lo contiene.

En cuanto a la granulometría para la mina 1 (M1) es difícil determinar un tamaño promedio de partícula, ya que se presenta una variedad de granulometrías. Sin embargo la mayor cantidad de polvo de acuerdo con los análisis efectuados es mucho menor de 0.2 mm, estando comprendidos entre la malla 100 y 270.

Para la mina 2 se observa una distribución de tamaño de partícula más uniforme en cada una de las muestras de polvo analizadas, en las cuales el 32.82% se retiene en la malla 270 a excepción de la muestra 6 cuyo

Tabla 2. Datos de laboratorio para cada una de las muestras.

Referencia	Humedad Total (%)	Cenizas (%)	Materia Volátil(%)	Azufre (%)	C (%)	H (%)	Granolometría Malla	% retenido
M1 m1 PD	11.91	30	33.2337	0.4537	41.86	4.43	100	53.34
M1 m2 PD	12.46	30.57	33.1358	0.6026	41.51	4.46	270	32.89
M1 m3 PD	12.72	30.3	32.2932	0.5376	41.73	4.33	270	45.67
M1 m4 PD	11.91	30	33.2337	0.4537	41.86	4.43		
M1 m5 PD	10.72	31.99	32.7282	0.51	40.57	4.41	270	49.38
M1 m6 PD	12.77	29.91	32.7115	0.3666	41.13	4.15	100	48.49
M1 m7 PD	10.82	31.65	31.8227	0.5943	41.58	4.1	140	48.37
M1 m8 PD	10.52	31.53	32.123	0.5685	42.01	4.03	270	46.63
M1 m9 PD	10.49	29.95	32.7179	0.3197	43.61	4.1		
M1 m10 PD	9.5	36.45	30.2053	0.535	38.24	3.77	100	32.90
M1 m11 PD	9.8	37.84	29.6274	0.5063	36.2	3.68		
M1 m12 PD	10.59	28.05	32.4475	0.569	45.28	4.22		
M1 m13 PD	10.34	31.38	32.1641	0.2526	42.27	3.98		
M1 m14 PD	9.97	33.1	30.4446	0.491	40.67	3.9	325	62.40
M1 m15 PD	9.56	32.95	31.2126	0.5496	41.13	3.9	270	60.98
M1 m16 PD	9.04	36.66	30.0405	0.5059	38.1	3.73	270	83.57
M1 m17 PD	15.96	39.34	29.1587	0.8564	35.65	3.83	60	25.55
M1 m18 PD	10.2	39.1	29.0729	0.5578	35.61	3.65	100	92.14
M1 m19 PD	12.32	30.28	31.7385	0.6012	46.26	4.14	270	39.41
M1 m20 PD	33.5	35.18	31.4814	0.4712	38	4.08	60	46.43
M1 m21 PD	13.08	34.96	30.9656	0.54	39.8	4.14	270	22.22
M1 m22 PD	9.57	36.01	30.6765	0.5123	38.35	3.94	270	45.48
M1 m23 PD	9.51	32.74	31.8557	0.5899	41.5	3.96	100	24.17
M1 m24 PD	8.31	38.45	30.2658	0.5923	37.52	3.89	140	36.99
M1 m25 PD	8.38	32.52	31.6301	0.55	42.07	3.73	270	49.37
M1 m26 PD	8.8	37.57	30.3377	0.6572	36.9	3.98	270	38.94
M1 m27 PD	8.85	34.99	31.1883	0.6572	39.32	3.83	140	40.66
M1 m28 PD	10.24	36.46	30.3793	0.619	37.32	4.09	140	25.40
M1 m291 PD	9.58	35.57	30.187	0.3431	39.68	3.89	270	41.65
M1 m30 PD	10.78	35.99	30.4487	0.637	37.61	3.84	270	29.95
M1 m31 PD	10.19	38.01	29.4481	0.4607	37.03	3.6	270	43.48
M1 m32 CF	11.39	2.68	40.8775	0.3144	64.84	5.72		
M1 m33 CF	12.46	4.85	39.606	0.4352	61.65	5.51		
M1 m34 CF	12.02	4.92	40.4877	0.5325	63.18	5.59		
M1 m35 CF	14.69	3.87	40.932	0.41	61.41	5.82		

Tabla 2. Datos de laboratorio para cada una de las muestras. (continuación)

Referencia	Humedad Total (%)	Cenizas (%)	Materia Volátil(%)	Azufre (%)	C (%)	H (%)	Granulometría Malla % retenido
M1 m36 CF	14.77	3.02	40.8335	0.45	61.65	5.9	
M2 m1 PD	14.35	30.28	34.4643	0.9536	40.4	4.26	270 34.16
M2 m2 PD	7.65	26.87	35.9057	0.8299	46.56	4.33	270 32.05
M2 m3 PD	9.57	18.43	39.2518	0.6391	52.44	4.71	270 39.40
M2 m4 PD	/	12.685	22.28	0.1374	0.4753	49.19	4.66 270 37.05
M2 m5 PD	10.85	22.61	34.6284	0.6731	47.8	4.45	270 30.22
M2 m6 PD	12.11	34.16	31.756	0.68	38.42	3.95	100 45.70
M2 m7 PD	17.05	36.43	33.3985	0.63	37.34	4	270 30.80
M2 m8 PD	10.33	33.16	33.1791	0.55	40.34	4	35.68 270
M2 m9 PD	10.8	25.31	35.1545	0.48	46.15	4.28	28.16 270
M2 m10 PD	9.22	22.64	37.2487	0.6	48.11	4.42	37.48 270
M2 m11 PD	9.93	36.5	31.3885	0.3	35.77	3.73	270 23.21
M2 m12 CF	11.6	5.07	40.7208	0.4039	61.89	5.59	
M2 m13 CF	9.65	11.88	39.22	0.4505	57.71	5.14	
M2 m14 CF	9.38	11.6	39.6492	0.5639	58.12	5.16	
M2 m15 CF	10.27	12.54	37.9134	0.5882	57.29	4.91	
M2 m16 CF	9.39	15.97	37.4303	0.5016	54.61	4.88	
M2 m17 CF	9.06	21.36	37.3629	0.42	50.61	4.83	
M3 m1 PD	17.51	12.8	35.8484	1.19	54.9	5.01	60 35.61
M3 m2 PD	17.64	17.3	35.1539	0.64	51.42	4.73	60 41.21
M3 m3 PD	16.78	7.75	37.4852	0.59	57.39	5.88	60 54.30
M3 m4 PD	15.84	16.59	35.1691	1.08	50.79	5.06	60 72.13
M3 m5 PD	13.88	22.75	33.1652	0.83	45.88	4.48	60 54.05
M3 m6 PD	11.99	38.73	29.0352	1.15	34.5	3.72	60 35.81
M3 m7 CF	12.48	5.88	39.4311	0.36	61.2	5.32	
M3 m8 CF	11.92	8.32	35.7338	0.54	59.7	5.14	
M4 m1 PD	19.42	26.88	31.79	1.72	43.72	4.56	60 70.53
M4 m2 PD	16.58	25.22	33.7503	2.27	44.78	4.22	60 70.43
M4 m3 PD	16.68	23.99	34.6145	2.46	45.89	4.38	60 74.65
M4 m4 PD	8.76	33.32	30.2731	1.27	40.47	3.94	60 28.52
M4 m5 PD	13.14	30.26	31.7026	2.29	40.95	4.05	60 50.84
M4 m6 CF	9.8	6.14	41.0225	0.51	62.63	5.33	
M4 m7 CF	13.01	4.28	40.3816	0.6	63.46	5.49	

M: mina, m: muestra, PD: polvo depositado, CF: carbón fresco

tamaño predominante es el retenido en la malla 100 con un 45.70%.

En las minas 3 y 4, el tamaño de los polvos es normalmente grueso, comparado con la distribución granulométrica de las otras dos minas. Menos del 15% de los polvos son inferiores a 0.2 mm, mientras que más del 45% son mayores de 0.25 mm.

4. FUNCIONES DE EXPLOSIVIDAD

Estas funciones permiten caracterizar el carbón tanto del manto como de los depósitos de polvo desde el punto de vista de su tendencia a la producción de golpes de polvo.

4.1. FUNCIÓN QUE DEPENDE DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL CARBÓN (FE₁)

La función de explosividad, denominada FE₁ se basa en las propiedades físicas de los polvos de carbón, y está en función de los siguientes parámetros

$$FE_1 = f(TMI, CME, EMI, PME, VMAP)$$

$$FE_1 = -1.664 - 0.0001(1.911 TMI + 0.193 CME + 0.050 EMI - 0.439 PME - 0.0003 VMAP)$$

Donde TMI es la temperatura mínima de inflamación, CME es la concentración mínima explosiva, EMI es la energía mínima de inflamación, PME es la presión máxima de explosión y VMAP es la velocidad máxima de aumento de presión.

Temperatura mínima de inflamación (TMI)

Es la menor temperatura medida cuando se produce la inflamación de una nube o capa de polvo. Permite determinar si una fuente térmica presente es capaz o no de iniciar el proceso.

Concentración mínima explosiva (CME)

Mide la cantidad mínima de polvo que debe existir en suspensión para que el frente de llama pueda continuar su propagación en un proceso de explosión. Teóricamente, con una concentración inferior a ésta se eliminaría el riesgo de explosión.

Al ir aumentando la concentración de polvo en suspensión se llegará a un valor para el cual la velocidad de reacción y la velocidad del frente de llama son máximas.

Energía mínima de inflamación (EMI)

Es la mínima energía capaz de producir la ignición o el proceso de combustión. Permite determinar si diferentes fuentes de ignición aportan o no la energía suficiente para producir la inflamación.

La EMI de distintos polvos de carbón disminuye de forma exponencial a medida que va aumentando el porcentaje de metano. En algunos casos, con un 2 y un 3% de metano se ha llegado a obtener valores de la EMI por debajo de los 10 mJ. Además aquellos carbones que tienen contenido en cenizas superiores al 20% no han sido capaces de inflamarse con chispas eléctricas de energía de 18 J ni con un 3% de metano.

Presión máxima de explosión (PME) y velocidad máxima de aumento de presión (VMAP)

Se llama PME a la presión más alta alcanzada durante el proceso de explosión., y VMAP al gradiente máximo de la curva de presión.

En la Tabla 3 se muestran valores típicos de cada uno de los parámetros anteriores para algunos tipos de polvos⁵.

Tabla 3. Valores típicos de los parámetros de explosividad

Polvos	TMI (°C)		CME (g/m ³)	EMI (mJ)	PME (kPa)	VMAP (kPa/s)
	Nube	Capa				
Carbón 12% M.V.	670	240	--	--	--	--
Carbón 25% M.V.	605	210	120	120	422	2799
Carbón 43% M.V.	575	180	50	50	626	13600
Azúcar	370	400	45	30	740	34000
Flúor	380	360	50	50	740	25200
Zircon	20	220	45	5	510	74800

4.2. FUNCIÓN QUE DEPENDE DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CARBÓN (FE₂)

Existe una relación directa entre la inflamabilidad de los depósitos de polvo de carbón y su contenido en

⁵ Environmental engeneering in South African mines; 1989.

materias volátiles, de tal forma que la explosividad de un lecho de polvo de carbón está significativamente correlacionado con su composición química, incluyendo además de las materias volátiles otros datos importantes como son las cenizas, humedad, análisis elemental (carbono e hidrógeno) y azufre.⁶ Dichos parámetros son los que conforman otra función de explosividad, llamado FE_2 .⁷

$$FE_2 = f(C, H, S, W, A, V)$$

Donde C es el porcentaje de carbono, H el porcentaje de hidrógeno, S el porcentaje de azufre, W el porcentaje de humedad residual, A el porcentaje de cenizas y V el porcentaje de materia volátil.

A partir, de estas propiedades químicas se define la función de explosividad FE_2 :

$$FE_2 = -3.055 + 0.0001 (51.69C - 38.96H + 40.73S - 12.40W + 63.76A - 56.90V)$$

La explosividad se reduce por la presencia de sólidos inertes o de agua, pues ambos absorben calor de la reacción de combustión y pueden cubrir las partículas combustibles dificultando el acceso de las radiaciones de calor; sin embargo, el agua tiene otro efecto que es el de dificultar la dispersión del polvo combustible por aumentar su cohesión, mientras que el polvo inerte puede ejercer un efecto químico sobre el proceso de combustión.

Por el contrario, con un incremento en el contenido de volátiles de un carbón, éste se inflama más fácilmente. Si se adiciona polvo inerte al carbón para impedir la explosión; mientras mayor es el contenido de M.V., mayor cantidad de inerte es necesario añadir.

Para carbonos con menos de 12.5% de M.V. el riesgo de explosión es mínimo.

⁶ Estudio de la caracterización de la explosividad de los tipos de polvo; J. García Torrent, 1986

⁷ Estudio de la caracterización de la explosividad de los tipos de polvo; J. García Torrent, 1986.

4.3. CORRELACIÓN ENTRE LAS FUNCIONES DE EXPLOSIVIDAD, FE_1 VS FE_2

En ambas funciones de explosividad se pueden obtener valores positivos o negativos, comprendidos entre -2.0 y +2.0, siendo el carbón más peligroso cuanto más se aproxime al valor -2.0, o sea inferior a él. Sin embargo, pueden obtenerse valores discordantes si el carbón presenta anomalías en su composición (contenidos muy altos o muy bajos de alguna de las variables características del análisis químico).

Existe una correlación del 98% entre las dos funciones de explosividad, es decir la variación de FE_2 explica en un 98% la variación de FE_1 .

$$FE_1 = f(FE_2)$$

En la Figura 2 se muestra la representación de los casos estudiados en términos de estas dos funciones.

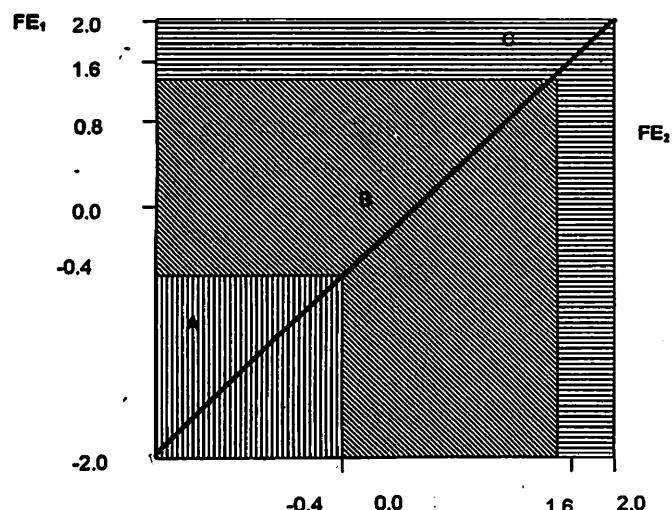


Figura 2 Correlación entre las funciones de explosividad FE_1 vs FE_2 ,

El diagrama puede dividirse en tres zonas: la inferior, A, corresponderá a los carbonos cuyo polvo es muy peligroso; la zona intermedia, B, agrupa a los carbonos con comportamiento medianamente explosivo; en la zona superior, C, se agrupan los carbonos que no presentan riesgos de explosividad.

4.4. ÍNDICE DE EXPLOSIVIDAD. IE₂

Dado que la variable FE_2 puede tomar valores positivos o negativos comprendidos entre -2.0 y +2.0, y además de que el carbón es tanto más peligroso cuanto más se aproxime su FE_2 al valor -2.0, se puede establecer un índice de explosividad más sencillo e intuitivo con valores estrictamente positivos obtenidos a partir de FE_2 , según la expresión:

$$IE_2 = 2.0 - FE_2$$

IE_2 varia entre 0.0 y 4.0, siendo la muestra tanto más peligrosa cuanto mayor sea este valor.

4.5. COEFICIENTE DE EXPLOSIVIDAD KEX

El coeficiente de explosividad se calcula de la siguiente manera:

$$Kex = 4.2M.V.+3$$

Donde, $M.V.$: Porcentaje de materia volátil.

Este coeficiente permite caracterizar el grado de explosividad de los depósitos de polvo de la siguiente manera:

$Kex < 70 \rightarrow$ polvos no explosivos.
 $70 < Kex < 95 \rightarrow$ polvos medianamente explosivos.
 $Kex > 95 \rightarrow$ polvos altamente explosivos.

Para carbonos con altos valores de Kex se requieren bajas concentraciones de polvo en la nube para iniciar una explosión así: Para valores de Kex < 70 la concentración óptima de explosividad es de 450 g/m³, o más; mientras que para valores de Kex > 100, la concentración óptima de explosividad es de 375 g/m³ o menos.

En la Tabla 4 se presentan los índices de explosividad obtenidos para cada una de las muestras analizadas.

Los valores encontrados para la función de explosividad varían entre -0.541 y -0.350, encontrándose en el rango de alta peligrosidad de

acuerdo con la figura 2. Por tanto las minas estudiadas pueden considerarse de alto riesgo de explosión, esto teniendo en cuenta únicamente las propiedades químicas sin tener presentes las condiciones de ventilación y las manifestaciones de grisú.

Los valores más altos corresponden a muestras de carbón fresco.

5. PREVENCIÓN Y CONTROL DE EXPLOSIONES DE POLVO

Existen varios métodos para el control de la producción; concentración y peligro del polvo en suspensión.

5.1. REDUCCIÓN DE LAS FUENTES DE POLVO

La escogencia de un sistema de remoción de polvo está directamente asociado a la distribución de tamaño y a la concentración de las partículas a ser removidas, la velocidad del flujo de aire y la cantidad de polvo admitida a la salida.

5.1.1 Mitigación con agua

El agua se opone al levantamiento del polvo y por su alto grado de evaporación posee un poder extintor, superior en muchos casos, que otros materiales. Se recomienda el uso del agua en minas grisutuosas en las cuales el índice de materias volátiles es superior al 18%.

5.1.2 Riego

El riego se hace mediante un chorro de agua abundante y debe ser prolongado para fijar los polvos y obtener una tasa de humedad mayor al 12%.

El riego se recomienda en aquellos casos en que las condiciones de la mina permiten una humedad suficiente en los depósitos pulverulentos o en las zonas de trabajo que aportan materiales sólidos como sectores cercanos a frentes de explotación, vías de fuertes pendientes etc.

Tabla 4. Resultados de los indices de explosividad

Referencia	FE,	IE,	Kex
M1 m1 PD	-1.100	3.100	142.582
M1 m2 PD	.1072	3.072	142.170
M1 m3 PD	-1.031	3.031	138.631
M1 m4 PD	-1.100	3.100	142.582
M1 m5 PD	-1.001	3.001	140.458
M1 m6 PD	-1.119	3.119	140.338
M1 m7 PD	-0.904	2.904	136.655
M1 m8 PD	-0.903	2.903	137.917
M1 m9 PD	-0.970	2.970	140.415
M1 m10 PD	-0.659	2.659	129.862
M1 m11 PD	-0.645	2.645	127.435
M1 m12 PD	.0985	2.985	139.280
M1 m13 PD	-0.912	2.912	138.089
M1 m14 PD	-0.775	2.775	130.867
M1 m15 PD	-0.795	2.795	134.093
M1 m16 PD	-0.639	2.639	129.170
M1 m17 PD	-0.541	2.541	125.467
M1 m18 PD	-0.559	2.559	125.106
M1 m19 PD	-0.746	2.746	136.302
M1 m20 PD	-0.852	2.852	135.222
M1 m21 PD	-0.738	2.738	133.056
M1 m22 PD	-0.718	2.718	131.841
M1 m23 PD	-0.829	2.829	136.794
M1 m24 PD	-0.568	2.568	130.116
M1 m25 PD	-0.788	2.788	135.846
M1 m26 PD	-0.667	2.667	130.418
M1 m27 PD	-0.749	2.749	133.991
M1 m28 PD	-0.730	2.730	130.593
M1 m291 PD	-0.652	2.652	129.785
M1 m30 PD	-0.740	2.740	130.885
M1 m31 PD	-0.575	2.575	126.682
M1 m32 CF	-2.161	4.161	174.686
M1 m33 CF	-2.121	4.121	169.345
M1 m34 CF	-2.076	4.076	173.048
M1 m35 CF	-2.309	4.309	174.914
M1 m36 CF	-2.350	4.350	174.501
M2 m1 PD	-1.214	3.214	147.750
M2 m2 PD	-1.173	3.173	153.804
M2 m3 PD	-1.636	3.636	167.858
M2 m4 PD	-1.393	3.393	154.777
M2 m5 PD	-1.354	3.354	148.439
M2 m6 PD	-0.908	2.908	136.375
M2 m7 PD	-0.894	2.894	143.274
M2 m8 PD	-0.943	2.943	142.352
M2 m9 PD	-01.281	3.281	150.649
M2 m10 PD	-1.466	3.466	159.445

Tabla 4. Resultados de los índices de explosividad (continuación)

Referencia	FE ₂	IE ₂	Kex
M2 m11 PD	-0.870	2.870	134.817
M2 m12 CF	-2.158	4.158	174.027
M2 m13 CF	-1.811	3.811	167.724
M2 m14 CF	-1.827	3.827	169.527
M2 m15 CF	-1.700	3.700	162.236
M2 m16 CF	-1.591	3.591	160.207
M2 m17 CF	-1.448	3.448	159.924
M3 m1 PD	-1.702	3.702	153.563
M3 m2 PD	-1.562	3.562	150.646
M3 M3 PD	-2.055	4.055	160.438
M3 m4 PD	-1.629	3.629	150.710
M3 m5 PD	-1.365	3.365	142.294
M3 m6 PD	-0.635	2.635	124.948
M3 m7 CF	-2.042	4.042	168.611
M3 m8 CF	-1.727	3.727	153.082
M4 m1 PD	-1.090	3.090	136.518
M4 m2 PD	-1.220	3.220	144.751
M4 m3 PD	-1.281	3.281	148.381
M4 m4 PD	0.728	2.728	130.147
M4 m5 PD	-0.957	2.957	136.151
M4 m6 CF	-2.026	4.026	175.295
M4 m7 CF	-2.090	4.090	172.603

M: mina, m: muestra, PD: polvo depositado, CF: carbón fresco

5.1.3 Aguas en spray

La aplicación de este sistema presenta algunos inconvenientes como son:

- Formación de charcos y de una pesada niebla en la corriente de aire que desperdicia cerca del 30% de agua
- Corrosión de las estructuras y maquinaria que se encuentran allí
- Como su aplicación es permanente, causa molestias a las personas que transitan por el sitio

Este procedimiento no es recomendado en áreas de estratos de techo o pisos débiles o en la proximidad de fallas u otras anomalías.

5.2. SALES HIGROSCÓPICAS

Consiste en fijar el vapor de agua del ambiente sobre los polvos y se recomienda para superficies fuertemente empolvadas procurando que las minas no sean o muy secas o muy húmedas.

Esta técnica presenta los siguientes beneficios:

- Reducen la tensión superficial que adquiere el agua al atomizarse lo cual incrementa la probabilidad de captura de las partículas de polvo
- Aumentan el efecto coagulación cuando las partículas de polvo chocan entre sí

5.1.4 Aspersión con agua

Mediante una perforación se inyecta agua al manto la cual viaja a través de la red de fracturas naturales del carbón, dando como resultado el prehumedecimiento de las partículas de polvo presentes en el manto.

La existencia de un aglomerante tiende a contrarrestar las fuerzas que mantienen a las partículas separadas

Las sales más utilizadas son: pastas, polvos, naclita, lente etc.

El inconveniente principal de las sales es el alto grado de corrosión que se presenta en los sistemas de soporte y en la maquinaria minera.

5.3. VENTILACIÓN

La velocidad mínima de aire necesaria para asegurar una adecuada dispersión de las partículas de polvo es aquella que corresponde al límite inferior del flujo turbulento en las entradas de muchas minas. Esta velocidad crítica es del orden de 0.05 a 0.15 m/s, pero una velocidad mínima de 0.25 a 0.50 m/s puede mantenerse en el frente como un factor de seguridad y se garantiza una oportuna dilución y remoción de los contaminantes.

Con respecto al límite superior, se trata de mantener un máximo de 1.5 a 2.0 m/s en los frentes de trabajo.

5.4. NEUTRALIZACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE POLVO

La neutralización consiste en proyectar y mezclar al polvo de carbón una sustancia pulverulenta no combustible que se ponga en suspensión al mismo tiempo que el polvo de carbón. Si la cantidad es suficiente dentro de la nube formada, impide la propagación de la llama.

El material debe cumplir con:

- Cantidad de estéril suficiente para asegurar una buena protección de los trabajos.
- El material estéril debe dispersarse fácilmente, pero no debe ser tan fino que lo arrastre la corriente de aire de la ventilación.
- Debe tener una calidad apropiada absorbiendo calor para enfriar la llama producida y desprendiendo CO₂ para enrarecer la atmósfera y evitar la propagación de la explosión.

La operación se lleva a cabo mediante un esquistificador y los materiales más usados son arcilla, esquistos, arena, caliza y yeso. Su aplicación depende directamente de las características de cada material.

La frecuencia de neutralización con material estéril se calcula mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{V * C}{Td * A_L}$$

f : Frecuencia de neutralización (días);

V : Volumen de la galería (m³);

C : Concentración medida a partir de Qpd , (g/m³);

Td : Tasa de depositación (g/m²h);

A_L : Área lateral (m²).

5.5. OTRAS TÉCNICAS

5.5.1 BARRERAS DE PROTECCIÓN

Consisten en plataformas en equilibrio inestable colocadas a lo largo de la galería, conformando un mecanismo activo que contrarresta gran variedad de explosiones de polvo en un corto intervalo de tiempo. Éstas derraman en el momento preciso una gran cantidad de un producto extintor con el fin de que la llama encuentre una zona donde su propagación sea imposible.

Cuando se construye una barrera de protección se debe cumplir con las siguientes condiciones:

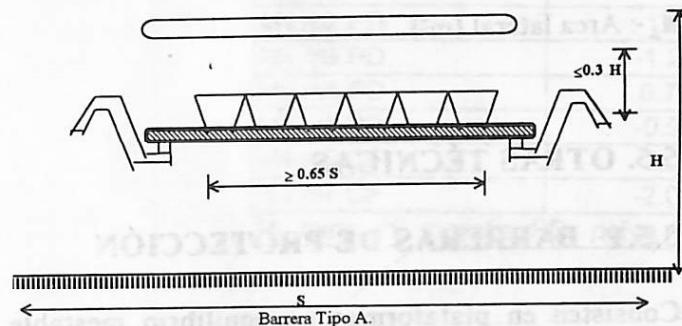
- Simplicidad en el diseño para facilitar su montaje
- Mecanismo apropiado para su fácil accionamiento
- Buena capacidad de dispersión del material estéril
- No debe causar accidentes al personal en caso de su desprendimiento inesperado.

Los tipos de barreras utilizados son los siguientes:

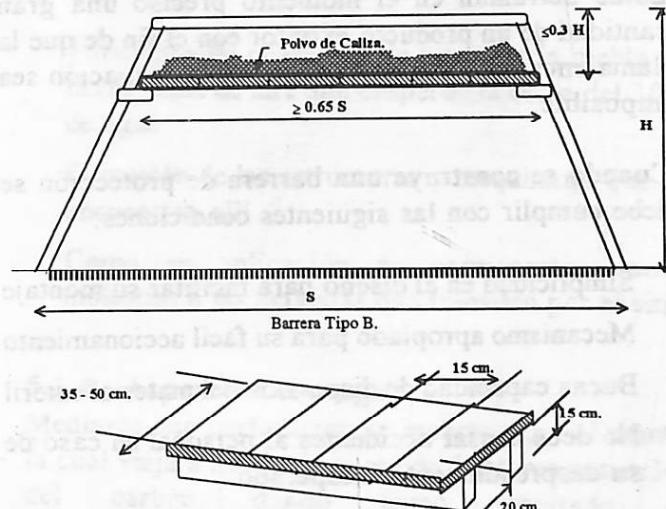
Barreras cerca del techo. La longitud de la barrera no debe ser menor del 65% del máximo ancho de la galería (Figuras 3 y 4).

Barreras en un costado. Son distribuidas hacia un lado de la galería permitiendo el paso de las personas. En las secciones donde se implemente este tipo de barreras, se recomienda reforzar la esquistificación (Figura 5).

Barreras distribuidas en forma sinusoidal. Se distribuyen a lo largo de una galería en forma de onda permitiendo un espacio libre en el centro de la galería para la instalación de maquinaria suspendida en el techo (Figura 6)



*Figura 3. Barreras cerca del techo.
Barreras con cubas de agua*



*Figura 4. Barreras cerca del techo.
Barreras con polvo de caliza*

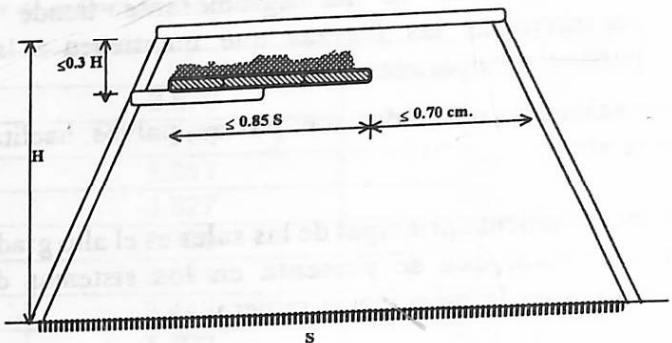


Figura 5. Barreras de Polvo de Caliza , localizadas a los costados de la galería.

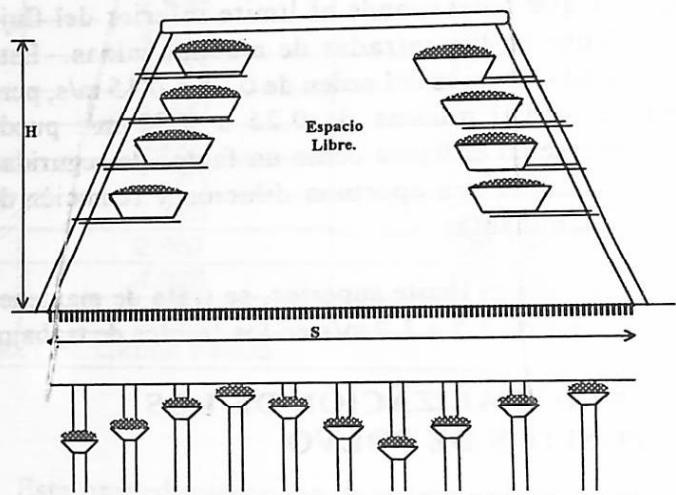


Figura 6. Barreras dispuestas en forma sinusoidal

Las barreras de protección más conocidas y utilizadas son las de polvo estéril, siendo volcadas por el aire que precede a la llama de una explosión de polvo, formando una cortina en una distancia bastante reducida.

Barreras activas de polvo inerte

El polvo inerte tiene dos propósitos cuando es mezclado con el polvo de carbón así:

- Actúa como diluyente inerte cuando la mezcla está suspendida incrementando la distancia entre las partículas de polvo combustible y
- Absorben calor y reducen la posibilidad de que la nube de polvo de carbón se inflame y se propague.

La carga de polvo inerte varía de 30 a 60 kg/m³. Las barreras se disponen a lo largo de la vía cerca una de otra de tal manera que al generarse una explosión, la onda de choque permita la descarga de dicho polvo generando una nube fuertemente concentrada la cual ahoga el frente de llama que se aproxima.

Barreras de agua

Funciona con recipientes que contienen de 40 a 90 litros de agua y son ubicados cruzando la vía y asegurados con soportes en el techo. Se construyen de un material débil que se pueda desintegrar cuando es alcanzado por una onda de choque.

Barreras automáticas y detectores de explosión

La activación de una barrera automática es iniciada por una señal eléctrica desde un mecanismo de detección cerca del área de trabajo donde es más probable una explosión.

Estas barreras consisten en un tanque de agua confinada unido a una serie de boquillas a lo largo de una vía de corta longitud, un diafragma previene el flujo de las boquillas en condiciones normales de operación, al tanque se le adapta una botella de nitrógeno o de CO₂ la cual al calentarse se expande y perfora los discos de las boquillas.

6. CONCLUSIONES

Las muestras que se tomaron en las minas estudiadas son de dos tipos:

- Muestras de polvo de carbón depositado en distintos lugares de las minas, las cuales indican el estado o condiciones bajo las que el polvo está dentro de la mina y la clasifican en cuanto a su grado de explosividad. y
- Muestras de carbón de los frentes de explotación, las cuales son representativas de la calidad del carbón en cuanto a su facilidad de inflamación y severidad de explosión.

En todas las minas se notó un elevado porcentaje de materia volátil de los depósitos de polvo de carbón, parámetro esencial en la caracterización de las minas

como pulverulentas y sumamente aptas a la inflamación.

La no inflamabilidad de los depósitos de polvo de carbón se ve favorecida con el incremento de los contenidos de cenizas y humedad, que es propiciado por la contaminación progresiva de los depósitos con el material desprendido de los respaldos y por el efecto de las aguas subterráneas generadas durante la explotación de los mantos.

La naturaleza del carbón es un factor importante en la inflamación y explosión de los depósitos de polvo de carbón. Así, carbonos de bajo rango (altos en materias volátiles) son mucho más aptos a combustiones de polvo, mientras que los polvos de antracitas se consideran poco explosivos bajo condiciones normales de minería; sin embargo, con una gran energía de iniciación estos polvos bajos en materias volátiles pueden propiciar golpes de polvo. La distribución granulométrica entre las mallas 100 y 270 reportada en los análisis, evidencia el alto riesgo de dispersión de los lechos de polvo de carbón; condición importante para que se genere una nube de polvo susceptible de ser inflamada.

Se puede determinar fundamentalmente el mayor o menor grado de explosividad de un depósito de polvo de carbón por su tamaño de grano y su composición química. Según ésto, para una composición dada, el depósito será más peligroso si es menor su tamaño de grano.

Considerando las minas estudiadas como pulverulentas y teniendo presente las propiedades químicas de los depósitos, pueden enumerarse, en orden de importancia, algunos sitios considerados de alto riesgo para la generación de un golpe de polvo:

- Sitios cercanos a los frentes de explotación, donde los lechos de polvo conservan aún las propiedades del macizo de carbón.
- Vías de retornos de ventilación, donde se presentan velocidades de aire superiores a 3 m/s.
- Alrededores de las descargas de tolvas.
- Niveles principales de transporte.

Los índices, funciones y coeficientes de explosividad calculados para cada una de las muestras obtenidas, coinciden en caracterizar a los depósitos de polvo de carbón de las minas estudiadas como altamente explosivos.

En general, si se alcanzaran localmente las condiciones necesarias para producirse una explosión de una pequeña nube de polvo, de poca importancia, en principio deberá afectar sólo a un pequeño recinto y no ser grave; sin embargo, una explosión primaria genera ondas de presión que favorecen la turbulencia y permiten la puesta en suspensión del polvo depositado, inflamándolo y generando una explosión secundaria cuyos efectos se suman a la generación de explosiones sucesivas de mayor magnitud.

La determinación de cada uno de los parámetros estudiados: porcentaje de materias volátiles, granulometría de los polvos, porcentaje de cenizas, contenido de humedad, dan información de gran valor para distinguir la peligrosidad del carbón, pero estos factores no se pueden evaluar independientemente; cada uno de ellos converge simultáneamente para definir finalmente los posibles riesgos de un determinado depósito de polvo de carbón.

La presencia del metano es un factor que debe considerarse, puesto que este gas junto con una nube de polvo genera una mezcla híbrida que resulta ser más sensible a una explosión.

Según todo lo anterior, se pudo establecer un diagnóstico general para cada una de las minas estudiadas, clasificándolas de acuerdo al grado de peligrosidad de cada una; en orden descendente se tiene:

Mina 1
Mina 2
Mina 3
Mina 4

7. RECOMENDACIONES

Hay que tener un continuo control de la formación de capas de grisú como también de todas las demás fuentes potenciales de inflamación, con el fin de evitar el inicio de una explosión de polvo de carbón. Es de gran importancia realizar mediciones periódicas del polvo que se genera y realizar análisis químicos en dichos polvos, con el fin de mejorar las medidas preventivas.

Cubrir los puntos de transferencia de material, tales como descargas entre bandas y tolvas, para evitar así la propagación del material fragmentado en el momento de la descarga; con la implementación de estas cubiertas se logra reducir en gran medida la formación de depósitos de polvo de carbón alrededor de estos puntos.

Adelantar un estudio de la friabilidad de los carbones de la zona de Amagá - Angelópolis, tendiente a determinar en qué grado influye el método de explotación y los medios de transporte en la generación de polvos con granulometrías capaces de formar depósitos de polvo combustible que puedan ser puestos en suspensión y den origen a un golpe de polvo.

Mantener las condiciones para un efectivo funcionamiento de las barreras, incluso estrechar los vínculos entre el personal de las minas y la universidad con el propósito de optimizar dichos sistemas, además de los ya mencionados para prevenir y controlar una explosión de polvo.

Adelantar procesos de neutralización de los depósitos de polvo.

Crear el ambiente propicio para que en el país se fomenten investigaciones que logren profundizar en el tema de las explosiones de polvo de carbón cuya ocurrencia es destacable dentro de las causas de accidentes, algunos graves, en el laboreo de las minas subterráneas de carbón en todo el país. Lograr financiación económica necesaria para el diseño y perfeccionamiento de equipos con los cuales se puedan determinar parámetros tales como las propiedades físicas de los depósitos de polvo de carbón.

Se debe tratar de establecer unas normas y recomendaciones que encaminen la evaluación de los ensayos de laboratorio para analizar los parámetros de explosividad de los carbones en cualquier laboratorio de un país dado.

El número de muestras a analizar es determinante en la calidad de la información resultante. A mayor número de muestras analizadas, los resultados obtenidos tendrán mayor precisión. Además las correlaciones entre los parámetros de explosividad y las composiciones, así como los porcentajes de incombustible a añadir a un depósito de polvo de carbón podrán determinarse con mayor exactitud cuando se haya estudiado una mayor cantidad de muestras de carbones.

BIBLIOGRAFÍA

Condiciones ambientales de la minería subterránea de carbón en la cuenca Amagá-Angelópolis.
Centro del Carbón, Facultad de Minas,
Universidad Nacional de Colombia Sede
Medellín, 1996.

FACULTAD DE MINAS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

NUEVAS CARRERAS

◆ INGENIERIA DE
SISTEMAS E
INFORMATICA

◆ INGENIERIA
DE CONTROL

Para mayor información marque el número 4 en el desprendible final