



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

**INVESTIGACION DE RIESGOS DE EXPLOSION
EN ATMOSFERAS PULVERULENTAS
CON PRESENCIA DE GASES INFLAMABLES
(MEZCLAS HIBRIDAS)**



MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO

01162

**INVESTIGACIÓN DE RIESGOS DE
EXPLOSIÓN EN ATMÓSFERAS
PULVERULENTAS CON PRESENCIA DE
GASES INFLAMABLES

(MEZCLAS HÍBRIDAS)**

DICIEMBRE, 1992

Este estudio ha sido desarrollado por Javier GarcíaTorrent para el Laboratorio Oficial J.M. Madariaga, en cumplimiento de los trabajos encomendados por el Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

Madrid, 24 de Noviembre de 1992

INDICE

RESUMEN

AGRADECIMIENTOS

1. INTRODUCCION Y ANTECEDENTES

- 1.1. Minas de carbón con grisú
- 1.2. Profundidad de la mina, velocidad de deshulle.
- 1.3. Mecanismos de ignición
- 1.4. Velocidad de llama y distancia de propagación
- 1.5. Parámetros de explosividad
 - 1.5.1. Criterios seguidos para la determinación de parámetros
- 1.6. Indices de explosividad
- 1.7. Experiencias previas
- 1.8. Medidas de prevención y protección
 - 1.8.1. Inyección de agua en el macizo
 - 1.8.2. Fijación del polvo
 - 1.8.3. Prevención de la ignición
 - 1.8.4. Espolvoreo
 - 1.8.5. Barreras

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

- 2.1. Planteamiento y objetivos iniciales
- 2.2. Selección de explotaciones
 - 2.2.1. Zona de León
 - 2.2.2. Zona de Palencia
 - 2.2.3. Programación final de la toma de muestras
- 2.3. Toma de muestras
 - 2.3.1. Pozo Herrera nº2. Hulleras de Sabero
 - 2.3.2. Grupo Peragido. Hullas de Barruelo
 - 2.3.3. Grupo Río. Combustibles de Fabero
 - 2.3.4. Grupo CALderón. Minero Siderúrgica de Ponferrada
 - 2.3.5. Minas de Ventana
 - 2.3.6. Grupo Monasterio. Antracitas de Velilla
 - 2.3.7. Antracitas Montebismo

3. RESULTADOS

- 3.1. Análisis químicos
 - 3.1.1. Análisis elemental
 - 3.1.2. Análisis inmediato
- 3.2. Análisis de modelos
- 3.3. Ensayos de propagación
- 3.4. Análisis de residuos carbonosos
 - 3.4.1. Muestras de polvo de carbón
 - 3.4.2. Concentración de polvo de carbón
 - 3.4.3. Mezclas híbridas
 - 3.4.4. Toma de muestras de polvo explosionado
 - 3.4.5. Preparación de muestras para examen mediante microscopía electrónica de barrido
 - 3.4.6. Microscopio electrónico de barrido
 - 3.4.7. Microfotografías electrónicas
 - 3.4.8. Muestra MH-5
 - 3.4.9. Muestra MH-7
 - 3.4.10. Muestra MH-12
 - 3.4.11. Muestra MH-16
 - 3.4.12. Muestra MH-20
- 3.5. Ensayos de explosividad
 - 3.5.1. Parámetros de explosividad en atmósfera de aire
 - 3.5.2. Parámetros de explosividad de mezclas híbridas
- 3.6. Índices de explosividad
 - 3.6.1. Índices de explosividad en atmósfera de aire
 - 3.6.2. Índices de explosividad en mezclas híbridas
- 3.7. Índices de clasificación
- 3.8. Análisis de los procesos de adsorción
 - 3.8.1. Planteamiento de la experimentación
 - 3.8.2. Primera fase experimental
 - 3.8.3. Segunda fase experimental

4. CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

- ANEXO I: Fotografías de microscopio electrónico de barrido de la muestra MH-5
- ANEXO II: Fotografías de microscopio electrónico de barrido de la muestra MH-7
- ANEXO III: Fotografías de microscopio electrónico de barrido de la muestra MH-12
- ANEXO IV: Fotografías de microscopio electrónico de barrido de la muestra MH-16
- ANEXO V: Fotografías de microscopio electrónico de barrido de la muestra MH-20

RESUMEN

En general, los gases inflamables presentan energías de ignición muy inferiores a las de los polvos combustibles y en los ambientes donde coexisten ambos es lógico pensar que una posible fuente de ignición afecte antes al gas cuando la energía de aquélla supere el umbral de activación de éste. No obstante, para que las cosas sucedan de esta forma, es preciso que la concentración de gas en el aire se encuentre comprendida entre unos ciertos límites, a veces bastante estrechos (5 a 15 % para el metano, por ejemplo).

A veces, ni siquiera el polvo alcanza una concentración suficiente para permitir que se desarrolle la violenta combustión que da lugar a la explosión. Y, sin embargo, la experiencia ha demostrado que ocurren accidentes en emplazamientos donde ni el gas ni el polvo alcanzaban, por separado, una concentración mínima para desencadenar el proceso de explosión.

La explicación de estos hechos reside en la interacción que se produce entre el gas inflamable y el polvo combustible. Cuando ambos aparecen simultáneamente, generan una mezcla híbrida que presenta un comportamiento diferente al de cada uno de los constituyentes. Dependiendo de la afinidad entre estos, lo normal es que la sensibilidad a la inflamación aumente, de forma que la mezcla híbrida suele inflamarse con mucha mayor facilidad, y, además, la severidad de la explosión se agrava, de manera que los efectos o consecuencias de una explosión de una mezcla híbrida son mucho peores que los del gas o el polvo por separado.

En este estudio se ha investigado la influencia del metano sobre los parámetros de explosividad de diferentes carbones procedentes de León y Palencia, se han calculado los índices de explosividad con y sin presencia de metano y se han empleado herramientas de análisis muy diversas para profundizar en el conocimiento de las mezclas híbridas. Entre las técnicas empleadas se encuentran los ensayos de propagación de explosiones y posterior análisis químico de los residuos, el empleo de la microscopía electrónica de barrido para comparar residuos carbonosos antes y después de sufrir la explosión, el análisis de modelos matemáticos de propagación y el estudio de los procesos de adsorción y desorción del metano sobre la estructura del carbón.

AGRADECIMIENTOS

Durante cerca de tres años se han llevado a cabo trabajos en equipo y son muchas las personas, empresas e instituciones que en algún momento han colaborado en el proyecto, contribuyendo a hacer posible el cumplimiento de los objetivos marcados en esta investigación.

Son especialmente destacables las aportaciones de:

- Juan Cantalapiedra Fuchs, que durante la realización de su Tesis Doctoral contribuyó muy eficazmente en el desarrollo de numerosas tareas incluidas en este Proyecto.

- Paz Montes Relanzón, por su infatigable ayuda y su brillante trabajo de modelización numérica de las explosiones.

- Laureano Canoira López, por su valiosa colaboración en el análisis de los residuos de las muestras, tanto mediante técnicas clásicas como novedosas.

- Las empresas mineras: Hulleras de Sabero, Minas de Ventana, Minero Siderúrgica de Ponferrada, Antracitas de Fabero, Hullas de Barruelo, Antracitas Montebismo y Antracitas de Velilla, que dieron todo tipo de facilidades y atenciones.

- Las Jefaturas de Minas de León y Palencia, en particular Raimundo Torío, José Luis García, Alfonso Navas y Luis Beirán, que proporcionaron toda la información de partida necesaria y facilitaron los trámites para las tomas de muestras.

- La Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, que ha dado todo su apoyo para poder llevar a cabo las diferentes tareas de este trabajo.

- El Departamento de Ingeniería Química y Combustibles de la Universidad Politécnica de Madrid que en todo momento ha facilitado su apoyo moral y material para la realización del proyecto.

- Todos los colaboradores del LOM que, de forma más directa, han intervenido en distintas etapas del proyecto, especialmente Mariano Pérez Calleja, Gonzalo Alvarez de Diego y Juan José Arévalo Martínez.

1. INTRODUCCION Y ANTECEDENTES

Se define como mezcla híbrida una mezcla polvo-aire que está en presencia de gases inflamables contenidos en el aire de combustión. Las mezclas híbridas son, por lo tanto, mezclas que tienen una doble procedencia.

No se sabe con certeza quién fue el primer investigador que estudió la influencia de cantidades comparativamente pequeñas de gases o vapores inflamables sobre la inflamabilidad y explosividad de nubes de polvo. Eckhoff menciona los experimentos de C. Engler, en 1885, como posible primera referencia bibliográfica. Este investigador empleó una caja de explosión de madera, de 0,25 m² de sección y 0,5 m de altura; la caja estaba llena de una mezcla de aire y metano, a la concentración deseada. Mediante un alimentador vibratorio, se introducía en la caja por su parte superior una nube de carbón vegetal fino, incapaz de dar lugar a una explosión en aire puro. Engler hizo la interesante observación de que con concentraciones de metano de sólo el 2,5 % en volumen, la nube de carbón vegetal se hacía explosiva, mientras que la mezcla metano/aire, por sí sola, no ardía hasta que la proporción de metano se elevaba hasta el 5,5-6 %.

En la industria minera del carbón, hace tiempo que se conoce la influencia que tiene la presencia de gases inflamables en la explosividad de mezclas polvo de carbón/aire, dado que en las minas de carbón frecuentemente existen pequeñas cantidades de metano en el aire. Se ha visto que esas pequeñas cantidades de metano en el aire aumentaban considerablemente la intensidad y la violencia de las explosiones de polvo de carbón.

Para las técnicas de supresión del riesgo de explosión de polvo, es de gran interés el rango de concentraciones de polvo, cerca de su límite inferior, en presencia de un gas inflamable, con una concentración también por debajo de su límite de explosividad. Por otra parte, en el campo de las técnicas de seguridad, se presta cada vez más atención a estas mezclas híbridas, ya que en ellas el nivel de peligrosidad sufre muchas veces unos cambios significativos, sobre todo en procesos de secado.

Desde el punto de vista del peligro de explosión, en general en las plantas industriales el problema no es tan grave, dado que las regulaciones respecto a higiene permiten solamente cantidades insignificantes de gases y vapores. Una excepción la forman las labores mineras bajo tierra, en las que la concentración admisible de metano puede llegar a ser del 2%, valor que corresponde aproximadamente a la mitad de su límite inferior de explosividad. A pesar de los modernos diseños de sistemas anti-explosión usados en las minas para evitar las explosiones de polvo y de metano, existe el riesgo de que se forme una mezcla híbrida que ésta dé lugar a una explosión.

Pero las minas de carbón no son los únicos sitios en los que existe el riesgo de la formación de mezclas híbridas explosivas. Otros ejemplos muy significativos, que ilustran la importancia de las mezclas híbridas son los procesos de secado de polvos contaminados por disolventes volátiles inflamables, el transporte y almacenamiento de cereales y otros productos orgánicos que desprenden volátiles inflamables, y la separación de monómeros (en general gaseosos) de polímeros en la fabricación de plásticos (por ejemplo, el cloruro de vinilo y el propileno), entre otros.

1.1. Minas de carbón con grisú

El grisú es un gas que, en mayor o en menor cantidad, casi siempre está presente en las minas de carbón, y que ha sido la causa de muchas explosiones, ocasionando un gran número de víctimas.

El grisú es, básicamente, gas metano. Se supone que el metano contenido en el carbón se produjo por descomposición de vegetación al mismo tiempo que se estaban depositando los estratos de carbón.

En la práctica, todas las capas de carbón y la mayoría de los estratos que llevan algo de carbón desprenden metano; se ha llegado a encontrar metano hasta en minas metálicas.

El metano está almacenado en la estructura del carbón. Los mecanismos de adsorción y de desorción todavía no se conocen con exactitud. Lo que sí se sabe, es que el grisú se desprende del carbón por cambios en la presión, por la degradación del carbón y por calentamientos de éste. En general el metano se va desprendiendo de forma continua, pero también son relativamente frecuentes los desprendimientos instantáneos, sobre todo en capas muy grisuosas.

Estos desprendimientos instantáneos son debidos a la liberación de grandes bolsadas de metano que estaban ocluidas en el carbón. Los peligros debidos a estos desprendimientos son evidentes: aparte de que pueden dar lugar a mezclas explosivas aire-metano, ocasionan grandes desprendimientos de carbón, pudiendo llegar a enterrar tanto a la maquinaria como al personal que trabaja en ese lugar.

Debido a su peso específico reducido, el metano tiende a migrar hacia el techo de las galerías, y su difusión a la corriente central es un proceso lento. Por otra parte, el metano tiende a acumularse tanto en cavidades en el techo como en lugares y puntos elevados, y es difícil de detectar en esos casos. La acumulación de metano en esas cavidades en el techo se suele llamar concentración en campana, y ésta suele ser bastante superior a las concentraciones habituales de un taller de explotación.

1.2. Profundidad de la mina, velocidad de deshulle.

Es importante analizar la influencia que tienen tanto la profundidad de la mina como el método de laboreo en la cantidad de grisú que se desprende de una capa de carbón.

La profundidad de la mina es un factor de gran importancia, ya que cuanto mayor sea esta profundidad, mayor será la presión que ejerce el terreno sobre las galerías y mayor será, por tanto, la deformación de éstas. Por otra parte, el grisú está confinado en el carbón bajo presión, y esta presión será tanto mayor cuanto mayor sea la profundidad a la que se encuentra el carbón. De aquí se deduce que cuanto mayor sea la profundidad a la que se encuentra una galería, mayor será la cantidad de grisú que se desprende de la capa de carbón, ya que será mayor la diferencia entre la presión a la que está el aire de la galería (presión atmosférica) y la presión a la que está el grisú contenido en la capa de carbón, por lo que será mayor el flujo de grisú de la capa de carbón a la galería.

Otro factor, mucho más importante que el anterior, que influye en el desprendimiento de grisú, es la velocidad de arranque del carbón. Esta velocidad depende del método de laboreo. Es evidente que cuanto más carbón se arranque por unidad de tiempo, mayor será la cantidad de grisú desprendida. Al aumentar la producción de carbón (referida, naturalmente, a la unidad de tiempo), será mayor el volumen de carbón arrancado de la capa y, teniendo en cuenta que, en general, la cantidad de grisú que contiene una capa está más o menos uniformemente repartida en ella, si no se consideran las acumulaciones o bolsadas puntuales, resulta que la cantidad de grisú que se ha desprendido es mayor. Por otro lado, como ya se expuso anteriormente, el grisú puede desprenderse del carbón por calentamiento de éste. Este hecho puede llegar a ser importante, ya que es de esperar que una máquina que tenga una producción de carbón mayor se caliente más y, por lo tanto, llegue a calentar más al carbón en contacto con ella, es decir: el carbón extraído.

Estos dos hechos explican que en un taller de rozadora, en el que se arranca el carbón a bastante velocidad, haya una mayor producción de grisú que en un taller de testers, en el que la extracción del carbón es mucho más lenta.

En la práctica se puede comprobar que la influencia del método de laboreo en la cantidad de grisú desprendida es mucho mayor que la que tiene la diferencia de presión entre galería y terreno: la cantidad de grisú que se desprende de un taller, cuando en éste no se trabaja, es despreciable en comparación con la que se desprende cuando hay extracción de carbón.

En resumen, aunque hay varios factores que influyen en la cantidad de grisú que se desprende de una capa de carbón, el más importante de todos es la velocidad de arranque del carbón, velocidad que depende directamente del método de laboreo utilizado.

1.3. Mecanismos de ignición

El modelo más sencillo de ignición de una nube de polvo de carbón es la creación, a partir de los productos de devolatilización y descomposición del carbón, de una mezcla explosiva continua.

La presencia de metano en el aire de combustión hace posible:

- a) que se obtengan concentraciones explosivas con menores concentraciones de polvo, es decir: una reducción del límite inferior de explosividad.
- b) que se acorte el retardo en la ignición, aumentando la dinámica de la combustión.

Este modelo permite tratar a las mezclas híbridas de la misma manera que a las mezclas de gases inflamables, por lo que permite aplicar la conocida ley de Le Chatelier para calcular el límite de explosión. En el caso de polvos de carbón, que se caracterizan por una elevada velocidad de descomposición térmica, especialmente cuando la fuente de ignición es muy energética o cuando la velocidad de calentamiento de los granos es muy elevada, este modelo de generación de una mezcla explosiva continua es acertado y, lo que es más importante, describe de manera bastante aproximada el fenómeno de ignición. Este modelo es especialmente válido en el caso de elevadas concentraciones de polvo de carbón en el aire.

Pero se sabe que el mecanismo de ignición de una nube de polvo de carbón, sobre todo si se trata de concentraciones cercanas al límite inferior de explosividad, sigue un curso distinto, que, dicho de paso, es común para otros muchos polvos combustibles. La concentración de productos gaseosos procedentes de la descomposición de granos no necesita llegar al límite inferior de inflamabilidad.

Dependiendo de la velocidad de la descomposición del carbón, estos productos de descomposición, líquidos o gaseosos, pueden quemarse sobre la superficie del grano o en su más próxima vecindad. Teniendo en cuenta la distribución espacial de la materia combustible, la nube de polvo tendrá una estructura discreta.

De acuerdo con el mecanismo de ignición presentado por R. Mitsui y T. Tanaka, lo que decide sobre si se alcanza o no el límite de explosión o, lo que es lo mismo, la propagación de la explosión, es la distribución de temperaturas alrededor de los granos, considerados individualmente, y el tiempo que dura su combustión. Durante esa combustión de los granos debe tener lugar una propagación de la llama a granos vecinos como consecuencia de la transmisión de calor por conductividad y por radiación. Es entonces el campo de temperaturas alrededor del grano el que condiciona la distancia mínima que tiene que existir entre granos para que pueda haber propagación de llama, que es lo mismo que decir que es el campo de temperaturas el que condiciona el límite de explosividad. Solamente un mecanismo de ignición de este tipo puede explicar el que con fuentes de ignición

potentes se hayan obtenido en la práctica límites inferiores de explosividad menores que los calculados termoquímicamente.

La presencia de metano en el aire puede influir en la reducción del límite de explosividad a) al reducir la distancia entre las esferas de granos en fase de combustión b) al aumentar la temperatura de la combustión.

Esta última hipótesis, que es la más probable, sería una consecuencia del papel que juegan los radicales libres en la combustión de hidrocarburos. En una mezcla híbrida se produce la combustión de productos de pirólisis del carbón y del metano. Esta combustión puede tener lugar sobre la superficie de la fase sólida (coque) y sobre la superficie de la esfera gaseosa que rodea al grano sometido a una rápida pirólisis. Teniendo en cuenta la gran actividad de los radicales libres puestos en juego durante la combustión del metano, se puede suponer que la fase sólida del grano adquiere una temperatura más elevada. Esto último se puede comprobar en la práctica haciendo mediciones de temperatura con concentraciones de polvo cercanas al límite inferior de explosividad.

1.4. Velocidad de llama y distancia de propagación

Un comportamiento típico de las mezclas híbridas, y en concreto de las de polvo de carbón-metano, es el aumento de la velocidad máxima de llama al ir aumentando la concentración del gas inflamable.

Para el caso polvo de carbón/metano, los resultados de Lunn, Quince y Brookes demostraron que al aumentar la concentración de metano, la llama viaja a una velocidad mayor, y la región más reactiva en la explosión tiene lugar cada vez más cerca de la fuente de ignición. Con concentraciones elevadas de metano, la velocidad llegó incluso a ser superior a los 2500 m/s, lo que indica que tuvo que tener lugar una relación de combustión muy elevada.

En los ensayos en una galería de 366 metros de longitud se observó una elevadísima relación de combustión entre los 50 y 100 metros. Por otra parte, en ausencia de metano, la velocidad máxima de la llama tenía lugar a 200 metros de la fuente de ignición, pero con concentraciones elevadas de metano esa velocidad máxima llegaba a producirse a tan solo 80 metros del punto de ignición, manteniéndose esa velocidad máxima a lo largo de una gran parte de la longitud total de la galería.

El porcentaje de estéril necesario para impedir la propagación de una explosión es también un parámetro muy importante, ya que por un lado da idea de la facilidad con que un polvo dado propaga una explosión, y, por otra parte, indica la magnitud de las barreras de inerte necesarias si se utiliza esta medida de protección. Damec y Foniok señalan que al ir añadiendo metano al aire, se va ensanchando la proporción de CaCO_3 que hace falta para suprimir la inflamación, llegando a ser superior al 80% para concentraciones de metano por encima del 2%.

1.5. Parámetros de explosividad

Para determinar la posibilidad de explosión del polvo, existen unos parámetros de explosividad medibles según procedimientos de ensayo, algunos de ellos ya normalizados y otros en vías de normalización. Los más importantes se señalan a continuación.

a) Temperatura mínima de inflamación (TMI)

Es la menor temperatura a la que se inicia el proceso de inflamación de una muestra de polvo. Permite determinar si una fuente térmica presente es capaz o no de iniciar el proceso. Puede realizarse el ensayo con la muestra dispersada en forma de nube (TMIn), o depositada en forma de capa.

El aparato de ensayo empleado para la TMIn consiste en un cilindro vertical calentado eléctricamente a una cierta temperatura, en el que se provoca la dispersión del polvo. La aparición de llamas evidencia la inflamación de la muestra a la temperatura fijada.

El dispositivo de ensayo para medir la TMIC consiste en una placa metálica cuya temperatura se puede fijar a voluntad, sobre la que se deposita la muestra. Si la temperatura de ésta supera a la de la placa, se entiende que se ha producido la ignición (no es necesario que aparezcan llamas).

b) Concentración mínima explosiva (CME)

Existe un intervalo de concentraciones de polvo en suspensión para el cual la mezcla aire-polvo es potencialmente explosiva. El límite inferior es la CME.

El método de ensayo tradicional para determinar la CME se basa en el denominado Tubo de Hartmann, que consta de un tubo vertical en el que se produce la dispersión de la muestra de polvo, atravesando un dispositivo de ignición. Cuando se observa llama en el interior del tubo, se estima que se produce la explosión para la concentración teórica obtenida al dividir la cantidad de muestra pesada por el volumen del tubo.

c) Energía mínima de inflamación (EMI)

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

El dispositivo de ensayo es un Tubo de Hartmann. La energía se calcula mediante la expresión $E = \frac{1}{2} C V^2$, donde C es la capacidad de los condensadores empleados en el circuito de descarga y V la tensión aplicada.

Cuanto menores sean los valores que se obtienen en los ensayos de los parámetros a, b y c, mayor es la sensibilidad a la inflamación de la muestra.

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

Durante el proceso de una explosión puede medirse y registrarse la presión que se va alcanzando en el recinto donde aquélla tiene lugar. La presión aumenta sólo moderadamente en los instantes iniciales, para pasar enseguida a alcanzar valores muy altos. Se llama presión máxima de explosión a la presión más alta alcanzada durante el proceso. Puede medirse también la velocidad de variación de la presión. La velocidad promedio y, sobre todo, la velocidad máxima de aumento de presión (gradiente máximo de presión) dan indicación del efecto destructivo de una explosión.

Estos parámetros se determinan en un aparato esférico de 20 litros de capacidad, que tiene la fuente de ignición en su centro geométrico y con un dispositivo de dispersión que asegura una correcta distribución del polvo en el interior de la cuba.

Cuanto mayores sean los valores que se obtienen en los ensayos d, mayor es la severidad de explosión de la muestra.

1.5.1. Criterios seguidos para la determinación de parámetros

En los ensayos realizados para determinar los citados parámetros de explosividad, se han tenido en cuenta las siguientes normas:

- Norma UNE 22.330 "Explosividad de polvo de carbón. Método de ensayo para la determinación de la temperatura mínima de ignición en capa de polvos combustibles".

- Norma UNE 22.331 "Explosividad de polvo de carbón. Método para la toma de muestras".

- Norma UNE 22.333 "Explosividad de polvo de carbón. Método de preparación y ensayos previos de muestras".

- Norma UNE 22.334 "Explosividad de polvo de carbón. Método de ensayo para la determinación de la temperatura mínima de inflamación en nube".

- Norma UNE 22.335 "Explosividad de polvo de carbón. Método de ensayo para la determinación de la concentración mínima explosiva".

- Proyecto de Norma UNE 22.336 "Explosividad de polvo de carbón. Método de ensayo para la determinación de la energía mínima de inflamación".

- Proyecto de Norma UNE 22.338 "Explosividad de polvo de carbón. Método de ensayo para la determinación de la presión y la velocidad de aumento de presión en la cámara esférica de 20 litros".

1.6. Indices de explosividad

Existen diferentes criterios para estudiar la explosividad de los productos pulverulentos combustibles. Algunos de los índices de explosividad más comunmente empleados son los siguientes:

a) Constante característica Kst

Mientras la PME es prácticamente independiente del volumen, V, en el que tiene lugar la explosión, se ha comprobado experimentalmente que la VMAP depende en gran medida de aquél. De hecho, la denominada Ley Cúbica establece una dependencia clara entre estas variables:

$$\left| \frac{dP}{dt} \right|_{\text{máx}} V^{1/3} = Kst$$

Kst es una constante característica de cada tipo de polvo combustible, que se emplea para establecer una clasificación de la explosividad del polvo. Se utiliza frecuentemente para clasificar polvos de productos industriales.

En la siguiente tabla se da la relación existente entre la clase de explosión, la constante característica y la severidad física de la explosión de polvo.

Clase	Kst (bar.m/s)	Característica
St 0	0	No hay explosión
St 1	0 - 200	Explosión débil
St 2	200 - 300	Explosión fuerte
St 3	> 300	Expl. muy fuerte

Sin embargo, esta clasificación no es selectiva para los carbones, ya que los valores típicos de (dP/dt) de muy diversos tipos de polvo de carbón conducen todos a la clase St1, asignando a todos ellos una "característica de explosión débil", que no corresponde a la realidad.

Es más adecuado recordar, sencillamente, que cuanto mayores sean los valores de la presión máxima de explosión y de la velocidad máxima de aumento de presión alcanzados por la muestra, más graves serán los efectos o consecuencias esperables en caso de producirse una explosión.

b) Indices de Pittsburgh

Los índices de Pittsburgh comparan los parámetros de explosividad de una determinada muestra de polvo combustible con los del carbón de Pittsburgh, considerado en Estados Unidos como patrón. Existen dos índices: sensibilidad a la inflamación (SI), que se refiere a los parámetros temperatura mínima de inflamación en nube (TMIn), concentración mínima explosiva (CME) y energía mínima de ignición (EMI), y severidad de la explosión (SE), que contrasta los valores de PME y VMAP. Si alguno de los parámetros no se determina (o no se puede determinar porque el correspondiente ensayo no da resultado positivo), el índice no se puede calcular. Los dos índices se multiplican para obtener el índice de explosividad (IE). En la tabla siguiente se recoge la relación entre estos factores.

SI	SE	IE	Riesgo de explosión
< 0,2	< 0,5	< 0,1	Débil
0,2-1,0	0,5-1,0	0,1-1,0	Moderado
1,0-5,0	1,0-2,0	1,0-10	Fuerte
> 5,0	> 2,0	> 10	Severo

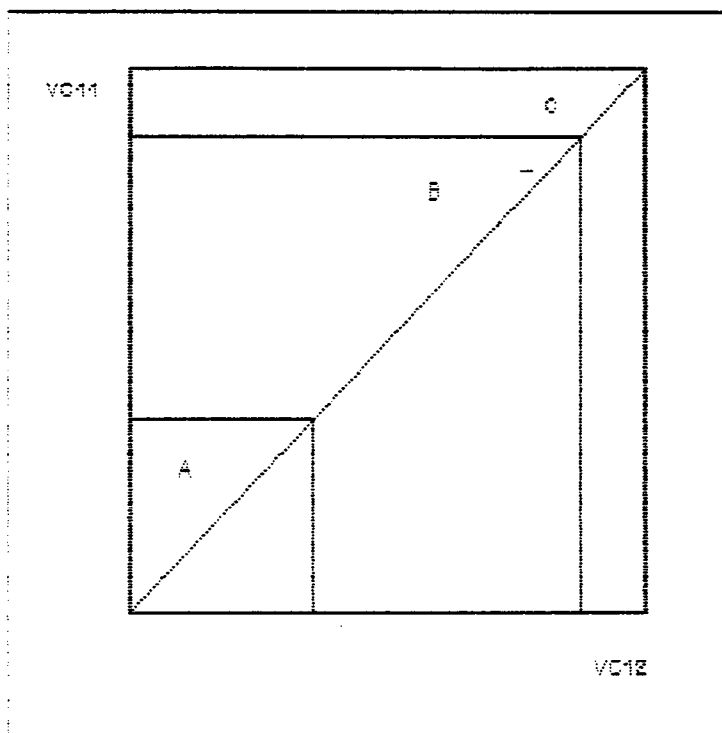
c) Variables canónicas

La experiencia adquirida por el LOM ha permitido desarrollar un método de evaluación del riesgo basado en el hecho de que las variables que se determinan en el laboratorio para caracterizar químicamente un tipo de carbón (análisis elemental y análisis inmediato) están correlacionadas con las variables que caracterizan la explosividad de dicho carbón (parámetros de explosividad). Estos dos conjuntos de variables se pueden agrupar en sendos vectores o variables canónicas (denominadas VC11 y VC12), que no son sino combinaciones lineales de las variables relativas a los análisis químicos y a los parámetros de explosividad, respectivamente. Sus expresiones matemáticas son las siguientes:

$$VC11 = - 1,664 + 1/1000 (1,911 TMI + 0,193 CME + \\ + 0,050 EMI - 0,439 PME - 0,0003 VMAP)$$

$$VC12 = - 3,055 + 1/1000 (51,69 C - 38,96 H + 40,73 S - \\ - 12,40 W + 63,76 A - 56,90 V)$$

En la siguiente figura se representa el diagrama canónico sobre el que se fijarán los valores de VC11 y VC12.



La variable canónica VC11 recoge todos los resultados de los parámetros de explosividad. Constituye, en sí misma, un índice de explosividad.

En muchas ocasiones, VC11 puede remplazarse por VC12. La variable canónica VC12 reúne todas las características del análisis elemental y del inmediato del carbón. Es obvio que el contenido en volátiles lleva un mayor peso sobre VC12 que el resto de las características del carbón. Según el valor que alcance VC12, el polvo de carbón se considera más o menos peligroso. Como consecuencia de un estudio estadístico de valores correspondientes a carbones de diversas procedencias se estableció que los valores VC12=-0,4 y VC12=1,7 marcaban la frontera entre tres tipos de comportamiento del polvo de carbón. De acuerdo con esto, se distinguen tres zonas en el diagrama:

- A = Sensibilidad y severidad elevadas
- B = Sensibilidad y severidad moderadas
- C = Sensibilidad y severidad bajas

Dado que la variable VC11 puede tomar valores positivos o negativos, comprendidos entre -2,0 y +2,0 y, además, el carbón es tanto más peligroso cuanto más se aproxime su VC11 al valor -2,0, se puede establecer un índice de explosividad más sencillo e intuitivo, con valores exclusivamente positivos, obtenido a partir de VC11 según la expresión:

$$\text{Índice canónico de explosividad} = 2,0 - VC11$$

es decir,

$$\text{Ind. Can. Expl.} = 3,664 - 1/1000 (1,911 \text{ TMI} + 0,193 \text{ CME} + 0,050 \text{ EMI} - 0,439 \text{ PME} - 0,0003 \text{ VMAP})$$

con lo que este índice canónico varía entre 0,0 y 4,0, siendo la muestra tanto más peligrosa cuanto mayor sea dicho índice.

Es posible, además, calcular de forma teórica el porcentaje de material incombustible (tipo caliza) que se precisaría agregar a cada carbón que se encuentre sobre las zonas A o B para llevarlo hasta la "zona segura" C, es decir, para inertizarlo. La experiencia ha demostrado que se obtiene muy buena concordancia entre los valores calculados teóricamente y los determinados de forma experimental en el laboratorio y a escala real en galerías.

1.7. Experiencias previas

El Laboratorio Oficial J.M. Madariaga ha realizado numerosas determinaciones de parámetros de explosividad sobre muestras de carbones de distintos tipos y procedencias. Antes de comenzar el estudio incluido en este Proyecto, se realizaron algunos ensayos de explosividad sobre muestras híbridasaire-metano-polvo de carbón, observándose la influencia de cantidades crecientes de metano sobre la explosividad de los carbones.

Como ejemplo, en las tres tablas siguientes se recogen los resultados obtenidos en la determinación de los parámetros de explosividad de tres muestras de polvo de carbón. La denominada TER procede de la cuenca de lignito de la zona de Teruel. La muestra AST pertenece a la cuenca hullera de Asturias. Finalmente, la muestra PIT corresponde a carbón de Pittsburgh, procedente de Estados Unidos.

- Muestra TER

PARAMETRO	0 % CH4	1 % CH4	2 % CH4	3 % CH4
TMI	470	470	470	470
CME	60	40	30	30
EMI	100	80	30	20
PME	8.1	8.1	7.9	7.9
VMAP	365	423	443	485

- Muestra AST

PARAMETRO	0 % CH4	1 % CH4	2 % CH4	3 % CH4
TMI	560	560	560	560
CME	50	50	30	30
EMI	60	20	5	1
PME	6.9	7.9	7.8	9.0
VMAP	328	340	380	428

• Muestra PIT

PARAMETRO	0 % CH4	1 % CH4	2 % CH4	3 % CH4
TMI	580	560	560	560
CME	50	40	40	30
EMI	40	30	20	5
PME	6.8	7.7	7.9	8.7
VMAP	305	328	428	475

NOTA:

TMI = Temperatura mínima de inflamación en nube (°C).

CME = Concentración mínima explosiva (g/m^3).

EMI = Energía mínima de inflamación (mJ).

PME = Presión máxima de explosión (bar).

VMAP = Velocidad máxima de aumento de presión (bar/s).

Como puede observarse, en general disminuyen los valores de los parámetros TMI, CME y EMI, y aumentan los de PME y VMAP, es decir, se produce un incremento en la sensibilidad a la ignición y en la severidad de la explosión al aumentar el porcentaje de gas inflamable en el aire ambiente.

Si se calculan los índices de Pittsburgh en función de estos parámetros de explosividad, se observa el aumento de tales índices al incrementarse la cantidad de metano presente en la atmósfera, como puede verse en la siguiente tabla que recoge el valor del Índice de Explosividad IE.

CARBON	0 % CH4 IE	1 % CH4 IE	2 % CH4 IE	3 % CH4 IE
TER	0.56	1.36	4.59	7.79
AST	0.77	2.73	19.32	131.10
PIT	1.00	2.04	4.16	27.60

También puede calcularse el valor de la constante característica K_{st} en los casos anteriores. Es bien sabido que esta constante puede variar, aunque resulte paradójico. Es realmente constante cuando se mantienen las características del producto (pureza, granulometría, humedad, etc.) y las condiciones del proceso, pero se ve altamente influenciada por variaciones en el punto de inicio de la explosión, en la concentración de polvo, en el grado de desarrollo del fenómeno, en la temperatura y presión iniciales, en la energía del foco de ignición, en la turbulencia, etc. Todo factor que afecte al desarrollo de la onda de presión, modifica el valor de la VMAP y, en consecuencia, la K_{st} se ve alterada.

La presencia de un gas inflamable, aunque sea en bajísimas proporciones, modifica considerablemente el valor de K_{st} , como puede apreciarse en la siguiente tabla.

MUESTRA	0 % CH ₄	1 % CH ₄	2 % CH ₄	3 % CH ₄
TER	99	114	120	131
AST	89	92	103	116
PIT	82	89	116	128

1.8. Medidas de prevención y protección

Antes de describir algunas particularidades de las medidas de prevención y protección contra las explosiones de polvo en la mina, es muy importante destacar cuál debe ser la filosofía de la protección, es decir, cuál es el esquema mental que debe tenerse presente a la hora de diseñar o adoptar una serie de medidas de seguridad.

El planteamiento correcto se debe basar en establecer una sucesión de líneas de defensa contra las explosiones, marcando las prioridades de actuación o los sucesivos pasos que deben seguirse si se quiere obtener una eficacia máxima.

Lo primero que se debe tener en cuenta es limitar la formación de polvo. Cuanto menos polvo se produzca, más difícil será que se alcancen las condiciones de explosión. Sin embargo, a medida que se emplea maquinaria más potente y eficaz, la producción de polvo aumenta.

Por ello, el segundo punto que se debe considerar será la posibilidad de retirar el polvo formado, impidiendo su acumulación. Esto implica una labor continua de mantenimiento, especialmente en los puntos donde más polvo se pueda depositar (planos inclinados, aristas, puntos de carga y transporte, etc.). Con frecuencia es difícil llevar a cabo estas tareas, por lo que será preciso acudir a la tercera línea de defensa: prevenir la dispersabilidad del polvo; al no poder evitar que se acumule, se pueden emplear diversas técnicas (inyección en capa, riego, sales higroscópicas) para impedir que pueda formarse una nube de polvo en suspensión.

Suponiendo que esto no puede conseguirse en su totalidad, es preciso dar el siguiente paso que consistirá en prevenir la posibilidad de ignición de la nube primaria. Esto puede conseguirse mediante el espolvoreo de material incombustible (polvo inerte), que al mezclarse con el polvo de carbón inflamable reduce su riesgo de ignición.

Una vez cubierto este objetivo, o quizá ante la imposibilidad de cumplirlo, puede pensarse en la quinta línea de defensa: prevenir la propagación de la explosión primaria a explosión secundaria. La actuación aquí se refiere al empleo de sistemas que detecten de forma instantánea cualquier inflamación para poner en funcionamiento dispositivos de apagado (descarga de extintores o disparo de barreras activas).

Finalmente, y como última solución, que sólo deberá actuar en caso de fallo de todas las anteriores, será necesario instalar medidas adecuadas para impedir el progreso de explosiones ya desarrolladas (tal es la misión de las barreras de agua y de polvo estéril).

1.8.1. Inyección de agua en el macizo

Este sistema se comenzó a utilizar inicialmente para facilitar el arranque del carbón cuando éste aparecía muy compacto. Sin embargo, pronto se vió que disminuía la producción de polvo, por lo que, en la actualidad, puede considerarse más una medida de prevención que un método de arranque.

La capacidad del carbón para absorber agua es muy variable según los tipos de carbón, composición petrográfica, estado de fracturación, etc., y depende también del tiempo que se esté aplicando la inyección y de la presión del agua. La presión también condiciona el alcance o profundidad a la que puede llegar el agua en la capa de carbón. A medida que nos apartamos del frente y al pasar de la zona fisurada a la microfisurada, se precisa una mayor presión del agua de inyección.

Las formas más habituales de llevar a cabo este método son mediante barrenos cortos perpendiculares al frente, mediante barrenos largos perpendiculares al frente y mediante barrenos largos paralelos al frente.

1.8.2. Fijación del polvo

Puede conseguirse la fijación del polvo por medio del riego de agua. Este procedimiento es barato y sencillo, aunque puede ser poco eficaz, debido a la evaporación del agua, y provoca un aumento de la humedad ambiental de la mina, con el consiguiente perjuicio para el personal y la maquinaria.

Su fundamento es la disminución de la dispersabilidad para evitar las condiciones necesarias para una explosión. Sin embargo, debe decirse que puede resultar incómodo y dificultar las operaciones habituales del laboreo y, además, en el caso de una explosión ya iniciada en otro punto de la mina, se necesitan porcentajes muy elevados de humedad para impedir la propagación de la explosión.

Al agua empleada para el riego, que debe estar exenta de contaminantes bacteriológicos y de partículas en suspensión, se le pueden añadir agentes humidificantes para reducir la tensión superficial y facilitar el mojado del polvo. Estos agentes no deben aumentar la explosividad ni ser perjudiciales para la salud. Los lugares o circunstancias que más demandan su empleo son los frentes con arranque rápido mecanizado o con empleo de explosivos, las zonas de perforación, las operaciones de carga y transporte, los puntos de descarga, llenado y vuelco de vagonetas, transferencia de cintas, extracción, etc.

Otro método para fijar el polvo es el empleo de sales higroscópicas. Estas, corrientemente CaCl_2 y MgCl_2 más agentes humidificantes, proporcionan una disolución aglutinante que llega a formar una especie de costra sobre el polvo depositado, impidiendo así su dispersión.

La acción de las sales higroscópicas es continua y prolongada, pues no se evaporan. Proporcionan, además, un efecto retardador sobre posibles fuegos al impedir el acceso del oxígeno al núcleo de la combustión y tienen efectos beneficiosos para la salud, pues reducen la cantidad de polvo respirable en el ambiente, reducen la humedad del aire y mejoran la visibilidad en algunas ocasiones.

Sus principales inconvenientes son el riesgo de corrosión que originan sobre los metales, los daños que pueden causar a los equipos eléctricos y el requerir la evacuación del personal para su aplicación.

No es utilizable en capas inclinadas, en el tajo y sus inmediaciones ni en lugares con líneas eléctricas. Su eficacia disminuye con la mayor proporción de finos en el carbón o con la menor proporción de estériles. La frecuencia de aplicación varía entre 4 y 6 semanas. Es compatible con el empleo de barreras de agua y con el riego, pero no se recomienda su empleo simultáneo con barreras de polvo ni con técnicas de espolvoreo o inertización con polvo estéril.

El Organismo Permanente de la Comunidad Europea para la Seguridad y la Salud en las Minas reconoce tres modalidades diferentes de empleo de las sales higroscópicas:

a) Pastas. Contienen un 22 % de $Mg Cl_2$ (o entre el 27 % y el 29 % de $Ca Cl_2$), un 1 % de agente humidificador y el resto agua. Se precisan entre 2 kg y 4 kg por metro cuadrado de sección de galería o 20 kg a 60 kg por metro lineal de galería.

b) Polvo. Contiene entre el 81 % y el 85 % de $CaCl_2$, un 3 % de agente humidificador y el resto agua. La primera vez que se emplea se precisan entre 300 g y 500 g por metro cuadrado de sección de galería y entre 200 g y 300 g las veces sucesivas.

c) Escamas. Contienen entre el 76 % y el 78 % de $Ca Cl_2$, un 2 % de agente humidificador y el resto agua. Se precisa entre 1 kg y 4 kg por metro cuadrado de sección de galería y sólo puede dispersarse sobre el suelo de las galerías.

1.8.3. Prevención de la ignición

Debe prestarse especial cuidado al empleo de aparatos y equipos que cumplan los requisitos reglamentarios de seguridad, no sólo en el momento de su puesta en servicio, sino también durante toda su vida útil.

En general, el polvo de carbón precisa mayor energía para inflamarse que el grisú, pero no debe caerse en el error de que una protección adecuada para el gas lo es también para el polvo, pues éste puede introducir riesgos adicionales debidos a su diferente naturaleza.

Las técnicas de control de la ignición implican la identificación de las fuentes de ignición y su eliminación donde eso sea posible. Como ejemplo, a continuación se citan algunas de las medidas de prevención sugeridas para evitar las principales fuentes de ignición:

- **Llamas.** Casi todas las llamas son capaces de inflamar un polvo explosivo. Algunas situaciones típicas son:

- Calentamiento directo con llama. Debe evitarse y sustituirse por calentamiento indirecto.
- Capas de polvo incandescente dispersadas. Las capas pueden aparecer por contacto directo con una superficie caliente y pasar a la atmósfera por vibraciones, sacudidas, choques, etc.
- Cigarrillos u objetos de fumador. Debe prohibirse fumar en las zonas donde exista riesgo de explosión.
- Motores de combustión interna. No deben emplearse en presencia de polvo explosivo. En zonas adyacentes deberán usarse apagachispas en los escapes.
- Llamas de corte y soldadura. Implican restricciones especiales, que se mencionan más adelante.
- Fuegos accidentales. Se trata de un riesgo muy importante, por lo que deben tomarse medidas de precaución especiales. Así, al proceder a su extinción debe evitarse que el polvo combustible pueda entrar en contacto con la llama, evitando que el polvo depositado se ponga en suspensión.

- **Superficies calientes.** El polvo depositado sobre una superficie caliente suele tender a arder, más que a explosionar. Sin embargo, si es puesto en suspensión, es muy probable que se produzca la explosión. Algunas situaciones típicas para la aparición de esta fuente de ignición son las siguientes:

- Recipientes calientes, tales como reactores, digestores, intercambiadores, etc.
- Recintos o recipientes específicamente calentados, tales como hornos o secaderos.
- Equipos de calentamiento o calefacción.
- Maquinaria mecánica. Debe diseñarse para que la disipación de calor sea efectiva y para evitar la acumulación de polvo sobre sus superficies. Las juntas, pasamuros, prensaestopas, cojinetes, etc. deben revisarse periódicamente y cualquier exceso de aceite derramado sobre la superficie debe limpiarse inmediatamente.
- Equipos eléctricos e iluminación. Deben exigirse unos grados de hermeticidad adecuados, que tienen que ser vigilados y comprobados periódicamente.

- **Material incandescente.** Las partículas incandescentes pueden transmitirse a zonas o secciones en las que exista una concentración explosiva de polvo y constituyen, por tanto, una fuente de ignición.

Pueden detectarse mediante equipos especialmente diseñados para ello; normalmente se emplean detectores de radiación.

- Calentamiento espontáneo. El calentamiento puede ocurrir como resultado de reacciones exotérmicas lentas del material con el oxígeno del aire o por reacciones de origen biológico. La ignición se produce cuando la temperatura del material se eleva hasta un nivel tal que el calor liberado por la reacción exotérmica supera al calor perdido hacia el entorno, generándose una reacción en cadena.

- Soldadura y corte. Las operaciones de corte y soldadura producen un calentamiento localizado y generan chispas que son capaces de iniciar las explosiones de polvo. En general, estas operaciones sólo deben autorizarse fuera de la mina, en lugares específicos, después de haber paralizado toda la actividad en la instalación y haber vaciado y limpiado concienzudamente los equipos implicados y sus alrededores.

- Calentamiento por fricción y chispas por impacto. En las siguientes situaciones pueden originarse chispas o calentamientos de energía suficiente para el inicio de una explosión:

- Sobrecarga de material. El polvo puede apelmazarse y bloquear equipos de molienda, tamizado, transporte, etc., originando un calentamiento localizado de la maquinaria.
- Objetos extraños. Pueden aparecer trozos de metal (tornillos, remaches, restos de herramientas, etc.), materiales de mayor dureza o tamaño, piedras, etc. que se introducen en los equipos con el resto del material.
- Averías o roturas en la instalación que producen la caída de componentes en el material procesado.
- Sobre calentamiento de cojinetes por pérdida de materia lubricante o por introducción de polvo.
- Desalineamiento de ejes. Las partes móviles unidas al eje pueden rozar o chocar con otros componentes o con la carcasa.
- Uso inadecuado de herramientas (palas, martillos) con material fácilmente inflamable.
- Reacción ferrítica entre componentes de aluminio, magnesio o titanio al entrar en contacto con herramientas de hierro o acero.
- Rozamiento o fricción de bandas transportadoras.

Es recomendable emplear separadores magnéticos o neumáticos, así como limitar el empleo de materiales capaces de producir la reacción ferrítica.

- Chispas de origen eléctrico. Las chispas generadas durante el funcionamiento normal de contactores, seccionadores, conmutadores, etc., tienen energía suficiente para inflamar algunos polvos combustibles. Los equipos eléctricos deben seleccionarse cuidadosamente, teniendo en cuenta que los modos de protección válidos para gases inflamables no son válidos, en general, para polvos combustibles. Debe evitarse la presencia de equipos eléctricos en los lugares donde exista o pueda existir una nube de polvo. Si eso no es posible, los equipos deben ser estancos al polvo. Si se trata de material no conductor, que no esté presente en forma abundante permanentemente, las envolventes de los equipos deben tener un grado de hermeticidad correspondiente a un IP5xx, mientras que en el caso

contrario (material conductor, polvo abundante) el grado de hermeticidad deberá ser el correspondiente a un IP6xx.

Las situaciones en las que se pueden producir chispas eléctricas son muy variadas, pues toda instalación eléctrica incluye elementos diversos capaces de originar un foco energético, tanto por maniobra rutinaria como por accidente.

- Descargas electrostáticas. Puede esperarse acumulación de cargas eléctricas en cuanto el polvo entra en contacto con una superficie desigual, como por ejemplo, en el mezclado, molienda, tamizado, vertido, micronizado o transporte neumático. La presencia del polvo cargado puede dar lugar a que la carga se transfiera a objetos en contacto con él o se induzca en objetos cercanos. La descarga rápida de la carga acumulada en forma de chispa puede proporcionar una fuente de ignición de suficiente energía como para inflamar una nube de polvo combustible.

Los mayores riesgos debidos a las descargas electrostáticas se asocian a:

- Conductores aislados.
- Recipientes o contenedores metálicos no puestos a tierra.
- Conductos y tuberías aisladas.
- Pequeños componentes metálicos de la instalación.
- Varillas y sondas metálicas.
- Materiales de construcción no conductores (de alta resistividad), incluyendo revestimientos no conductores sobre metales, especialmente cuando están colocados cerca de estructuras metálicas puestas a tierra.
- Polvos de alta resistividad ($> 10^{12} \Omega.m$).

Todas las puestas a tierra deben revisarse regularmente, siendo aconsejable un sistema de inspección monitorizado. Según la inflamabilidad del polvo, deben irse extremando las medidas de precaución. Así, por ejemplo, en la siguiente tabla se citan las recomendaciones enunciadas en la Norma BS 5958:

EMI (mJ)	Comentarios
500	Baja sensibilidad a la ignición. Cuando la energía de ignición está a este nivel, o inferior, se recomienda la puesta a tierra de la instalación y los equipos.
100	Cuando la EMI se encuentra a este nivel, o inferior, se recomienda la puesta a tierra del personal.
25	La mayoría de los accidentes tienen lugar cuando la EMI está por debajo de este valor.
10	Alta sensibilidad a la ignición. Deben preverse restricciones en el uso de materiales no conductores de alta resistividad cuando la EMI se encuentra a este nivel, o inferior.
1	Polvo extremadamente sensible a la ignición. Cuando la EMI se encuentra a este nivel, o inferior, se deben tomar las mismas precauciones que si se tratara de gases o vapores inflamables.

1.8.4. Espolvoreo

Su fundamento es la adición de polvo incombustible al polvo de carbón para impedir que éste propague una explosión. Además de su misión de sumidero de calor, proporciona un apantallado a la radiación del frente de llama y dificulta la difusión del oxígeno. Algunos compuestos empleados modifican la cinética de la combustión, aportando así un efecto adicional.

Los requisitos que debe cumplir el polvo estéril que se va a emplear son los siguientes:

- No ser combustible
- Tener un tamaño de partículas reducido
- No ser aglomerable
- No ser higroscópico
- Ser capaz de dispersarse y permanecer en el aire
- No ser perjudicial para la salud

El polvo inerte debe distribuirse en las zonas cercanas a los posibles focos de ignición (frente de arranque), abarcando longitudes de, al menos 200 m. Debe controlarse mensualmente su efectividad. El espolvoreo es perfectamente compatible con el empleo de barreras de polvo.

En cuanto a la cantidad mínima necesaria, el antiguo reglamento español establecía que éste debía ser superior al 55 % en la mezcla de polvo, en todos los casos. Sin embargo, los reglamentos extranjeros fijan el porcentaje de incombustibles necesarios, de acuerdo con las características de la mina o del carbón.

Así, el reglamento norteamericano exige un 65 % de incombustible, aumentado en un 1 % por cada 0,1 % de grisú presente. Sin embargo, en los retornos de ventilación se requiere un 80 % de incombustibles, aumentado en un 0,4 % por cada 0,1 % de grisú.

Los reglamentos belga e inglés establecen distinto porcentaje de incombustibles según el contenido en volátiles del carbón:

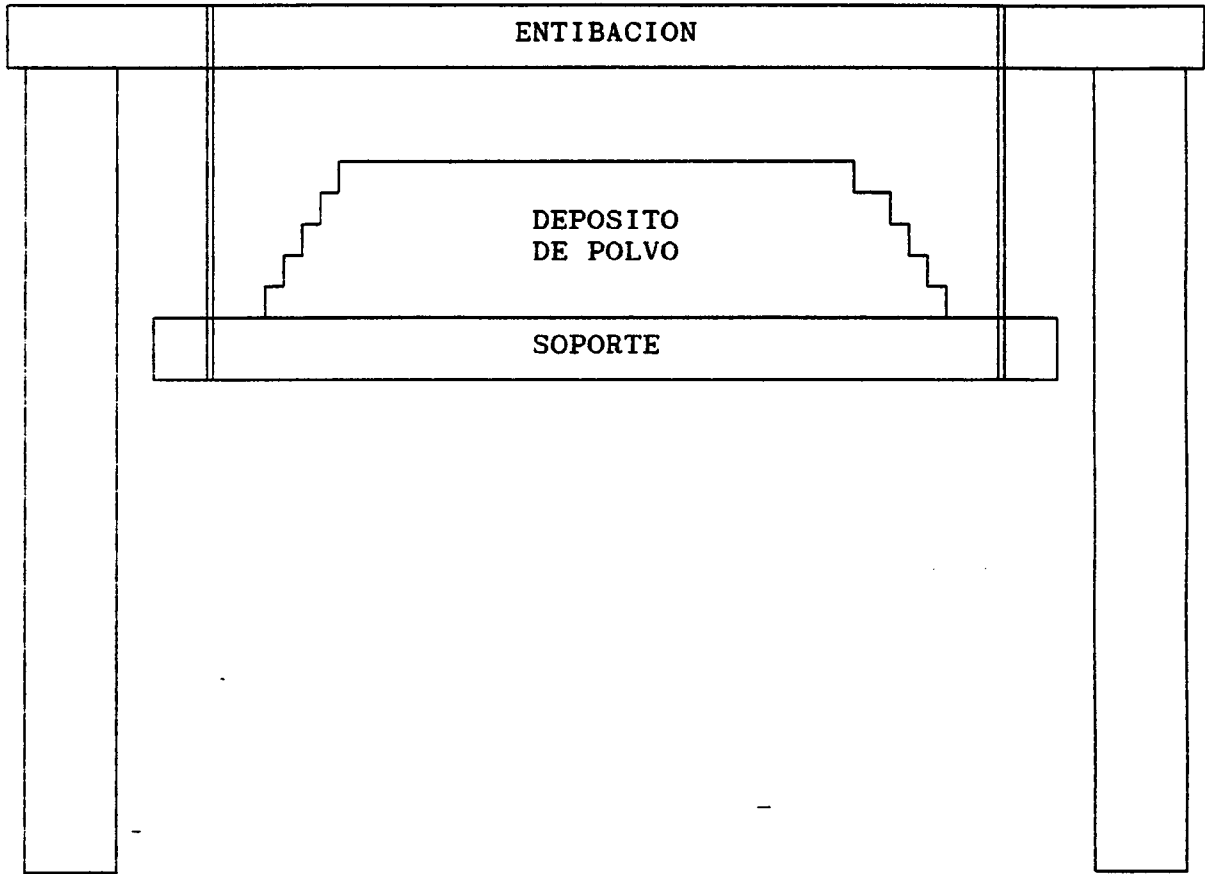
VOLATILES	INCOMBUSTIBLES	
	R. Belga	R. Inglés
14	60	50
15	63	50
16	67	50
17	70	50
18	72	50
19	74	50
20-21	74	55
22-24	76	60
25-26	76	65
27-29	78	68
30-31	78	70
32-35	78	72
>35	78	75

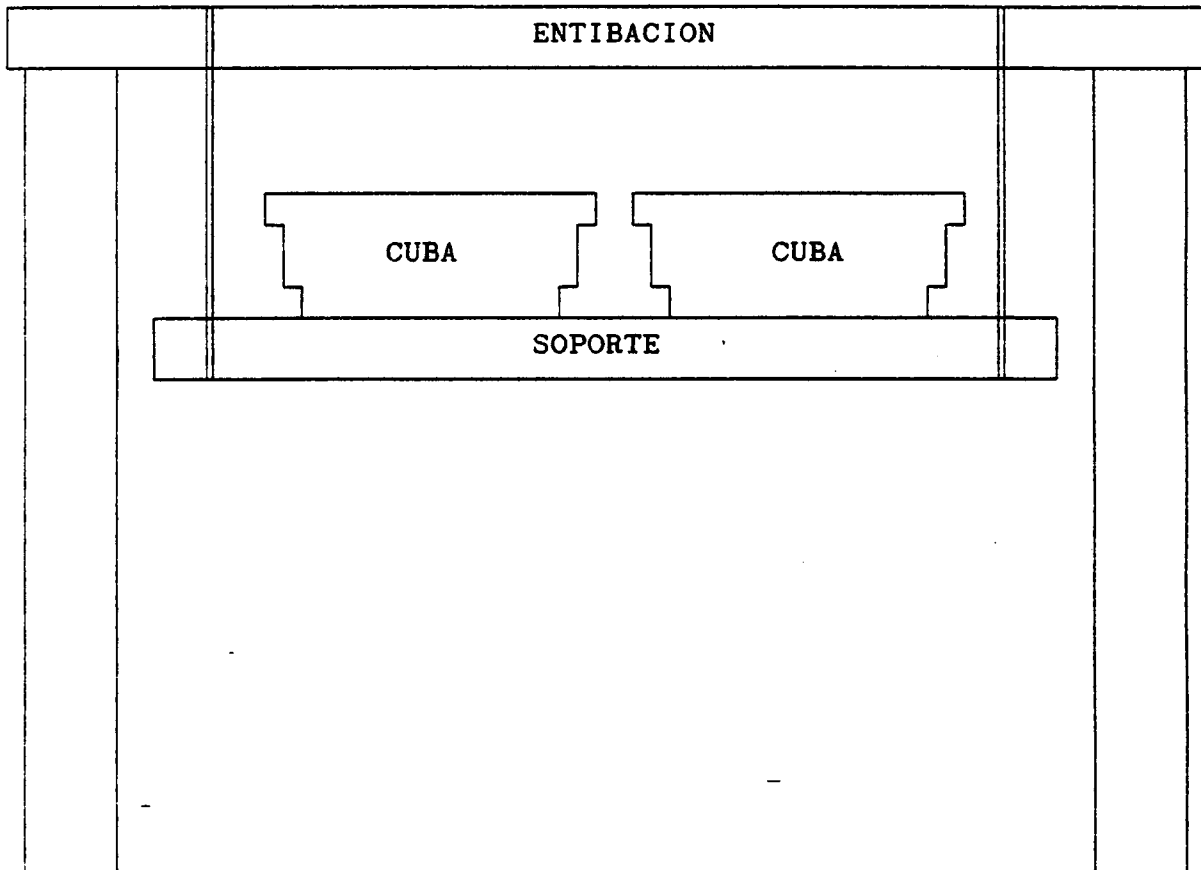
El reglamento francés fija un 55 % de incombustibles si el contenido en volátiles es inferior al 18 % y un 70 % en caso contrario. Sin embargo, esos porcentajes se corrigen en cada caso según las condiciones de grisú, así como por la presencia de barreras.

1.8.5. Barreras

En los momentos iniciales de la explosión se crean un frente de llama y una onda de presión. Esta se desplaza a mayor velocidad que aquél y según se propaga es capaz de levantar el polvo de carbón que se encuentre depositado a lo largo de las galerías de la mina; el frente de llama, que viaja detrás, encuentra unas condiciones propicias para continuar el proceso: el polvo de carbón, de tamaño reducido, ha quedado formando una suspensión en el aire, de forma que las partículas pueden sufrir una combustión casi instantánea, cebando así al frente de llama que continúa propagándose.

Las barreras clásicas de mina consisten en una serie de arcos, concentrados o distribuidos, que soportan cubetas con agua o tableros cargados con polvo inerte, de forma que cuando se produce una explosión, la onda de choque provoca el vuelco de los soportes y se produce una nube de agua o de polvo que consigue apagar el frente de llama que llega unos instantes después. En las siguientes figuras se representan esquemáticamente las barreras de polvo y las de agua, respectivamente.





Existe otro tipo de barrera consistente en el disparo automático de chorros de agua u otro agente extintor, lo que se consigue mediante unos sensores que detectan el paso de la onda de presión o del frente de llama y envían una señal al dispositivo de disparo.

Por tanto, según el tipo de actuación, las barreras se clasifican en pasivas (vuelco) y activas (disparo). Pero también se pueden clasificar según su situación (principales para separar zonas y auxiliares dentro de cada zona), según su geometría (simétricas y asimétricas) o según su disposición (concentradas o repartidas).

En el antiguo reglamento, únicamente se mencionaban las de polvo estéril, con capacidad para 400 kg de polvo por metro cuadrado de sección de galería. Estas deben colocarse en las entradas y salidas de cada zona o cuartel, en las entradas y salidas de cada taller de arranque y en las entradas y salidas de labores de exploración o preparación. La correcta disposición de las barreras de polvo inerte implica situarlas en el tercio superior de la sección transversal de la galería, dejando un espacio de, al menos, 10 cm entre el techo y el polvo; el espesor de la capa de polvo debe ser menor de 25 cm y la plataforma sobre la que se apoya no debe superar los 60 cm.

El Organismo Permanente de la Comunidad Europea para la Seguridad y la Salud en las minas recomienda el empleo de barreras de agua, que presentan como ventajas las siguientes:

- a) El agua no pierde sus propiedades, entre las que cabe incluir sus elevados calores específicos y de vaporización.
- b) Se precisa menor cantidad de agente extintor.
- c) El agua está siempre disponible en la mina, no requiriéndose un transporte específico.
- d) La comprobación y el control del nivel del agua en las cubas son sumamente sencillos, existiendo cubas de plástico transparente provistas de tapadera.
- e) Las cubas de agua son de fácil instalación y adaptación y son del orden de un 30 % más baratas que las de polvo.

En cuanto a los requisitos fundamentales para su empleo, para las barreras del tipo "concentradas" (una barrera está constituida por varios grupos de cubas instalados con una separación de 3 m) se precisan 200 litros de agua por cada metro cuadrado de sección de galería, proporcionando siempre más de 5 litros por metro cúbico; deben instalarse a una distancia comprendida entre 50 y 70 metros de bifurcaciones y cruces y con una separación máxima de 200 m en galerías en capa o 400 m para otras galerías.

Las barreras del tipo "repartidas" deben instalarse conservando una distancia menor de 30 m entre grupos de cubas. Por cada grupo se precisa una cantidad de agua mayor de 1 litro por metro cúbico de galería y, en el caso de bifurcaciones o cruces, la distancia hasta el primer grupo tampoco puede ser mayor de 30 m.

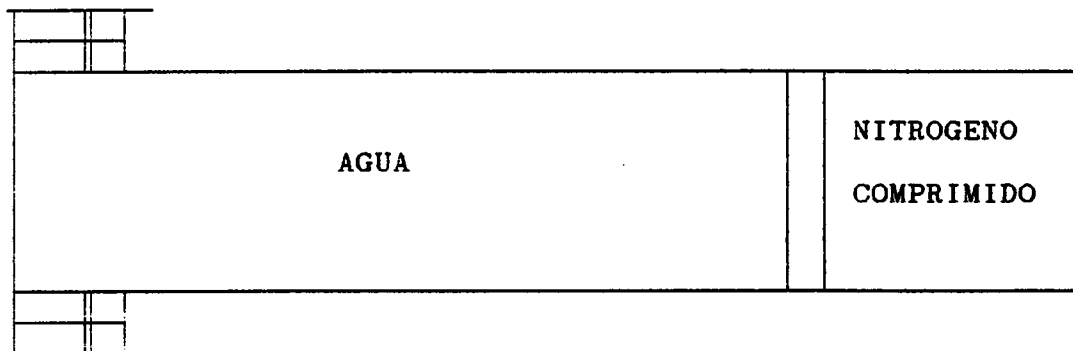
Las barreras pasivas, de tipo vuelco, son las de más sencillo diseño, siendo el mecanismo de activación muy simple. Esto representa una clara ventaja, pero debe tenerse presente que, al ser accionadas por la propia onda de presión de la explosión, el tiempo que transcurre entre la llegada del frente de presión y la del frente de llama se convierte en un parámetro esencial, ya que la dispersión del polvo o del agua debe producirse en el momento adecuado para producir la extinción del frente de llama. Las velocidades del frente de llama y del frente de presión pueden ser muy diferentes entre sí, además de variar considerablemente de unas explosiones a otras; se ha comprobado experimentalmente en galerías de ensayo que esas velocidades dependen, fundamentalmente, de la composición del carbón, de su concentración y granulometría, de la energía iniciadora del proceso y de las condiciones geométricas de la galería. En consecuencia, el tiempo que transcurre entre la dispersión del agente extintor y la llegada del frente de llama puede variar considerablemente de una explosión débil a una violenta.

Para intentar solventar este problema en la medida de lo posible se suele actuar sobre la distancia a la que deben colocarse las barreras; guardando los límites necesarios para que sean operativas, cuanto más cerca se sitúen del posible foco de la explosión, menor será el desfase entre los frentes de presión y llama. Por consiguiente, a medida que se progresa en una guía, por ejemplo, es preciso ir desplazando las barreras hacia el frente.

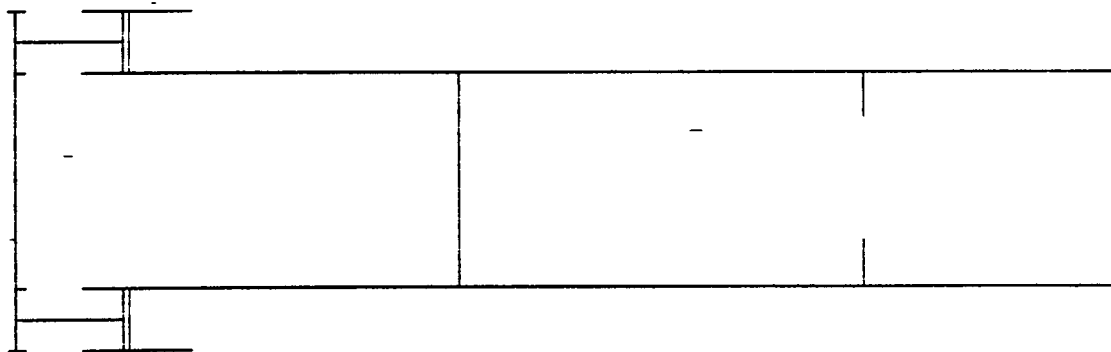
A pesar de todo, se ha comprobado en algunos experimentos que en el caso de explosiones muy débiles, con baja velocidad de propagación, estas barreras pueden resultar totalmente ineficaces por no producirse la adecuada dispersión del polvo o del agua.

Para evitar esos problemas se diseñaron las barreras activas o automáticas. Consisten en una serie de cubas o depósitos cargados con el agente extintor (agua, polvo inerte) que son activados por un dispositivo de dispersión que, a su vez, recibe una señal de disparo procedente de un elemento sensor. Este puede ser sensible a la presión del frente de onda o a la temperatura o la luminosidad del frente de llama; puede tararse convenientemente para que sólo se produzca la activación cuando se supere un cierto umbral, evitando así disparos accidentales intempestivos.

Existen diferentes tipos de barreras automáticas de disparo. Uno de ellos consiste en un cilindro metálico cargado con agua, que tiene en su interior una cantidad de nitrógeno a presión. Cuando el sensor detecta el paso del frente de llama, envía una señal al depósito, produciéndose la rotura de la válvula de retención del gas comprimido, de manera que éste empuja violentamente al agua produciendo su dispersión en forma de cortina o pantalla, capaz de extinguir el frente de llama. En la siguiente figura se representa esquemáticamente su funcionamiento.



a) Depósito antes de la dispersión.



b) Depósito después de la dispersión.

Otro tipo de barreras activas consiste en cubas de PVC para agua convencionales, dotadas de una pequeña carga con un sistema de ignición que se activa al recibir la señal procedente del elemento sensor. Existen sistemas altamente automatizados para el dispositivo de disparo, admitiendo hasta cuatro señales de activación simultáneas o alternativas, dando salida hasta 80 cubas y permitiendo distancias de hasta 500 m entre el elemento sensor y las cubas. Estos dispositivos pueden incorporar sistemas de autocomprobación y monitorización, señales de alarma, conexión para múltiples circuitos de disparo independientes, intervalos entre disparos regulables y baterías de emergencia.

Las denominadas barreras activas belgas conjugan el automatismo con la sencillez. Consisten en cilindros de PVC, con capacidad para unos 100 litros de agua, que llevan adherido, a lo largo de una generatriz, un tramo de cordón detonante antigrisú. Cuando se detecta una explosión, se produce automáticamente la activación de un detonador que inicia el cordón detonante y provoca la rotura del cilindro, con la consiguiente dispersión del agua. Este sencillo dispositivo se ha mostrado altamente eficaz, produciendo el llenado total de la sección de la galería con una cortina de agua en tiempos del orden de 300 ms.

Una de las grandes limitaciones de las barreras es que si bien consiguen detener la propagación de una explosión, lo que puede salvar cientos de vidas, no son eficaces en el tramo comprendido entre el punto de inicio de la explosión y el punto donde ésta resulta extinguida. Se ha comprobado que en el frente de arranque es donde, con mayor frecuencia, suelen iniciarse las explosiones. Y es, precisamente en ese punto, donde suelen estar permanentemente varios operadores, especialmente si el avance está mecanizado.

Para evitar ese fatal inconveniente, se han diseñado sistemas de extinción automáticos que se incorporan a la propia máquina de arranque. Estos sistemas están dotados de sensores que pueden detectar una ignición incipiente e incluso chispas debidas a la fricción entre las picas del minador y las rocas encajantes, del tipo de las areniscas. En caso de producirse tal ignición en el frente, proporcionan una dispersión instantánea de una cortina de agua, u otro agente extintor, asegurando que se produce el apagado de la llama antes de que pueda llegar al maquinista del minador, que suele ser la persona más cercana al foco de la explosión.

Como última medida de protección frente a la propagación de las explosiones, cabe citar las barreras de cierre activas, consistentes en elementos de cierre robustos, tales como compuertas de tipo guillotina, puertas abatibles, etc., que permanecen abiertos durante las operaciones normales en las galerías de la mina, pero que se cierran automáticamente en caso de producirse una explosión. De esta forma se proporciona un importante obstáculo a la onda de presión, que resulta amortiguada, y se evita la propagación de la explosión, ya que estas barreras están diseñadas para soportar elevadas presiones dinámicas.

Como conclusión, puede afirmarse que el proceso que se desarrolla durante las explosiones de polvo de carbón no es aún perfectamente conocido, aunque basándose fundamentalmente en la experiencia adquirida, ha sido posible encontrar medios capaces de eliminar, al menos parcialmente, los riesgos de explosión.

Lo deseable es que no se produzcan las explosiones debido al correcto empleo de medidas preventivas. Sin embargo debe tenerse previsto que pueda ocurrir un accidente; en tales condiciones, cuanto antes se consiga extinguir la explosión, menos daño podrá causar.

2. DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1. Planteamiento y objetivos iniciales

Como consecuencia de los riesgos ofrecidos por las muestras híbridas, que se habían observado tanto en experiencias de laboratorio como en numerosas referencias bibliográficas, se plantea realizar un primer estudio sobre carbones españoles con el fin de cuantificar la influencia sobre la explosividad del carbón de pequeños porcentajes de metano en la atmósfera.

Así, en Junio de 1990 el Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE) encarga al Laboratorio Oficial J.M. Madariaga (LOM) la realización de un proyecto de investigación dentro del Area de Seguridad Minera.

Este proyecto tenía como objetivos el estudio de la influencia de pequeños contenidos de metano en los mecanismos de combustión rápida del polvo de carbón, el análisis de los factores de riesgo mediante la determinación experimental de los parámetros de explosividad, la simulación del proceso de propagación de llama, el estudio de la influencia en la propagación de distintos porcentajes de metano y la adecuación, si se estimaba procedente, de la actual legislación.

La metodología inicialmente propuesta incluía la determinación de los parámetros de explosividad de distintos tipos de carbón con porcentajes de metano comprendidos entre el 0 % y el 5 %, la realización de ensayos de propagación de explosión con medición de diferentes parámetros, el estudio de la influencia de diversas variables sobre las condiciones de propagación y el empleo de instrumentación y dispositivos específicos para la cuantificación de los fenómenos.

2.2. Selección de explotaciones

Inicialmente se centró el estudio en dos importantes zonas productoras de carbón en España, afectadas por la posible existencia de mezclas híbridas: León y Palencia.

El estudio se comenzó estableciendo contacto con las Jefaturas de Minas de las dos provincias, informando de los objetivos de este proyecto y recibiendo información sobre las áreas o explotaciones concretas que pueden presentar mayor interés para los fines de este trabajo.

2.2.1. Zona de León

En la Jefatura de Minas de León se mantuvo una reunión con D. Raimundo Torío y D. José Luis GarcíaGonzález para informarles del Proyecto de Investigación sobre los riesgos debidos a las mezclas híbridas compuestas por polvo de carbón y grisú, contratado por el ITGE al LOM. En dicha reunión se solicitó información sobre la situación actual de las minas de carbón de la provincia de León. Trás analizar las características particulares de las diversas zonas, se seleccionaron las siguientes explotaciones como las más adecuadas para este estudio:

- 1) Hulleras de Sabero, en Sotillos. Hulla con mucho grisú. (3ª Categoría).
- 2) Minas de Ventana, en Pontedo. Antracita poco evolucionada con mucho grisú. (3ª Categoría).
- 3) Minero Siderúrgica de Ponferrada, en Villablino. Cinco grupos mineros con numerosos pozos. Hullas con abundante grisú. (2ª Categoría).
- 4) Antracitas de Fabero, en el Bierzo. Antracita cercana a la hulla, con abundante grisú. (2ª Categoría).

Con esta selección quedaban excluidas muchas explotaciones debido al considerable aumento del número de muestras que supondría el incluir otras minas, pues aún fijando un número bajo de muestras en cada explotación (cinco muestras, por ejemplo) resultarían demasiadas muestras en total.

2.2.2. Zona de Palencia

Continuando con la labor de selección de explotaciones para el muestreo de carbón dentro de este Proyecto de Investigación, se realizó una visita a la Jefatura de Minas de Palencia, donde se mantuvo una reunión con D. Luis Beirán González y D. Alfonso Navas Berrocal. Se les informó del Proyecto y se solicitó información referente a las explotaciones de carbón existentes en la provincia de Palencia, así como sus principales características.

Las siguientes explotaciones se seleccionaron como las más adecuadas para este estudio:

a) Distrito Cervera-Aguilar

- Hullas de Barruelo, en Barruelo de Santullán. Explotación de hulla clasificada, en su día, como de 4ª Categoría.
- Antracitas de Montebismo. Presencia de grisú.
- Minera Palentina. Antracita con grisú.

b) Distrito Cervera-Guardo

- Antracitas del Norte, en Santibáñez de la Peña. Sin grisú.
- Antracitas de Velilla, en Velilla de Guardo. Sin grisú.

Al igual que en la provincia de León, quedaban excluidas otras explotaciones por estar limitado el número de muestras. De las aquí enumeradas, aún era necesario hacer otra selección, pues con el planteamiento inicial no sería posible tomar muestras en todas ellas. Destacaban por su interés Hullas de Barruelo y Antracitas de Velilla.

2.2.3. Programación final de la toma de muestras

Con la información recibida se pudo comprobar que iba a ser necesario hacer una selección muy estricta de las explotaciones que se fueran a visitar para la toma de muestras si no se quería sobrepasar el número total de éstas previsto inicialmente, cifrado en treinta muestras. Analizando las características de cada explotación, el LOM y el ITGE acordaron la siguiente selección y programación de explotaciones:

* LEON

- Sabero..... 5 muestras (Octubre/90)
- Minas de Ventana..... 4 muestras (1^{er} semestre/91)
- MSP Villablino..... 4 muestras (1^{er} semestre/91)
- Fabero..... 4 muestras (1^{er} semestre/91)

* PALENCIA

- Barruelo..... 5 muestras (Noviembre/90)
- A. Montebismo..... 4 muestras (2^o semestre/91)
- Antracitas Velilla... 4 muestras (2^o semestre/91)

Con este planteamiento se respetaban las previsiones iniciales y, simultáneamente, se muestreaban los carbones más interesantes. No cabe duda de que con esta programación quedaban excluidas muchas explotaciones que podrían tener interés. De hecho, sólo se iban a estudiar hullas y antracitas, quedando los lignitos fuera de este estudio. En el proyecto original éstos estaban incluidos; sin embargo, parece más razonable dar cabida a un mayor número de carbones procedentes de zonas más afectadas por la presencia de grisú, habida cuenta de que éste es mucho menos frecuente y abundante en las explotaciones de lignitos.

2.3. Toma de muestras

Siguiendo la programación establecida, se tomaron las muestras que se detallan a continuación

2.3.1. Pozo Herrera nº2. Hulleras de Sabero

El día 3 de Octubre de 1990 se llevó a cabo la primera toma de muestras de carbón para el Proyecto de Investigación sobre mezclas híbridas. La mina elegida, Pozo Herrera No. 2, de Hulleras de Sabero, genera una cantidad importante de grisú, por lo que está clasificada como de 3ª categoría. El carbón está, en general, muy húmedo, debido principalmente al propio método de arranque y transporte, que incluye el agua como materia fundamental (inyección, transporte hidráulico, etc.). Se ha podido constatar el intenso desprendimiento de grisú y la eficacia de la ventilación, así como la presencia de medidas de prevención y protección contra explosiones (empleo de sales higroscópicas y presencia de barreras de agua).

La toma de muestras se efectuó en compañía de los ingenieros de la empresa, D. M. José Camino Llerandi y D. José A. Luengo Nistal. A continuación se describen las cinco muestras tomadas.

ETIQUETA	CARACTERISTICAS	PROCEDENCIA
MH-1	Roza. Húmeda	Capa 4, Nivel 1 Norte. Recorte 7W1 Sur
MH-2	Roza. Húmeda	Capa 4, Nivel 1 Oeste. Recorte 7W1 Sur
MH-3	Roza. Húmeda	Capa 3, Nivel 2 Oeste. Recorte 7W1 Sur
MH-4	Roza. Húmeda	Capa 3, Nivel 3 Oeste. Recorte 7W6 Sur
MH-5	Roza. Seca	Capa 4, Nivel 3 Este. Recorte 7W6 Sur

2.3.2. Grupo Peragido. Hullas de Barruelo

El día 7 de Noviembre de 1990 se llevó a cabo la toma de muestras de carbón en las explotaciones subterráneas de Hullas de Barruelo, S.A. (Grupo Peragido). Se tomaron cinco muestras de carbón procedente de las dos capas en explotación. No se observó acumulación importante de polvo. La toma de muestras se efectuó en compañía de D. Fernando Gómez de Cos y D. José Luis Gutiérrez Robles. Seguidamente se describen las muestras recogidas.

ETIQUETA	CARACTERISTICAS	PROCEDENCIA
MH-6	Roza. Seca	Capa 10. Taller de 1ª a 2ª Planta. 1ª serie de guía cabeza.
MH-7	Roza. Seca	Capa 10. Taller de 1ª a 2ª Planta. 2ª serie de guía cabeza.
MH-8	Roza. Seca	Capa 9. Taller de 1ª a 2ª Planta. 2ª serie de guía cabeza.
MH-9	Roza. Seca	Capa 9. Taller de 1ª a 2ª Planta. 3ª serie de guía cabeza.
MH-10	Roza. Seca	Capa 9. Taller de 1ª a 2ª Planta. 4ª serie de guía cabeza.

2.3.3. Grupo Río. Combustibles de Fabero

El día 16 de Abril de 1991 se realizó la tercera campaña de toma de muestras de carbón, incluida en este Proyecto de Investigación.

En las explotaciones subterráneas de Combustibles de Fabero, S.A. (Grupo Río) se tomaron cuatro muestras de carbón procedentes de una capa que estaba en explotación en aquel momento. No se observó acumulación importante de polvo. La toma de muestras se efectuó en compañía de D. Bernardo Fernández. Seguidamente se describen las muestras recogidas.

ETIQUETA	CARACTERISTICAS	PROCEDENCIA
MH-11	Roza. Húmeda	Avance plano principal, a unos 100 m taller 21. Tomado en vetas (capas 3m)
MH-12	Roza. Húmeda	Taller 21, junto a rozadora. Capa 80 cm. A unos 15 m galería base
MH-13	Roza. Húmeda	Plano inclinado principal. A unos 30 m taller 21. Zona sondeos medición grisú
MH-14	Roza. Húmeda	Taller 21, zona nicho rozadora, a unos 5 m galería de cabeza

2.3.4. Grupo Calderón. Minero Siderúrgica de Ponferrada

En las explotaciones subterráneas de Minero Siderúrgica de Ponferrada, S.A., en Villablino (Grupo Calderón), se tomó el día 17 de Abril de 1991 cuatro muestras de carbón procedentes de dos capas en explotación. Se observaron acumulaciones importantes de polvo, aunque en algunas zonas había gran abundancia de agua. La toma de muestras se efectuó en compañía de D. Alfonso Blanco Palau. Seguidamente se describen las muestras recogidas.

ETIQUETA	CARACTERISTICAS	PROCEDENCIA
MH-15	Roza. Húmeda	Capa 14 Oeste, taller entre plantas cero y primera, a unos 20 m guía cabeza
MH-16	Roza. Húmeda	Capa 14 Oeste, taller entre plantas cero y primera, a unos 15 m guía base
MH-17	Roza. Húmeda	Capa 16 Oeste, taller entre plantas 1ª y 2ª, a unos 30 m planta 1ª (cabeza)
MH-18	Roza. Húmeda	Capa 16 Oeste, taller entre plantas 1ª y 2ª, a unos 10 m planta 2ª (base)

2.3.5. Minas de Ventana

En las explotaciones subterráneas de Minas de Ventana, S.A., en Pontedo se tomaron el día 18 de Abril de 1991 cuatro muestras de carbón procedentes de una capa en explotación. Se observaron acumulaciones importantes de polvo en algunas zonas, aunque en la mayoría de ellas había abundante humedad. La toma de muestras se efectuó en compañía de D. Manuel García Pasamonte. Seguidamente se describen las muestras recogidas.

ETIQUETA	CARACTERISTICAS	PROCEDENCIA
MH-19	Roza. Húmeda	Taller 5º Este, panel P-2, cuarta serie. Nivel cabeza
MH-20	Roza. Húmeda	Taller 5º Este, panel P-2, tercera serie
MH-21	Roza. Húmeda	Taller 5º Este, panel P-2, segunda serie
MH-22	Roza. Húmeda	Taller 5º Este, panel P-2, primera serie. Nivel de base

2.3.6. Grupo Monasterio. Antracitas de Velilla

Con fecha 20 de Noviembre de 1.991 se procedió a tomar cuatro muestras de carbón en las explotaciones de la empresa Antracitas de Velilla, S.A. El muestreo, que se llevó a cabo en compañía del jefe de explotación, D. Ramón García Docio, se centró en el grupo Monasterio, capa Victoria, entre las cotas 183 y 238.

Las muestras tomadas se identificaron de la siguiente forma:

ETIQUETA	CARACTERISTICAS	PROCEDENCIA
MH-23	Roza. Seca	Taller Norte, a unos 5 m del nivel de cabeza.
MH-24	Roza. Seca	Taller Norte, a unos 40 m del nivel de cabeza.
MH-25	Roza. Seca	Taller Sur, a unos 15 m del nivel de base.
MH-26	Roza. Seca	Taller Sur, a unos 50 m del nivel de base.

2.3.7. Antracitas Montebismo

Las condiciones climatológicas impidieron la toma de muestras en Antracitas Montebismo el día 21 de Noviembre de 1991, ya que la mina quedó incomunicada por la nieve durante la campaña de muestreo. No obstante, se recibió información de las características de la mina por parte de su director de labores, D. Ramón Berasátegui, se discutieron los puntos más adecuados para realizar el muestreo y se dieron instrucciones concretas sobre la forma de tomar tales muestras. Estas se recibieron en Diciembre de 1991 y su identificación es la siguiente:

ETIQUETA	CARACTERISTICAS	PROCEDENCIA
MH-27	Roza. Seca	Capa 1ª. Sobreguía 1
MH-28	Roza. Seca	Capa 1ª. Sobreguía 2
MH-29	Roza. Seca	Capa 1ª. Sobreguía 3
MH-30	Roza. Seca	Capa 1ª. Sobreguía 4

3. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los datos obtenidos en las diversas determinaciones experimentales, así como los resultados encontrados en los estudios realizados dentro de este Proyecto de Investigación.

3.1. Análisis químicos

3.1.1. Análisis elemental

MUESTRA	CARBONO (%)	HIDROGENO (%)	AZUFRE (%)
MH-1	70,65	3,50	4,25
MH-2	81,30	4,10	1,45
MH-3	81,65	4,10	1,35
MH-4	74,20	3,85	1,60
MH-5	81,90	4,35	3,45

MUESTRA	CARBONO (%)	HIDROGENO (%)	AZUFRE (%)
MH-6	79,65	4,40	2,20
MH-7	79,41	4,47	2,95
MH-8	79,59	4,55	2,80
MH-9	79,59	4,50	1,80
MH-10	73,52	4,34	1,90

MUESTRA	CARBONO (%)	HIDROGENO (%)	AZUFRE (%)
MH-11	60,70	1,56	4,35
MH-12	55,63	1,48	4,15
MH-13	57,27	1,56	2,00
MH-14	49,13	1,38	4,45

MUESTRA	CARBONO (%)	HIDROGENO (%)	AZUFRE (%)
MH-15	78,28	3,84	0,65
MH-16	70,59	3,48	0,95
MH-17	56,33	2,94	0,65
MH-18	57,74	3,02	0,55

MUESTRA	CARBONO (%)	HIDROGENO (%)	AZUFRE (%)
MH-19	76,85	3,38	0,90
MH-20	75,33	3,22	1,10
MH-21	79,44	3,38	1,10
MH-22	80,04	3,40	1,50

MUESTRA	CARBONO(%)	HIDROGENO(%)	AZUFRE(%)
MH-23	59,50	1,13	0,46
MH-24	58,49	1,07	1,52
MH-25	64,73	1,12	0,79
MH-26	60,16	1,13	0,68

MUESTRA	CARBONO(%)	HIDROGENO(%)	AZUFRE(%)
MH-27	56,90	2,12	2,89
MH-28	57,87	2,19	3,14
MH-29	55,43	2,06	2,77
MH-30	57,89	2,13	3,24

3.1.2. Análisis inmediato

MUESTRA	VOLATILES (%)	CENIZAS (%)	HUMEDAD (%)	CO2 (%)
MH-1	15,90	20,15	0,30	2,42
MH-2	17,65	10,45	0,50	1,77
MH-3	16,60	10,00	0,30	1,68
MH-4	18,60	16,90	0,65	5,33
MH-5	20,95	8,80	0,35	4,08

MUESTRA	VOLATILES (%)	CENIZAS (%)	HUMEDAD (%)	CO2 (%)
MH-6	20,90	9,95	0,75	0,35
MH-7	22,05	9,70	0,45	0,27
MH-8	21,15	9,15	0,55	0,13
MH-9	21,55	9,25	0,55	0,59
MH-10	21,40	15,70	0,45	0,18

MUESTRA	VOLATILES (%)	CENIZAS (%)	HUMEDAD (%)	CO2 (%)
MH-11	5,30	31,90	1,10	1,29
MH-12	7,15	37,10	0,60	3,54
MH-13	6,15	35,40	1,00	1,68
MH-14	5,85	42,35	1,15	4,29

MUESTRA	VOLATILES(%)	CENIZAS(%)	HUMEDAD(%)	CO2(%)
MH-15	12,10	13,05	0,95	2,59
MH-16	10,05	20,75	0,70	2,75
MH-17	10,45	35,70	0,25	2,16
MH-18	9,75	34,35	0,25	2,12

MUESTRA	VOLATILES(%)	CENIZAS(%)	HUMEDAD(%)	CO2(%)
MH-19	10,25	14,35	0,55	3,36
MH-20	9,45	16,60	0,20	2,95
MH-21	9,40	12,20	0,30	2,38
MH-22	9,10	11,90	0,15	2,73

MUESTRA	VOLATILES (%)	CENIZAS (%)	HUMEDAD (%)	CO ₂ (%)
MH-23	7,85	35,40	0,00	4,20
MH-24	7,65	36,00	0,00	4,60
MH-25	8,05	30,45	0,00	2,80
MH-26	10,65	33,60	0,10	1,40

MUESTRA	VOLATILES (%)	CENIZAS (%)	HUMEDAD (%)	CO ₂ (%)
MH-27	10,85	34,25	0,00	2,60
MH-28	11,05	33,15	0,10	2,00
MH-29	11,65	35,75	0,00	2,40
MH-30	10,80	33,15	0,00	3,20

3.2. Análisis de modelos

Se comenzaron los trabajos con una revisión de modelos matemáticos para la modelización de una explosión de polvo de carbón en una galería de mina. En esta fase inicial se iba a utilizar un modelo unidimensional dependiente del tiempo. Se tomó como dimensión la longitud de la galería, que se idealizó como un tubo de sección despreciable respecto a su longitud.

Este modelo dió como resultado valores de diferentes parámetros como, por ejemplo, la temperatura, en los distintos puntos del dominio. Para demostrar la validez del modelo, hubiera sido necesario medir estos parámetros en ensayos reales llevados a cabo en el dispositivo experimental, consistente en un tubo de propagación instalado en la mina experimental de la Escuela de Minas.

Las ecuaciones de la física que se utilizan en el modelo son:

- Ecuaciones de conservación de Euler. Son tres:
 - ecuación de continuidad
 - ecuación de la cantidad de movimiento
 - ecuación de la energía
- Ecuación de la reacción química
- Ecuación de estado

Se introdujeron distintas ecuaciones de estado, así como distintos métodos de aproximación numérica, tanto implícitos como explícitos, de modo que el usuario pudiera optar por la ecuación y método más adecuados.

El sistema diferencial se dividió en dos. Por una parte se trataron las ecuaciones de conservación de Euler y la ecuación de estado, que son las que constituyen el llamado sistema hidrodinámico y, por otra parte, la ecuación de la reacción química. Esto es debido a que en la realidad son más rápidos los fenómenos hidrodinámicos que los químicos.

A estas ecuaciones se les añadieron las condiciones de contorno y las iniciales. El conjunto de estas condiciones son las que individualizan cada problema particular.

Las variables de cálculo que utilizadas fueron la densidad, el momento y la energía. Estas tres variables se suponen independientes.

La longitud total de la galería se dividió en intervalos desiguales por medio de nodos. La distancia entre los mismos varía en cada iteración, de modo que, en cada momento, en el lugar donde se esté produciendo la reacción principal haya una aglomeración de nodos. Así se puede estudiar más detalladamente lo que está sucediendo en ese punto, mientras que en las zonas donde no se esté produciendo la explosión haya menos nodos, ya que no son éstas las zonas de interés.

La modelización numérica del fenómeno es extraordinariamente compleja para el caso de las mezclas híbridas, por lo que fue necesario simplificar el planteamiento y buscar un modelo sencillo de propagación en fase gaseosa homogénea premezclada.

De esta forma se desarrolló¹ un modelo unidimensional que realiza una aproximación numérica mediante la aplicación conjunta de un método de Euler explícito en tiempo y un método combinado de elementos finitos y volúmenes finitos en espacio.

Es indudable que el trabajo realizado tiene una gran importancia y constituye un paso más en el conocimiento del proceso de propagación, ya que las simulaciones que se hacen con el modelo numérico aplicando el código desarrollado conducen a unos valores de variables físicas, que pueden ser medidos en la práctica, dando validez al modelo y permitiendo la comprobación de hipótesis referentes a los fenómenos físicos que tienen lugar en la realidad, en función de las condiciones de contorno más frecuentes en la práctica.

La continuidad de la investigación en este punto pasa a ser una actividad propia de especialistas en análisis y simulación numérica, que podrán aplicar las conclusiones de este estudio para ir complicando sucesivamente el modelo, aplicando nuevas hipótesis y llegando a desarrollar nuevos códigos cada vez más próximos a la realidad física.

Dentro de las actividades incluidas en este proyecto de investigación, referente a la explosividad de mezclas híbridas, se acordó que el objetivo en cuanto al desarrollo de modelos matemáticos estaba totalmente cumplido y que salía del planteamiento inicial de la investigación el continuar abundando en los modelos numéricos.

¹ "Un método explícito de aproximación de la combustión de mezclas gaseosas en una dimensión de espacio". María Paz Montes Relanzón. Proyecto Fin de Carrera. Febrero, 1992.

3.3. Ensayos de propagación

Los ensayos de propagación se realizaron en el dispositivo experimental instalado en la Mina Experimental Marcelo Jorissen, de la E.T.S.I.M.M. Esta metodología experimental, desarrollada por el LOM, no pudo continuar su evolución en el desarrollo de este proyecto, debido a causas totalmente ajenas al ITGE o al LOM. En efecto, la mina fue cerrada para realizar importantes tareas de restauración y fue necesario adelantar los trabajos experimentales previstos y reducir al mínimo el tiempo de utilización de las instalaciones.

Con este planteamiento y para optimizar la experimentación, se decidió de común acuerdo LOM-ITGE llevar a cabo los ensayos con las siguientes muestras de carbón: MH-1, MH-5, MH-7, MH-12, MH-16 y MH-20. En estos ensayos se tomaron muestras de los residuos de carbón resultantes después de la explosión y se realizaron análisis químicos convencionales y análisis mediante microscopía electrónica de barrido.

En los siguientes párrafos se recogen los resultados de los diversos análisis de los residuos de carbón procedentes de los citados ensayos.

3.4. Análisis de residuos carbonosos

3.4.1. Muestras de polvo de carbón

En las series de experimentos realizados se han utilizado muestras de carbón de León y Palencia molidas a $< 74 \mu\text{m}$, cuyos análisis inmediatos se incluyen en la siguiente tabla:

Muestra	Humedad higroscópica	Volátiles	Cenizas
MH5	0,35	20,95	8,8
MH7	0,45	22,05	9,70
MH12	0,60	7,15	37,10
MH16	0,70	10,05	20,75
MH20	0,20	9,45	16,60

3.4.2. Concentración de polvo de carbón

Las concentraciones de polvo de carbón en los ensayos de propagación en el tubo de explosión se variaron entre 500-1500 g/m³. En todos los casos se procedió a dispersar el carbón homogéneamente en toda la longitud del tubo.

El polvo se deposita sobre unas bandejas metálicas que se depositan en el interior del tubo de propagación, en el tercio inferior de la sección del mismo.

3.4.3. Mezclas híbridas

En los estudios de propagación de explosiones de mezclas híbridas-polvo de carbón realizados, la concentración de metano se mantuvo entre el 2,7 % y el 4 % V/V.

3.4.4. Toma de muestras del polvo explosionado

Después de la explosión, se deja que el polvo se deposite en el tubo. Se recoge la máxima cantidad de polvo en cada una de las zonas del tubo, con la ayuda de un pincel y una espátula. En algunos casos, especialmente con bajas concentraciones, casi todo el polvo parece haberse consumido en la explosión, por lo que no existe muestra (o es insignificante) de algunas zonas del tubo.

3.4.5. Preparación de muestras para examen mediante microscopía electrónica de barrido

El polvo de carbón se deposita sobre una capa de grafito coloidal que a su vez está soportada en una portamuestras de aluminio del diámetro adecuado a la cámara de muestras del microscopio.

El empleo de una cinta vinílica adhesiva por ambos lados no resulta satisfactorio ya que para elevado número de aumentos (>2000) el haz electrónico del microscopio daña la cinta.

3.4.6. Microscopio electrónico de barrido

El análisis comparativo de las muestras de polvo de carbón original y polvo de carbón explosionado a distintas longitudes del tubo de explosión mediante microscopía electrónica de barrido suministra información sobre los siguientes aspectos:

- (i) Cambios en el tamaño de los granos y en el aspecto físico de éstos, antes y después de la explosión.
- (ii) Formación de agregados.
- (iii) Aparición de cráteres en los granos explosionados.
- (iv) Formación de cenosferas en el carbón explosionado.

Este estudio comparativo se aborda realizando microfotografía del polvo de carbón original y del polvo de carbón explosionado a distintas longitudes del tubo de explosión, a tres escalas diferentes.

300 micras	<	>	250 aumentos
100 micras	<	>	600 aumentos
30 micras	<	>	2000 aumentos

manteniendo constante este escalado para estudiar los puntos (i), (iv) mencionados antes.

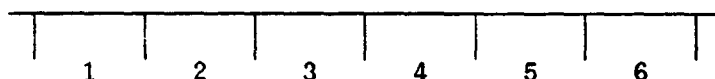
En los análisis de microscopía electrónica de barrido no se han estudiado todas las muestras, sino sólo aquellas que sufrieron una propagación más o menos intensa, teniendo en cuenta la observación visual de los experimentadores.

3.4.7. Microfotografías electrónicas

Se han realizado microfotografías electrónicas de las muestras más interesantes. La clave utilizada para la identificación de las microfotografías es la siguiente:

Carbón	Zona del tubo (1)	Concentración de polvo (g/m^3) $\times 10^{-2}$	Mezcla híbrida
MH5	2	5	M

(1) El tubo de propagación de explosiones del Laboratorio Oficial Madariaga tiene una longitud de 6 m y está dividido en 6 zonas:



3.4.8. Muestra MH-5

La muestra MH-5 sin quemar presenta las características habituales de los polvos de carbón sin explosionar: pequeños tamaños de grano, bordes angulares, ausencia de cráteres, etc. (FOTOS MH-5 del Anexo I).

3.4.8. a) Propagación de MH-5 ($C_m = 500 \text{ g}/\text{m}^3$)

El ensayo de propagación con una concentración de $500 \text{ g}/\text{m}^3$ de polvo en ausencia de metano, propagó - según observación visual - sólo en las dos zonas primeras del tubo. En efecto, las microfotografías de la muestra de la zona 2 del tubo (FOTOS MH5 - 2 - 5) muestran los siguientes hechos:

- i) Los granos después de la explosión son considerablemente mayores en tamaño que antes de la explosión; exhiben en su mayor parte superficies redondeadas en contraste con los bordes angulares y agudos de los granos antes de la explosión.
- ii) Los granos que han sufrido explosión presentan cráteres, y algunos forman cenosferas (FOTOS $\times 246$, $\times 600$ y $\times 1500$ aumentos)

- iii) Algunos granos después de la explosión no resultan afectados, es decir, un pequeño número de granos no ha sufrido explosión (FOTO x 246)
- iv) Los granos implicados en la explosión sufren un rápido calentamiento. La absorción de energía por las partículas provoca un ablandamiento, dando lugar a un estado plástico. La tensión superficial comienza a redondear los bordes y a producir la configuración con mínima energía superficial, que es una esfera (FOTO x 600, ángulo inferior derecho). Si dos de estas partículas entran en contacto, las fuerzas de tensión superficial provocan la adhesión de dichas partículas (FOTO x 2.01 k.). El calentamiento rápido subsiguiente lleva a la salida de las materias volátiles, que se queman, contribuyendo así a la explosión mediante una liberación rápida de energía.

La pérdida de volátiles provoca la formación de cráteres de diferentes tamaños (FOTO x 1,50 k).

El estudio de las muestras procedentes de la zona 6 del tubo (FOTOS MH5 - 6- 5) revela que los granos tienen el mismo aspecto que el polvo de carbón original, lo que confirma el hecho - visualmente observado - de que la propagación no ha alcanzado dicha zona.

3.4.8.b) Propagación de MH-5 ($C_m = 1000 \text{ g/m}^3$)

Se ha llevado a cabo el estudio de propagación de la muestra MH5 con una concentración de polvo de 1000 g/m^3 ; se observó visualmente que la propagación alcanzó sólo la mitad de la zona 2; el estudio de esta zona al microscopio (FOTOS MH5-2-10) revela los cambios anteriormente citados en el aspecto de los granos explosionados, aunque la densidad de granos explosionados es menor; el estudio de la zona 5 reveló que la propagación de la explosión no alcanzó esta zona (FOTOS MH5-5-10).

3.4.8.c) Propagación de MH-5 ($C_m = 500 \text{ g/m}^3$) - METANO

También se ha llevado a cabo el estudio de propagación de la muestra MH5 en presencia de un 2,7% de metano.

La propagación alcanzó a las seis zonas del tubo según observación visual, lo que se confirma mediante estudio por microscopio electrónico de barrido (FOTOS MH5-2-5M, MH5-4-5M y MH5-6-5M).

En este estudio es particularmente destacable la formación de cenosferas (FOTOS x 600), y la asociación de partículas esféricas formando agregados de dos y tres partículas (FOTO MH5-4-5M x 1,49 k y FOTO MH5-6-5M x 1,00 k); la explicación de estos hechos se ha realizado en la sección 3.4.8. a)

3.4.8.d) Estudio de pérdida de materias volátiles

La formación de cráteres se explica por la salida de materias volátiles (sección 3.4.8.a) por lo que se puede correlacionar la formación de dichos cráteres con la disminución de materias volátiles. Para la muestra MH-5 se ha evaluado la variación del contenido en materias volátiles de los granos de carbón explosionados a distintas longitudes del tubo de explosión. En las dos tablas siguientes se muestran los resultados.

MUESTRA	% Materias volátiles (UNE 32.019)
MH5	20,95%
MH5-1-5	21,4%
MH5-2-5	18,4%
MH5-3-5	21,2%
MH5-4-5	20,8%
MH5-5-5	21,1%
MH5-6-5	19,7%

MUESTRA	% Materias volátiles (UNE 32.019)
MH5	20,95%
MH5-1-10	20,2%
MH5-2-10	19,1%
MH5-3-10	19,8%
MH5-4-10	19,7%
MH5-5-10	19,5%
MH5-6-10	20,1%

Para la muestra MH5-2-5, sí se observa una disminución de materias volátiles (-2,55%) y la formación de cráteres; sin embargo, para la muestra MH5-6-5, también se produce una disminución del contenido en volátiles (-1,25%) y no se observa alteración alguna de los granos de carbón al microscopio.

En el caso de la muestra MH5-2-10, también la disminución de materias volátiles (-1,85%) se puede correlacionar con la formación de cráteres, pero la muestra MH5-5-10 presenta una disminución similar del contenido en volátiles (-1,45%) y sin embargo no se observa alteración de los granos al microscopio, indicio inequívoco de ausencia de explosión.

3.4.9. Muestra MH-7

El estudio al microscopio del polvo del carbón MH-7 muestra las características habituales de un polvo de carbón sin explosionar: pequeños tamaños de grano y bordes angulosos y agudos (FOTO MH-7, anexo II).

3.4.9.a) Propagación de MH-7 ($C_m = 500 \text{ g/m}^3$)

Se han estudiado al microscopio muestras procedentes de dos zonas del tubo, al principio (zona 2) y al final del mismo (zona 6). La propagación según observación visual de los experimentadores, alcanzó a toda la longitud del tubo y fué descrita como violenta. En efecto, en ambas zonas se observan todos los cambios descritos en la sección 3.4.8. a) (FOTOS MH7-3-5 y MH-7-6-5).

- a) Aumento del tamaño de los granos y redondeamiento de los mismos.
- b) Formación de cráteres y cenosferas.
- c) Granos que no han explosionado y mantienen su aspecto original (FOTO MH-7-6-5 x 610).
- d) Formación y asociación de granos esféricos (FOTO MH7-3-5 x 1,98 k).

Para esta muestra se ha llevado a cabo el estudio de la variación del contenido en materias volátiles a distintas longitudes del tubo de propagación; los resultados se indican en la siguiente tabla.

MUESTRA	% Materias volátiles (UNE 32.019)
MH7	22,05%
MH7-1-5	muestra insuficiente
MH7-2-5	21,0%
MH7-3-5	19,3%
MH7-4-5	20,3%
MH7-5-5	21,5%
MH7-6-5	21,3%

La muestra MH7-3-5 presenta una disminución de volátiles del 2,75%; sin embargo, la muestra MH7-6-5, tomada al final del tubo, muestra una disminución del contenido en volátiles del 0,75% solamente. El estudio de ambas muestras al microscopio revela sin embargo que las dos muestras han sufrido explosión y tienen aspectos casi idénticos.

3.4.9.b) Propagación de MH-7 ($C_m = 1000 \text{ g/m}^3$)

La observación visual de esta propagación indicó que la propagación se extendió solo a la zona 1 del tubo; sin embargo, el estudio mediante microscopía electrónica reveló que la explosión no había afectado en absoluto a los granos, mostrando estos el aspecto de los granos originales MH7. No se realizaron microfotografías de esta muestra, ya que no presentaba alteraciones.

3.4.9.c) Propagación de MH-7 ($C_m = 1000 \text{ g/m}^3$)- METANO

Este ensayo se realizó con una concentración de metano del 3,5%. La observación visual de la propagación indica que esta se extendió a toda la longitud del tubo de propagación. El estudio mediante microscopía electrónica muestra sin embargo que los granos sólo resultaron afectados en la zona 2, con formación de cráteres, aparición de cenosferas, formación de granos esféricos y aumento de tamaño (FOTOS MH7-2-5). En las zonas 4 y 6 del tubo (FOTOS MH7-4-5 y MH7-6-5) los granos sólo presentan alteraciones superficiales, no observándose los fenómenos descritos en la sección 3.4.8. a) Parece que la explosión en estas zonas fue debida al metano, lo que afectó a los granos de carbón superficialmente, pero no al tamaño y forma de éstos: los granos siguen presentando bordes angulosos y agudos, pero presentan deposición de pequeñas partículas en su superficie.

3.4.10. Muestra MH-12

3.4.10.a) Propagación de MH-12 ($C_m = 500 \text{ g/m}^3$)

El estudio de ésta propagación se llevó a cabo mediante microscopía electrónica, a pesar de que la observación visual indicó que no se había producido propagación. En la zona 4 del tubo de propagación (FOTOS MH12-4-5) se observa la formación de granos esféricos de gran tamaño, señal inequívoca de que se ha producido explosión, aunque la densidad de estos granos explosionados es muy pequeña; la propagación no alcanzó la zona 6 del tubo (FOTO MH12-6-5, anexo III) ya que los granos presentan el aspecto del polvo original.

3.4.10.b) Propagación de MH-12 ($C_m = 500 \text{ g/m}^3$)-METANO

Se ha llevado a cabo la propagación de la muestra MH12 ($C_m = 500 \text{ g/m}^3$) con una concentración de metano del 2,8%. La observación visual indicó que la propagación se había extendido a toda la longitud del tubo. Sin embargo, el estudio por microscopía electrónica revela que sólo aparecen granos explosionados en la zona 2 del tubo (FOTOS MH12-2-5M): granos esféricos de gran tamaño, asociación de granos esféricos (FOTO x 1,09 k), formación de cráteres, también aparecen granos sin explosionar, con bordes angulosos. En las zonas 4 y 6 del tubo, (FOTOS MH12-4-5M y MH12-6-5M), los granos aparecen sin explosionar, con bordes agudos y pequeños tamaños, y sólo algunos presentan una ligera alteración superficial (deposición de pequeñas partículas).

3.4.11. Muestra MH-16

3.4.11.a) Propagación de MH-16 ($C_m = 1500 \text{ g/m}^3$)

Esta muestra no sufrió propagación, según, observación visual de los experimentadores, lo que se confirmó mediante el estudio con el microscopio electrónico (FOTO MH16-2-15, anexo IV); en la fotografía se observa el aspecto normal de un grano de carbón intacto.

3.4.11.b) Propagación de MH-16 ($C_m = 1500 \text{ g/m}^3$)-METANO

Se llevó a cabo el estudio de propagación de esta muestra con un 3% de metano. La observación visual indicó que la propagación se había extendido a todo el tubo; sin embargo, el estudio por microscopía electrónica reveló ausencia de explosión en toda la longitud del tubo, por lo que no se realizaron microfotografías.

3.4.12. Muestra MH-20

3.4.12.a) Propagación de MH-20 ($C_m = 1500 \text{ g/m}^3$)

La muestra MH20 con esta concentración de polvo no sufrió propagación, según se había observado visualmente, y se confirmó posteriormente mediante estudio al microscopio, por lo que no se realizaron microfotografías.

3.4.12.b) Propagación de MH-20 ($C_m = 1500 \text{ g/m}^3$)-METANO

La propagación se efectuó en presencia de una concentración de metano del 2,8%. La observación visual indicó que la propagación se había extendido hasta la zona 2 del tubo; sin embargo, el estudio mediante microscopía electrónica reveló que la explosión no había alcanzado la zona 1 (FOTOS MH20-1-15M, anexo V). Los granos presentan pequeños tamaños y bordes agudos, no observándose ni un sólo grano que presente indicios de haber sufrido explosión.

3.5. Ensayos de explosividad

A continuación se presentan los valores obtenidos en la determinación de los parámetros de explosividad de las treinta muestras estudiadas. En primer lugar se muestran los datos referentes a los ensayos realizados en ausencia de metano, estando los datos agrupados para las siete explotaciones subterráneas muestreadas y, seguidamente, se encuentran los datos de las mismas muestras sometidas a los mismos ensayos, pero bajo atmósfera con presencia de metano.

La indicación ND significa que la muestra no ha resultado inflamada en el ensayo correspondiente. En el caso de las mezclas híbridas, en alguna de las muestras se ha observado indicios de inflamación, sin llegar a desarrollarse la llama; este resultado se indica con las siglas "ND/I".

3.5.1. Parámetros de explosividad en atmósfera de aire

3.5.1. a) Sensibilidad a la ignición

MUESTRA	TMIc (°C)	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-1	ND	580	ND	ND
MH-2	ND	590	ND	ND
MH-3	ND	630	ND	ND
MH-4	320	590	ND	ND
MH-5	320	610	435	16000

MUESTRA	TMIc (°C)	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-6	280	610	186	10000
MH-7	270	560	186	5000
MH-8	280	610	155	8800
MH-9	270	590	373	3800
MH-10	280	610	ND	ND

MUESTRA	TMIc (°C)	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-11	ND	ND	ND	ND
MH-12	ND	ND	ND	ND
MH-13	ND	ND	ND	ND
MH-14	ND	ND	ND	ND

MUESTRA	TMIc (°C)	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-15	ND	560	ND	ND
MH-16	ND	580	ND	ND
MH-17	ND	680	ND	ND
MH-18	ND	710	ND	ND

MUESTRA	TMIc (°C)	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-19	ND	710	ND	ND
MH-20	ND	760	ND	ND
MH-21	ND	690	ND	ND
MH-22	ND	730	ND	ND

MUESTRA	TMIc (°C)	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-23	ND	760	ND	ND
MH-24	ND	810	ND	ND
MH-25	ND	810	ND	ND
MH-26	ND	860	ND	ND

MUESTRA	TMIc (°C)	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-27	ND	830	ND	ND
MH-28	ND	830	ND	ND
MH-29	ND	830	ND	ND
MH-30	ND	830	ND	ND

3.5.1. b) Severidad de la explosión

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-1	5,7	50	13
MH-2	6,4	173	46
MH-3	5,6	68	18
MH-4	5,7	80	21
MH-5	6,5	120	32

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-6	6,9	163	44
MH-7	7,3	173	46
MH-8	7,2	140	38
MH-9	6,8	143	38
MH-10	6,5	110	29

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-11	1,7	28	7
MH-12	1,0	15	4
MH-13	0,3	18	4
MH-14	2,2	15	4

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-15	6,7	188	51
MH-16	5,3	55	14
MH-17	5,2	140	38
MH-18	5,1	98	26

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-19	6,3	65	17
MH-20	6,3	65	17
MH-21	7,6	195	52
MH-22	8,0	85	23

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-23	6,8	63	17
MH-24	6,3	33	8
MH-25	6,6	65	17
MH-26	5,9	48	13

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-27	1,0	30	8
MH-28	5,2	45	12
MH-29	2,4	30	8
MH-30	1,3	30	8

3.5.2. Parámetros de explosividad de mezclas híbridas

Los equipos empleados para la determinación de parámetros de explosividad fueron puestos a punto para realizar los ensayos en presencia de mezclas aire-metano. Se llevaron a cabo unos ensayos preliminares con un porcentaje inicial de CH₄ del 1%, observándose el correcto funcionamiento de los equipos y las primeras variaciones de los resultados al introducir el metano en el aire ambiente. Para el estudio sistemático de las treinta muestras se decidió realizar los ensayos con un 3% de metano. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

3.5.2. a) Sensibilidad a la ignición

MUESTRA	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-1	590	ND	ND
MH-2	590	ND/I	ND/I
MH-3	590	ND/I	ND/I
MH-4	560	ND	ND
MH-5	580	ND/I	14000

MUESTRA	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-6	610	186	16000
MH-7	580	186	4400
MH-8	580	620	7500
MH-9	590	310	4400
MH-10	570	310	12000

MUESTRA	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-11	630	ND	ND
MH-12	660	ND	ND
MH-13	660	ND	ND
MH-14	630	ND	ND

MUESTRA	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-15	590	ND	ND
MH-16	580	ND	ND
MH-17	560	ND	ND
MH-18	630	ND	ND

MUESTRA	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-19	530	ND	ND
MH-20	580	ND	ND
MH-21	580	ND	ND
MH-22	590	ND	ND

MUESTRA	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-23	610	ND	ND
MH-24	610	ND	ND
MH-25	630	ND	ND
MH-26	630	ND	ND

MUESTRA	TMI _n (°C)	CME (g/m ³)	EMI (mJ)
MH-27	650	ND	ND
MH-28	630	ND	ND
MH-29	630	ND	ND
MH-30	630	ND	ND

3.5.2. b) Severidad de la explosión

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-1	7,8	140	38
MH-2	8,3	178	48
MH-3	7,5	140	38
MH-4	7,8	150	40
MH-5	8,5	190	51

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-6	8,5	200	54
MH-7	8,1	213	57
MH-8	8,1	228	61
MH-9	8,2	218	59
MH-10	7,8	145	39

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-11	6,5	63	17
MH-12	4,5	25	6
MH-13	5,7	48	13
MH-14	4,6	23	6

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-15	7,1	118	32
MH-16	7,4	103	27
MH-17	6,3	68	18
MH-18	5,6	45	12

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-19	6,9	85	23
MH-20	7,3	75	20
MH-21	7,2	90	24
MH-22	7,3	123	33

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-23	6,3	50	13
MH-24	6,4	60	16
MH-25	6,7	70	19
MH-26	6,0	60	16

MUESTRA	PME (bar)	VMAP (bar/s)	Kst (bar.m/s)
MH-27	6,0	45	12
MH-28	6,3	53	14
MH-29	6,3	55	14
MH-30	6,9	58	15

3.6. Índices de explosividad

En el apartado 1.6 de este informe se han presentado los diferentes índices de explosividad: la constante característica K_{st} , los índices de Pittsburgh, la variable canónica y el porcentaje de material incombustible que se precisaría agregar al carbón para inertizarlo.

Los valores de K_{st} ya se han mostrado en el apartado 3.5, tanto en el caso de ensayos realizados en aire (apartado 3.5.1. b), como en el caso de mezclas híbridas (apartado 3.5.2. b).

A continuación se relacionan los valores obtenidos para los restantes índices de explosividad, separando de nuevo los obtenidos sobre muestras ensayadas en aire y los obtenidos cuando existe un 3 % de metano en el ambiente.

En el caso de los índices de Pittsburgh sólo aparece el índice de Severidad de la Explosión (SE), ya que al no haber respondido muchas muestras a los ensayos de sensibilidad a la inflamación, el índice de Sensibilidad a la Ignición (SI) no se puede calcular.

3.6.1. Índices de explosividad en atmósfera de aire

MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-1	0,14	0,96	28
MH-2	0,53	0,95	36
MH-3	0,18	1,06	35
MH-4	0,22	0,98	36
MH-5	0,38	0,10	41

MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-6	0,54	-0,27	43
MH-7	0,61	-0,63	44
MH-8	0,49	-0,35	44
MH-9	0,47	-0,58	45
MH-10	0,34	0,98	42

MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-11	0,02	1,75	0
MH-12	0,01	1,78	0
MH-13	0,00	1,81	0
MH-14	0,02	1,73	0

MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-15	0,61	0,88	28
MH-16	0,14	0,98	20
MH-17	0,35	1,17	11
MH-18	0,24	1,23	10

MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-19	0,20	1,18	24
MH-20	0,20	1,28	19
MH-21	0,71	1,08	21
MH-22	0,33	1,15	20

MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-23	0,21	1,26	0
MH-24	0,10	1,38	0
MH-25	0,21	1,36	0
MH-26	0,14	1,49	5

MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-27	0,01	1,65	9
MH-28	0,11	1,46	11
MH-29	0,03	1,58	11
MH-30	0,02	1,63	10

3.6.2. Índices de explosividad en mezclas híbridas

MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-1	0,53	0,89	28
MH-2	0,71	0,86	36
MH-3	0,51	0,90	35
MH-4	0,56	0,83	36
MH-5	0,78	0,73	41

MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-6	0,77	-0,02	45
MH-7	0,83	-0,66	44
MH-8	0,89	-0,42	44
MH-9	0,86	-0,62	45
MH-10	0,55	-0,26	42

MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-11	0,20	1,02	0
MH-12	0,05	1,17	0
MH-13	0,13	1,11	0
MH-14	0,05	1,11	0

MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-15	0,40	0,92	28
MH-16	0,37	0,89	20
MH-17	0,21	0,90	11
MH-18	0,13	1,05	10

MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-19	0,28	0,81	24
MH-20	0,26	0,89	19
MH-21	0,31	0,89	21
MH-22	0,43	0,91	20

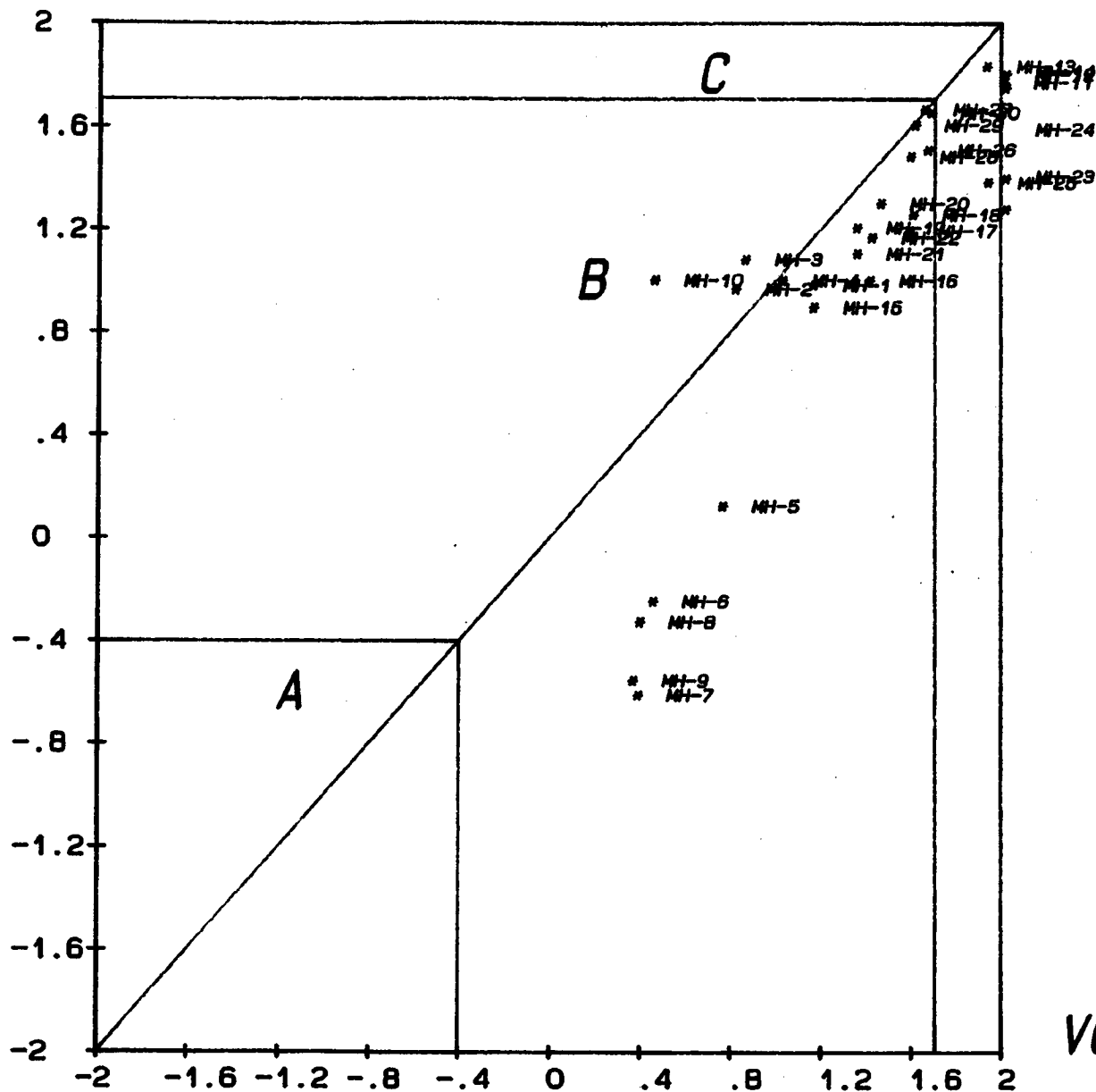
MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-23	0,15	0,99	0
MH-24	0,19	0,99	0
MH-25	0,23	1,01	0
MH-26	0,17	1,04	5

MUESTRA	SE	VC11	X(%)
MH-27	0,13	1,08	9
MH-28	0,16	1,03	11
MH-29	0,17	1,03	11
MH-30	0,19	1,00	10

En las siguientes figuras se muestran los diagramas canónicos de las muestras en los ensayos realizados en aire y en los realizados con metano.

ENSAYOS EN AIRE

VC11



Peticionario:

ITGE

Proyecto:

M. HIBRIDA

Fecha:

NOV/92

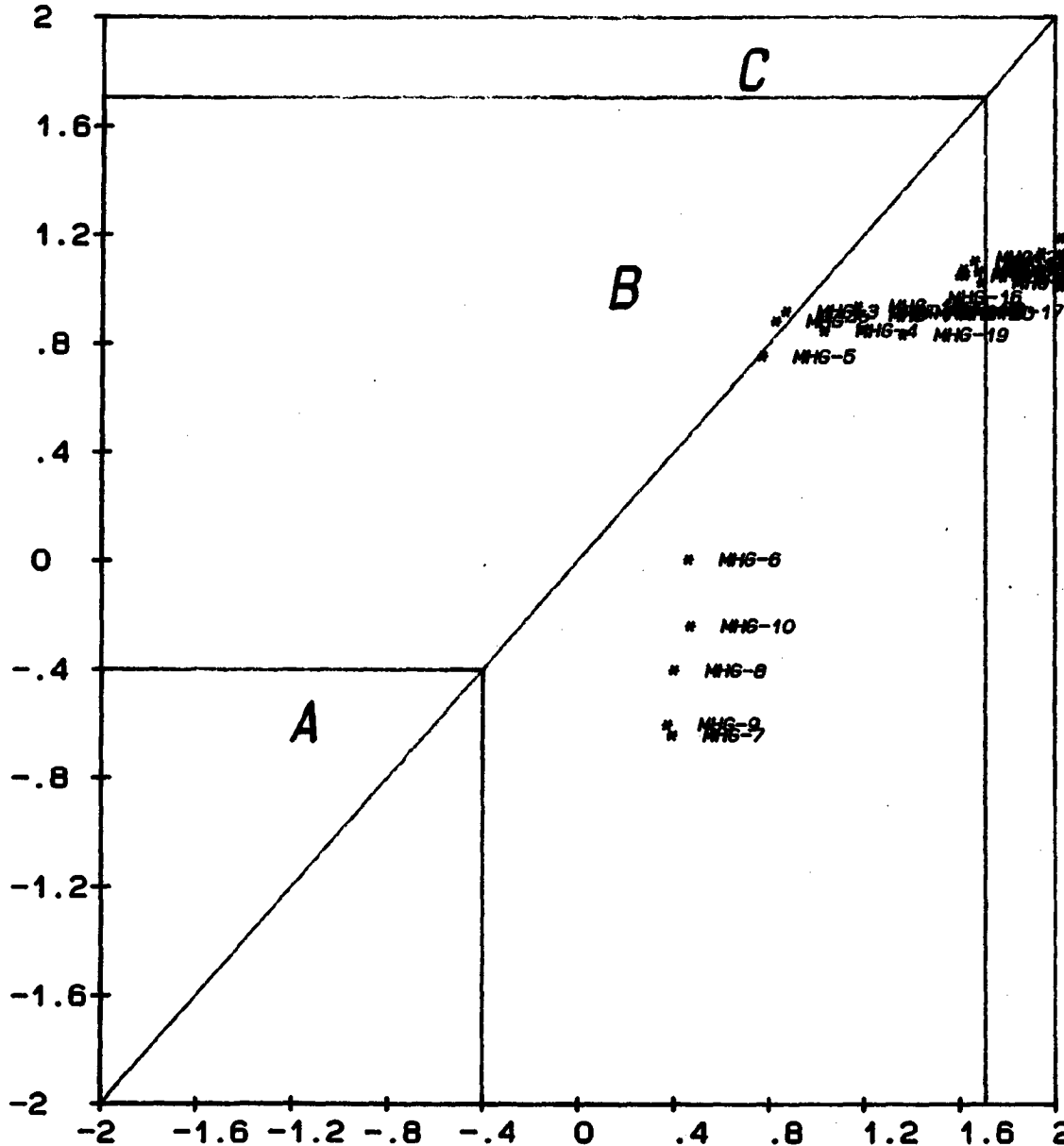
VC12

JGT



ENS. CON METANO

VC11



LOM

Peticionario:

ITGE

Proyecto:

M.HIBRIDA

Fecha:

NOV/92



VC12

JGT

3.7. Índices de clasificación

Según la tendencia actual, para clasificar el riesgo de explosión del carbón hay que tomar en consideración, en primer lugar, el valor del porcentaje de materias volátiles expresado en base seca total exenta de humedad, V_{ssc} . En función de que este valor sea menor de 9, esté comprendido entre 9 y 14 o sea mayor de 14, se establece una primera diferenciación; para establecer las correspondientes categorías es necesario calcular un índice de explosividad, $IE(I)$, basado en la variable canónica de composiciones, $VC12$, descrita en el apartado 1.5. c) de este informe. En algunos casos es necesario, además, calcular un segundo índice de explosividad, $IE(II)$, basado en la variable canónica de los parámetros de explosividad, $VC11$.

El siguiente cuadro explica la lógica de esta clasificación:

$V_{ssc} > 14$	$IE(I) \geq 1,5$I
	$1 \leq IE(I) < 1,5$ $IE(II) \geq 1,5$I $IE(II) < 1,5$PI
	$IE(I) < 1$PI
$9 \leq V_{ssc} < 14$	$IE(I) \geq 1,5$ $IE(II) \geq 1,5$I $IE(II) < 1,5$PI
	$IE(I) < 1,5$PI
$V_{ssc} < 9$	$IE(I) \geq 1$ $IE(II) \geq 1,5$I $1 \leq IE(II) < 1,5$PI $IE(II) < 1$NI
	$IE(I) < 1$NI

Donde:

I	=	Polvo inflamable
PI	=	Polvo poco inflamable
NI	=	Polvo no inflamable

De acuerdo con este criterio, las muestras estudiadas se clasificarían de la siguiente forma:

MUESTRA	Vssc	IE(I)	IE(II)	CLASE
MH-1	16,94	0,85	1,03	PI
MH-2	17,83	1,19	1,05	PI
MH-3	16,63	1,15	0,94	PI
MH-4	16,09	0,99	1,02	PI
MH-5	18,56	1,25	1,90	I

MUESTRA	Vssc	IE(I)	IE(II)	CLASE
MH-6	23,01	1,56	2,26	I
MH-7	24,24	1,63	2,63	I
MH-8	23,27	1,62	2,34	I
MH-9	23,23	1,65	2,57	I
MH-10	25,30	1,55	1,01	I

MUESTRA	Vssc	IE(I)	IE(II)	CLASE
MH-11	5,98	0,00	0,25	NI
MH-12	5,79	0,00	0,22	NI
MH-13	7,02	0,08	0,18	NI
MH-14	2,76	0,00	0,27	NI

MUESTRA	V _{ssc}	IE(I)	IE(II)	CLASE
MH-15	11,05	0,85	1,12	PI
MH-16	9,29	0,60	1,02	PI
MH-17	12,94	0,42	0,82	PI
MH-18	11,66	0,41	0,76	PI

MUESTRA	V _{ssc}	IE(I)	IE(II)	CLASE
MH-19	8,09	0,66	0,81	NI
MH-20	7,81	0,55	0,72	NI
MH-21	8,02	0,66	0,91	NI
MH-22	7,24	0,59	0,85	NI

MUESTRA	V _{ssc}	IE(I)	IE(II)	CLASE
MH-23	5,65	0,00	0,74	NI
MH-24	4,76	0,00	0,62	NI
MH-25	7,54	0,07	0,64	NI
MH-26	13,95	0,34	0,51	PI

MUESTRA	V _{ssc}	IE(I)	IE(II)	CLASE
MH-27	12,54	0,36	0,35	PI
MH-28	13,55	0,42	0,53	PI
MH-29	14,39	0,40	0,41	PI
MH-30	11,36	0,33	0,36	PI

3.8. Análisis de los procesos de adsorción

Debido a la química física de las interfases sólido-gas, es posible depositar moléculas de un gas sobre una superficie convenientemente preparada. Cuando el sólido es expuesto al gas, las moléculas de éste afectan al sólido y pueden residir sobre su superficie durante un tiempo finito. Normalmente, parte de la superficie sólida está vacía. A medida que aumenta la presión del gas en la fase fluída, el área de la interfase sólido-gas desocupada disminuye y el nivel de adsorción del sólido aumenta. Este fenómeno de transferencia selectiva de uno o más solutos desde una fase fluída a un conjunto de partículas rígidas se denomina adsorción y se diferencia de la absorción en que ésta se refiere a la penetración dentro del cuerpo del sólido.

En función de las fuerzas que actúan en la adsorción, existen dos mecanismos que explican el proceso. Por un lado, la adsorción puede deberse a fuerzas de atracción de tipo Van der Waals; en este caso la adsorción tiene carácter físico, se denomina fisisorción y la energía puesta en juego es baja. Por otro lado, puede producirse una interacción química específica entre las moléculas del gas y las del sólido, resultando la adsorción más fuerte, ya que se llegan a formar enlaces químicos entre las moléculas de adsorbente y adsorbato y los valores del calor de adsorción aumentan considerablemente. Este tipo de adsorción se conoce como adsorción química o quimisorción. En ella, cuando una monocapa de gas adsorbido cubre la superficie del sólido, ya no puede tener lugar una nueva reacción química entre el gas y el sólido. En la adsorción física, una vez que se ha formado una monocapa, las interacciones entre las moléculas del gas en la monocapa y las moléculas de la fase gaseosa pueden conducir a la formación de una segunda capa de gas adsorbido. Este proceso se repite, dando lugar a sucesivas capas adsorbidas, o adsorción de multicapas. Aunque sólo una capa puede adsorberse químicamente, a veces se da la adsorción física de más capas sobre una capa quimisorbida.

La adsorción es un equilibrio dinámico entre las moléculas adsorbidas y las moléculas en fase gaseosa. Hay bastantes pruebas teóricas y experimentales de que las moléculas adsorbidas pueden moverse sobre la superficie; esta movilidad es mucho mayor para las moléculas adsorbidas físicamente que para las quimisorbidas y aumenta a medida que lo hace la temperatura.

En los sistemas sencillos se puede dibujar una curva que muestra la cantidad de gas adsorbido en función de la presión parcial del gas en la fase fluída. Tal curva es válida para una temperatura única y se conoce con el nombre de isoterma de adsorción.

Las teorías matemáticas que describen los procesos de adsorción deben basarse, necesariamente, en modelos sobre-simplificados, puesto que las formas de las isotermas dependen no sólo de la superficie específica del polvo (sólido) sino también del volumen de poros. En función del tipo de proceso y de las simplificaciones introducidas pueden desarrollarse numerosos tipos de isotermas de adsorción.

Así, por ejemplo, la isoterma de adsorción de Gibbs es aplicable a disoluciones, la de Langmuir es válida para monocapas ideales localizadas y se puede aplicar, con limitaciones, a adsorción física, siendo su principal aplicación la quimisorción gas-sólido. La isoterma de adsorción de Freundlich tiene las mismas aplicaciones que la de Langmuir y la de Sips combina los modelos de Langmuir y Freundlich. La isoterma BET (Brunauer, Emmett y Teller) supone que las fuerzas que producen condensación son las principales responsables de la energía de enlace en la adsorción multimolecular y es aplicable a adsorción física de multicapas.

Existe, además, toda una serie de ecuaciones que relacionan los parámetros termodinámicos de la adsorción y que se emplean para determinar el volumen de microporos de sólidos (carbones). De ellas, quizá la más ampliamente empleada es la ecuación de Dubinin-Radushkevich.

3.8.1. Planteamiento de la experimentación

La necesidad de abandonar los ensayos de propagación, una vez concluida la fase experimental, en la que se estudiaron las muestras anteriormente citadas en este informe, indujo a descartar la adquisición y puesta a punto de instrumentación adecuada para el registro de las ondas de presión en la propagación de una explosión de polvo de carbón. Discutido este término entre el ITGE y el LOM, se propuso realizar en su lugar un estudio de las condiciones a las que está sometido el carbón en una capa con presencia de grisú. Con la ayuda de medidas de adsorción, se pretendía evaluar el estado de equilibrio del carbón con el metano y llegar a simular tal estado mediante una atmósfera de grisú creada en el laboratorio. Con ello, se pueden realizar determinaciones de parámetros de explosividad no sólo introduciendo metano en el aire soporte de la nube de polvo, sino incluso en la propia estructura del carbón.

Por todo ello, las tareas relacionadas con esta actividad se centraron en el desarrollo de la instrumentación y equipos adecuados para este tipo de medidas.

3.8.2. Primera fase experimental

En los experimentos realizados se empleó gas metano como adsorbato y carbón como superficie adsorbente. El objetivo era estudiar la posibilidad de desarrollar una isoterma de adsorción metano-carbón que permita ver la influencia de la mezcla híbrida, sus riesgos y cómo minimizarlos para evitar accidentes en minería.

Toda la experiencia se basa en que las moléculas de metano quedan atrapadas al chocar sobre la superficie del carbón según sea la energía que tenga la molécula y el estado en que sea más estable

Observando la evolución de las muestras y estudiando los resultados obtenidos en los ensayos de explosividad se ha podido constatar la interacción metano-carbón, reflejada por la variación de los parámetros o características de explosión. Se han medido la presión máxima de explosión y la velocidad máxima de aumento de presión en función de la temperatura de adsorción y la presión de metano.

La temperatura se ha mantenido alrededor de 22°C durante el proceso de adsorción en la mayoría de los experimentos. En algunos casos se han medido temperaturas de hasta 28°C, lo que ha conducido a una menor adsorción de metano.

La presión de metano se ha variado desde 0,25 bar hasta 1,5 bar de sobrepresión.

Otras variables que se han tenido en cuenta han sido la superficie de adsorción y la concentración de polvo de carbón en los ensayos de explosión.

La superficie de adsorción ha sido controlada puesto que el proceso de preparación de muestras ha sido minucioso y al mantener el peso ensayado y la granulometría, la superficie específica se ha mantenido prácticamente constante.

La concentración de polvo de carbón en los ensayos de explosividad se fijó inicialmente en tres niveles: 250 g/m³, 500 g/m³ y 1000 g/m³, para posteriormente ensayar solo la segunda de ellas, debido a que proporcionaba los valores máximos de los parámetros de explosividad.

Los parámetros de explosión se han determinado en el conocido aparato esférico de 20 litros. Para producir la adsorción de metano se ha empleado un dispositivo experimental consistente en cuatro recipientes estancos conectados a un circuito para distribución del gas. Este circuito está dotado de un calderino depósito de gas, cuyo fin es compensar las pérdidas de presión debidas a la adsorción. Conectada al mismo circuito se encuentra una bomba de vacío. Las muestras, previamente pesadas y depositadas en los recipientes, se someten al vacío para desorber otros gases y posteriormente se presurizan con metano, permaneciendo en tal atmósfera hasta ser ensayadas.

El método experimental ha consistido en estudiar previamente la influencia de la presión de metano y del tiempo de exposición. Esta primera fase se llevó a cabo sobre un carbón asturiano de tipo hulla con un alto contenido en volátiles (~36%), denominado H5N1.

Se comenzaron los ensayos con una sobrepresión de 0,25 bar de metano, llegando a 1,50 bar, con incrementos de 0,25 bar. Las concentraciones de 500 g/m³ de polvo de carbón en los ensayos posteriores condujeron en todos los casos a parámetros de explosividad superiores a los correspondientes a 250 g/m³ y 1000 g/m³, por lo que se decidió emplear aquella concentración como idónea, y a ella se refieren los resultados presentados. La presión máxima de explosión (PME) y la velocidad máxima de aumento de presión (VMAP) mostraron una cierta tendencia a aumentar en función de la presión de metano, aunque las desviaciones fueron importantes.

SOBREPRESION CH ₄ (bar)	PME (bar)	VMAP (bar/s)
0,25	9,6	175
0,50	8,3	278
0,75	9,4	280
1,00	7,9	255
1,25	9,8	260
1,50	8,2	263

Una primera posible explicación de estas variaciones reside en el hecho de que el proceso de adsorción no haya llegado a una situación de equilibrio, de forma que, dependiendo de las condiciones (temperatura, presión de metano) la superficie del carbón no ha llegado a "saturarse" de metano en todos los casos.

Para estudiar la influencia del tiempo de exposición se hicieron ensayos con una presión de metano de 1 bar, manteniendo la muestra durante periodos que variaron desde las 24 horas a las 288 horas. En estos ensayos se observó que los parámetros de explosión tienden a aumentar con el tiempo de exposición, produciéndose una cierta estabilización al llegar a la 120 horas.

TIEMPO EXPOSICION (horas)	PME (bar)	VMAP (bar/s)
24	7,9	255
48	8,7	208
72	8,6	210
120	9,4	228
144	9,4	280
288	9,0	255

A la vista de estos primeros resultados, lo único que parece claro es que se está produciendo una interacción entre el carbón y el metano que modifica la explosividad de aquél. Esto es lo suficientemente interesante como para profundizar en la investigación mejorando, en lo posible, las condiciones experimentales.

Estos resultados no eran todo lo satisfactorios que cabría esperar, ya que se observaban importantes desviaciones o "discontinuidades" numéricas en los datos obtenidos.

Hay que tener presente que se trataba de un número reducido de ensayos y que aún habíaciertas dificultades experimentales en ellos: variaciones indeseadas de la temperatura ambiente durante el proceso de adsorción, ligerísimas pérdidas en el circuito de gases que sólo se ponían de manifiesto al cabo de las horas, desorción de gas durante la carga de la muestra en la esfera de 20 litros, etc.

Estas deficiencias han sido detectadas y corregidas para sucesivos ensayos. Para éstos, se ha decidido emplear una muestra de carbón perteneciente a las estudiadas propiamente dentro de este proyecto. Así, se ha elegido arbitrariamente la MH-21, procedente de Minas de Ventana (Pontedo, León), muestra sobre la que se realizaron los siguientes ensayos.

3.8.3. Segunda fase experimental

Con el fin de mejorar los resultados obtenidos, se inició una segunda fase de ensayos en la que se incluyeron las siguientes técnicas:

- Estudio estadístico de los resultados obtenidos.
- Estudio del proceso de desorción por pérdida de peso sobre la balanza microgravimétrica.
- Estudio de la cantidad de metano adsorbido en la muestra.

A continuación se presentan los resultados obtenidos.

A) ENSAYOS DE EXPLOSIVIDAD

De acuerdo con la línea de actuación ya propuesta, los ensayos se realizaron a una concentración de 500 g/m^3 en el aparato esférico de 20 litros.

La muestra se preparó en todos los casos, de acuerdo con la norma existente, sobre una granulometría menor de $74 \mu\text{m}$. Las presiones de confinamiento fueron de 1 bar y 3 bar llegándose en alguno de los casos a un tiempo de exposición de 168 horas.

Los resultados obtenidos para una sobrepresión de 1 bar, fueron los siguientes:

Tiempo de exposi. (horas)	Presión de explos. (bar)	dP/dt (bares/ segundo)
0	7.0	99
24	7.6	100
48	6.9	80
72	7.7	110
120	7.3	78
144	7.2	85
168	7.6	96

Estos resultados son los obtenidos mediante un sencillo tratamiento estadístico, consistente en eliminar los resultados de los dos ensayos cuyo peso, en la desviación típica, producía una mayor desviación. Estos no tienen por qué coincidir con los ensayos que producían los valores extremos.

Hecho ésto, se calculó la regresión lineal de los valores obtenidos para ver la tendencia que seguían los resultados. Todos estos datos se pueden ver en el gráfico 1.

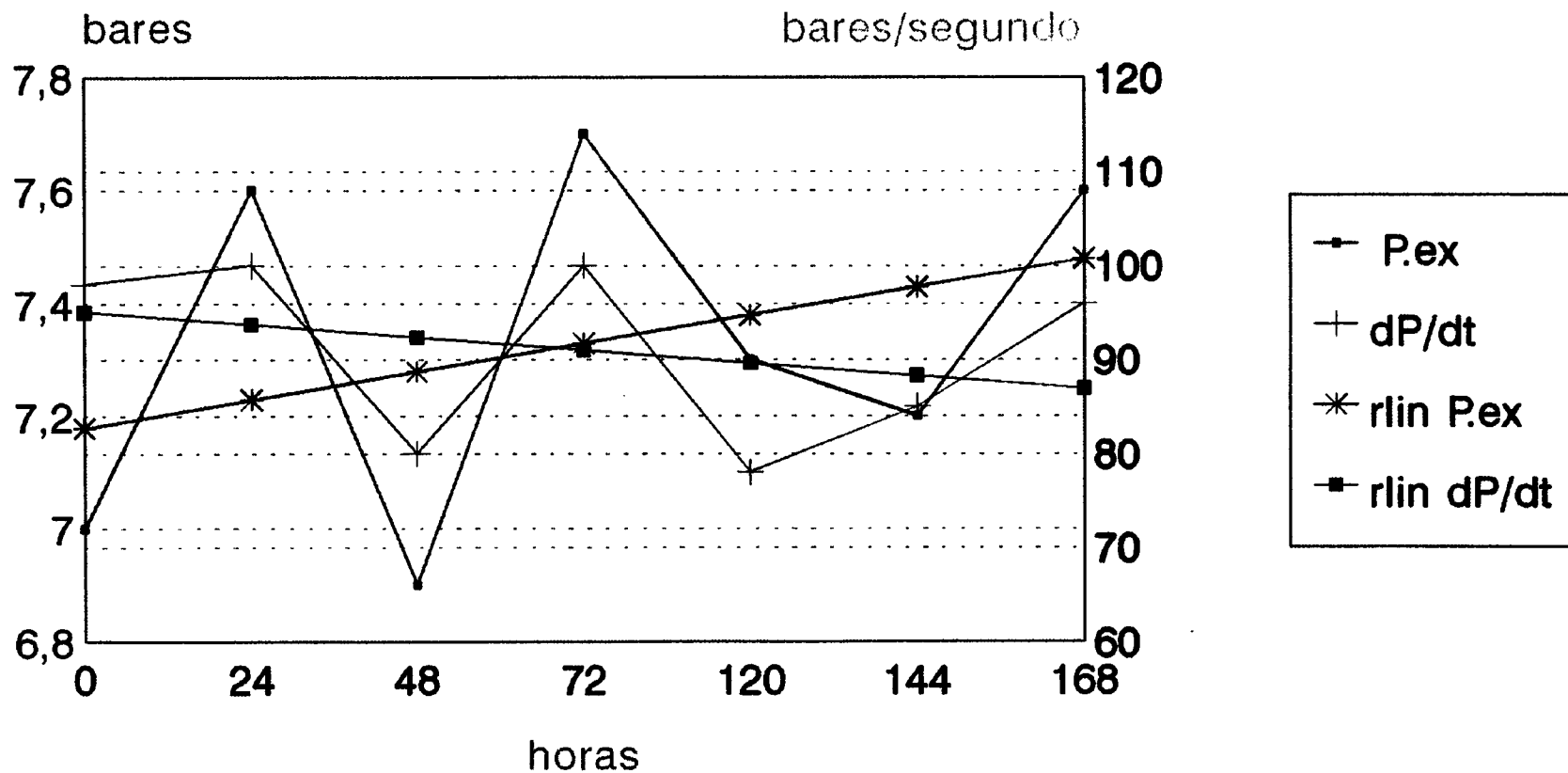
Se observa claramente que, mientras la tendencia de la presión de explosión es a aumentar, la velocidad de aumento de presión no sólo no aumenta sino que disminuye, contrariamente a lo esperado.

Como consecuencia de estos resultados, se reforzaron las medidas experimentales encaminadas a controlar las diversas condiciones aleatorias que podían afectar al equilibrio: temperatura, presión, manipulación de la muestra, etc. Se hizo un mayor número de ensayos por muestra para obtener resultados más exactos, se aumentó la presión de confinamiento del metano en los botes de preparación de muestras hasta 3 bar, para que éstas alcanzaran el equilibrio en un tiempo menor y se rediseñaron los frascos de preparados para facilitar una descarga directa de la muestra en el aparato de 20 litros y así reducir la manipulación y el tiempo de espera entre la descompresión y la realización del ensayo.

Los ensayos realizados después de estas mejoras dieron como resultado valores más coherentes que se reflejan en la tabla siguiente:

GRAFICO 1

MUESTRA MH-21



SOBREPRESION 1 BAR

Tiempo de exposic. (horas)	Presión de explos. (bar)	dP/dt (bar/segundo)
0	7.00	98.7
24	6.97	117.5
48	7.50	71.5
72	7.11	117.5
96	7.50	170.0
120	7.19	164.8

El tratamiento estadístico fue el mismo que en las muestras anteriores y su resultado se refleja en el gráfico 2. Como se puede ver, una vez realizadas las mejoras, los resultados reflejan una tendencia clara al crecimiento, tanto en la presión de explosión como en la velocidad de aumento de ésta.

B) GRANULOMETRIA

Otro de los campos de estudio se centró en la influencia de la granulometría sobre la severidad de explosión. Para ello se tomaron dos granulometrías:

- 1) la ya citada menor de 74 μm
- 2) la comprendida entre 125 μm y 250 μm

Tras ensayar repetidamente ambas, para un período de confinamiento de 24 horas, se obtuvieron los siguientes resultados:

● Presión máxima de explosión (bar)

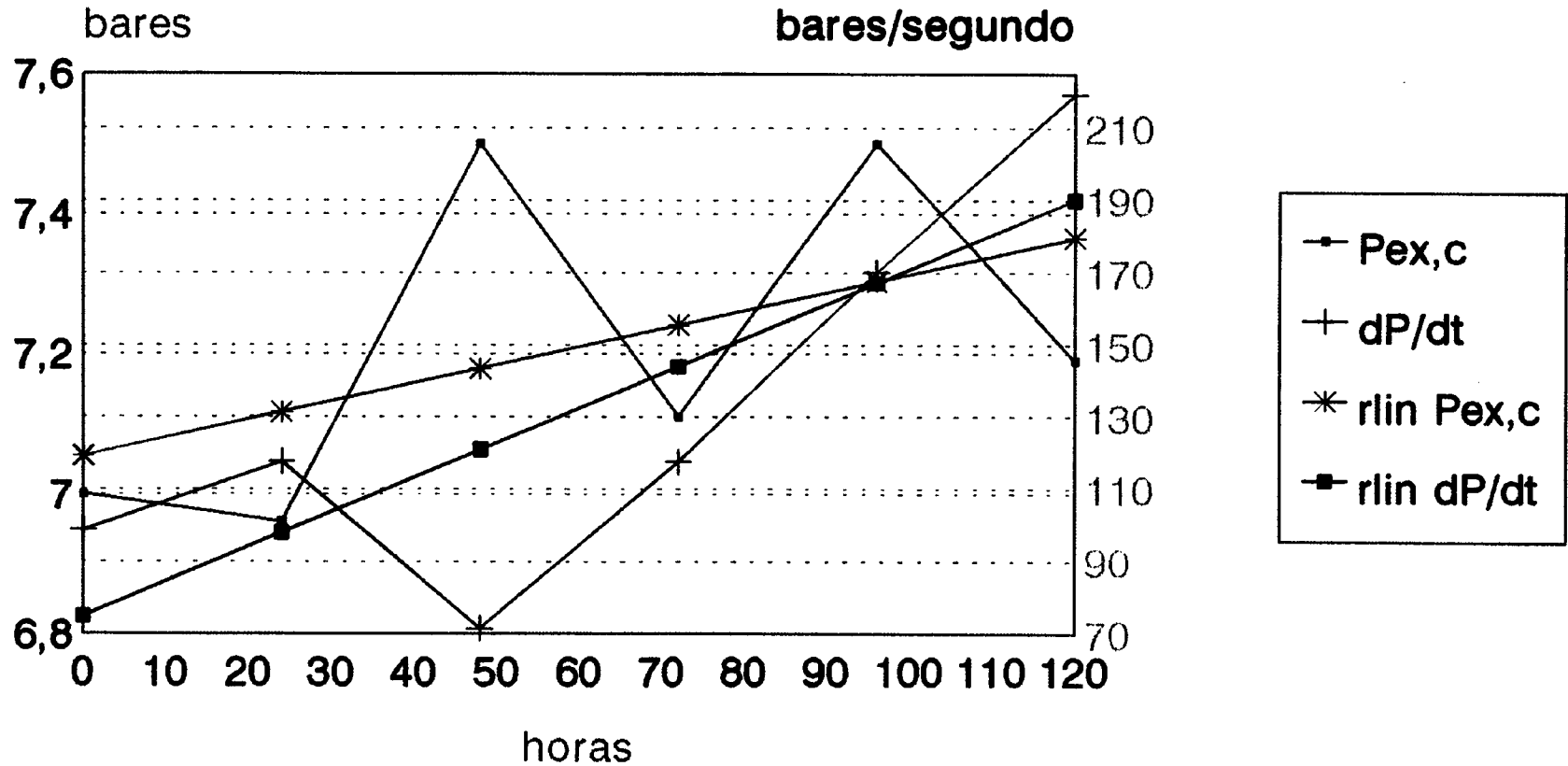
Granulometría (μm)	Tiempo de exposici. (0 horas)	Tiempo de exposici. (24 horas)
< 74	7.00 bar	6.97 bar
125-250	6.50 bar	8.50 bar

● Velocidad de aumento de presión (bar/segundo)

granulometría (micras)	Tiempo de exposici. (0 horas)	Tiempo de exposici. (24 horas)
< 74	98.0 bar/s	117.5 bar/s
125-250	44.0 bar/s	56.0 bar/s

GRAFICO 2

MUESTRA MH-21



SOBREPRESION 3 BARES

Como se puede observar, mientras que la presión de explosión varía ligeramente al disminuir el tamaño de grano, la velocidad de aumento de la presión aumenta claramente, duplicándose al disminuir la granulometría de la muestra.

C) CALCULO DE LA CANTIDAD DE METANO ADSORBIDO EN LA MUESTRA

Debido a los resultados obtenidos en las primeras pruebas realizadas, se intentó verificar la adsorción de gas y su cantidad.

Es sabido que, de acuerdo con la isoterma de Freundlinch, la cantidad de gas que queda por desorberse de una superficie es proporcional, en el caso del metano, a la raíz cuadrado del tiempo. Es decir:

$$Q = k \sqrt{t}$$

siendo t el tiempo que transcurre desde que la muestra es extraída del bote de confinamiento, donde se preparó siguiendo el proceso ya explicado, hasta la realización de la medición.

Para estudiar la cantidad de metano que el carbón era capaz de adsorber se pueden emplear dispositivos experimentales denominados desorbómetros. Existen dos tipos de desorbómetros, aprovechando las dos características más usadas de los gases: los de volumen constante y los de presión constante.

Los desorbómetros que funcionan a presión constante aprovechan el aumento de volumen que se produce cuando el gas adsorbido se desorbe y para mantener la presión constante se expande. El aparato, que es muy sencillo, consiste en una celda en la que se coloca la muestra preparada. Dicho recipiente está unido a un capilar en el que una burbuja de mercurio se desplaza a medida que se iguala la presión externa y la interna. Midiendo el desplazamiento y conociendo la sección del capilar, se determina la cantidad de gas que se ha desorbido en un cierto tiempo.

En el caso de los desorbómetros de volumen constante, la medición se realiza mediante un aumento de presión. Este se traduce a un volumen adsorbido. El proceso es el siguiente: una vez que se tiene un volumen constante y previamente determinado, se introduce la muestra preparada. Si sobre ella se ha adsorbido un gas previamente, éste, al desorberse, provoca un aumento de presión proporcional a la cantidad de gas que se ha adsorbido.

Si V es el volumen del desorbómetro, P el aumento de presión, P_f la presión ambiente y q el volumen de gas desorbido, según la ecuación de estado de los gases ideales se obtiene:

$$P \times V = P' \times V'$$

$$P_f \times (V + q) = (P_f + P) \times V$$

$$P_f \times q = P \times V$$

$$q = (P \times V) / P_f$$

Esta expresión justifica el que las medidas obtenidas se den en unidades de volumen en lugar de darlas en unidades de presión.

Suponiendo iguales el intervalo de tiempo en el que se realiza la medida y el que transcurre desde la apertura del bote de preparación hasta la medición, el volumen de gas desorbido verifica:

$$q = k\sqrt{2E} - k\sqrt{E}$$

Por otro lado, el gas desorbido hasta el final de la medición es:

$$Q = k\sqrt{E}$$

Con lo que, de las últimas ecuaciones, se llega a:

$$Q = q(2 + \sqrt{2})$$

Es decir:

$$Q = 3.4142 q$$

Estos datos se corrigieron para referirlos a condiciones normales (273 K y 1 atm) y referirlos a la unidad de masa, para obtener la concentración bruta C_b :

$$C_b = \frac{Q \times 273}{m \times (273 + T_{Lab})}$$

También se refirieron a carbón puro, exento de cenizas. Para ello, si m era la masa inicial y c el índice de cenizas, la masa corregida sería: $m (1 - 1.1 c)$. El factor 1.1, como coeficiente de las cenizas, es un factor de corrección debido a la volatilización de algunos compuestos durante la determinación experimental de las cenizas.

La correspondiente concentración será:

$$C = \frac{C_b}{(1 - 1.1 c)}$$

Una vez planteado el fundamento de los ensayos realizados, se presentan a continuación los resultados experimentales. Estos se han obtenido sobre 10 gramos de muestra cuya granulometría está entre 125 μm y 250 μm . La temperatura media del laboratorio se mantuvo entre 20°C y 23°C. Para los cálculos se ha utilizado esta última por ser la más desfavorable. El contenido en cenizas de la muestra es del 12.20 %. La sobrepresión de confinamiento fue de 3 bar de gas metano.

Las mediciones se realizaron con un desorbómetro de volumen constante, cuya escala está graduada en centímetros cúbicos, es decir ya tiene la correlación presión-volumen calculada. Las mediciones se hicieron cada dos horas, debido a lo constante que resultaban. A pesar de ello se realizó una medida a las 168 horas como comprobación.

El tiempo de manipulación se fijó en 35 segundos y el de medición también, con lo cual la hipótesis del razonamiento teórico anterior es válida para nuestro caso.

Las mediciones realizadas fueron las siguientes:

TIEMPO (HORAS)	VOLUMEN (cm ³ /10g)	Q (cm ³ /10g)	C _b (cm ³ /g)	C (cm ³ /g)
2	5	17.07	1.574	1.81
4	5	17.07	1.574	1.81
6	5	17.07	1.574	1.81
168	5	17.07	1.574	1.81

Estos resultados indican que el equilibrio se alcanza en las dos primeras horas de exposición del carbón al gas metano. No parece que ésto sea erróneo puesto que la muestra cruda no registró desorción alguna.

D) ESTUDIO DEL PROCESO DE DESORCION

De acuerdo con la teoría del apartado anterior, la cantidad de metano que permanece adsorbido en la superficie del carbón según transcurre el tiempo, expresada en tanto por uno, es:

$$Q_d = 1 - k \sqrt{t}$$

Debido a la volatilidad del metano a la presión atmosférica, es lógico suponer que sobre la superficie de la muestra se suceden equilibrios de los distintos gases atmosféricos una vez expuesta la superficie al aire.

La ecuación de adsorción de Freundlich para un solo gas es de la forma:

$$Q_a = K t^b$$

El segundo gas no se adsorbería hasta que hubiese superficie libre, por lo que la ecuación anterior no es exacta ya que no lo contempla. Como consecuencia de ésto, la velocidad a la que se adsorbe el segundo gas es menor y la curva es más tendida en la realidad, que lo que se ha simulado.

Se ha supuesto que el segundo gas no se empieza a adsorber hasta que hay suficiente superficie libre como para que este factor no sea determinante en el proceso. Lo que se ha hecho es suponer que el segundo gas no se adsorbe hasta pasado un cierto tiempo.

Así, la ecuación sería:

$$Q_2 = K' (t - \alpha)^\beta$$

en la que t es el tiempo transcurrido desde la descompresión y α es el retardo introducido respecto al comienzo de la desorción. En los ensayos realizados este retardo ha sido de 300 segundos, lo cual se justificará basándose en la parte experimental.

La curva resultante de la desorción y posterior adsorción de un segundo gas, expresada en tanto por uno para ambos gases será:

$$Q = 1 - k\sqrt{t} + k' (t - \alpha)^\beta$$

Esta es la ecuación que se ha utilizado en las simulaciones posteriores.

En cuanto a las condiciones experimentales, cabe mencionar que, tras preparar convenientemente la muestra (secado, molienda y tamizado), se la sometió a 3 bar de sobrepresión durante diversos períodos de tiempo.

Las medidas se realizaron con una balanza microgravimétrica durante 480 minutos, puesto que a los 30 minutos del inicio se observaba un aumento de peso tras la desorción, en lugar de una estabilización que era lo esperado.

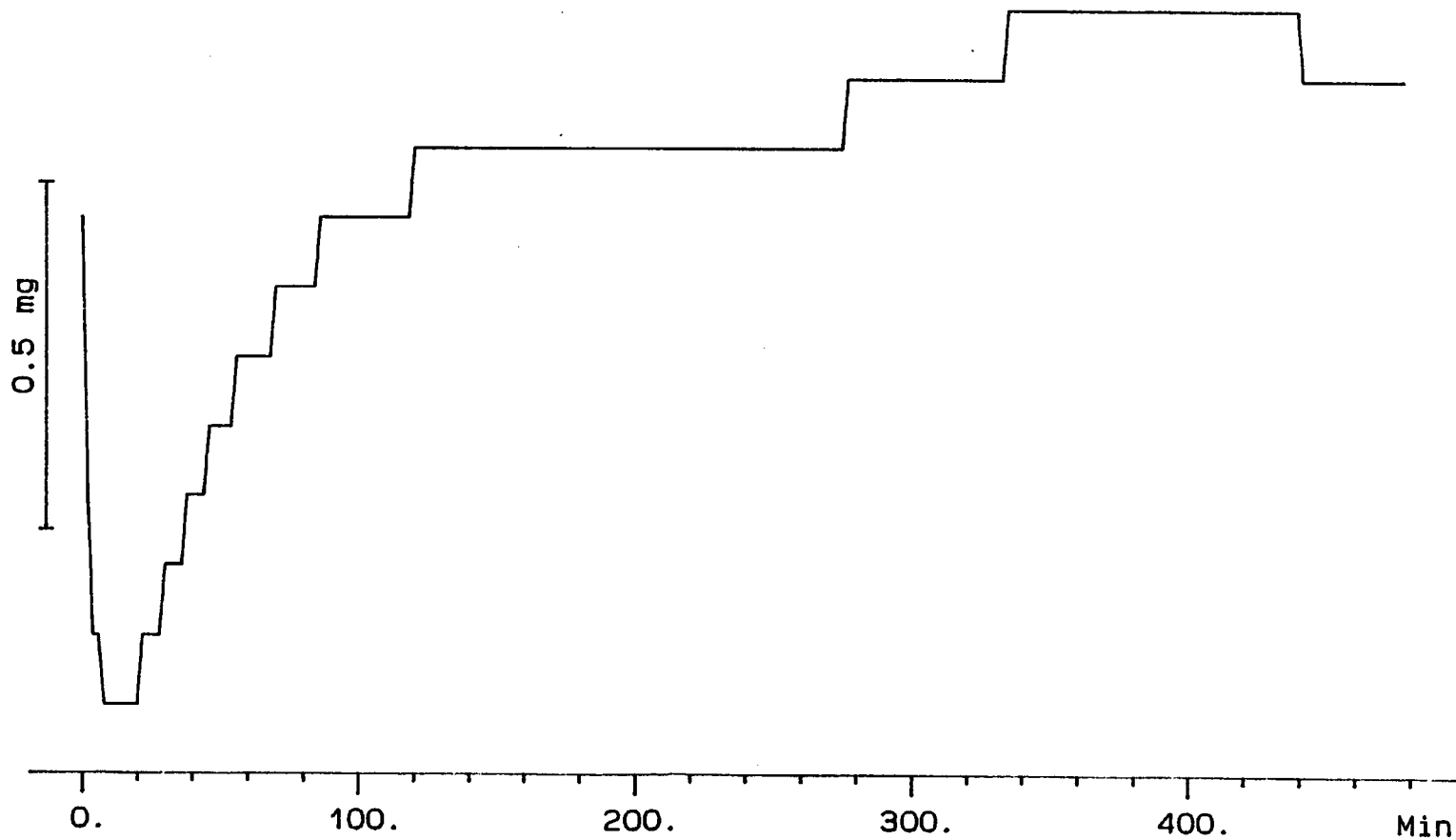
El problema principal fue la manipulación de la muestra, ya que entre la introducción de ésta en la balanza y la inicialización del sistema transcurría un tiempo en el cual se producía desorción.

En las gráficas que se recogen en las dos páginas siguientes se puede observar que, tras la pérdida de peso del metano, se producía un claro aumento de peso.

Suponiendo que este aumento estaría íntimamente ligado con la preparación de las muestras, se sometió al mismo ensayo al carbón tal y como se presentaba antes de someterlo a la atmósfera de metano. El resultado es el que se puede observar en el gráfico de la página 92. En él se observa cómo se suceden diversos equilibrios, produciéndose un aumento de peso.

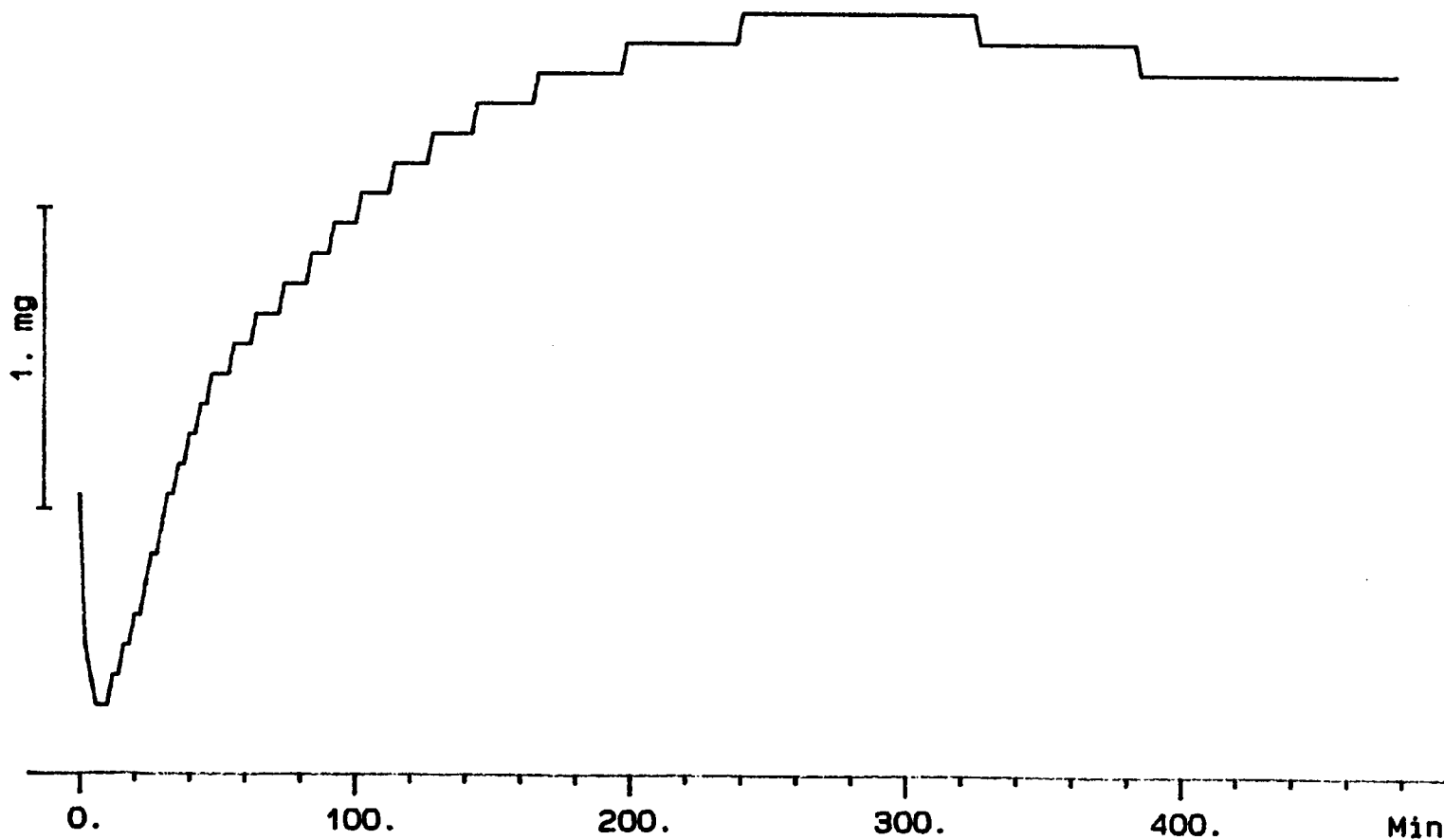
ensayo de desorcion 13b2 OA 96M

File: 80198.001 TG METTLER 11-Aug-92
Ident: 80198.0 LABORATORIO OFIC. MADARIAGA



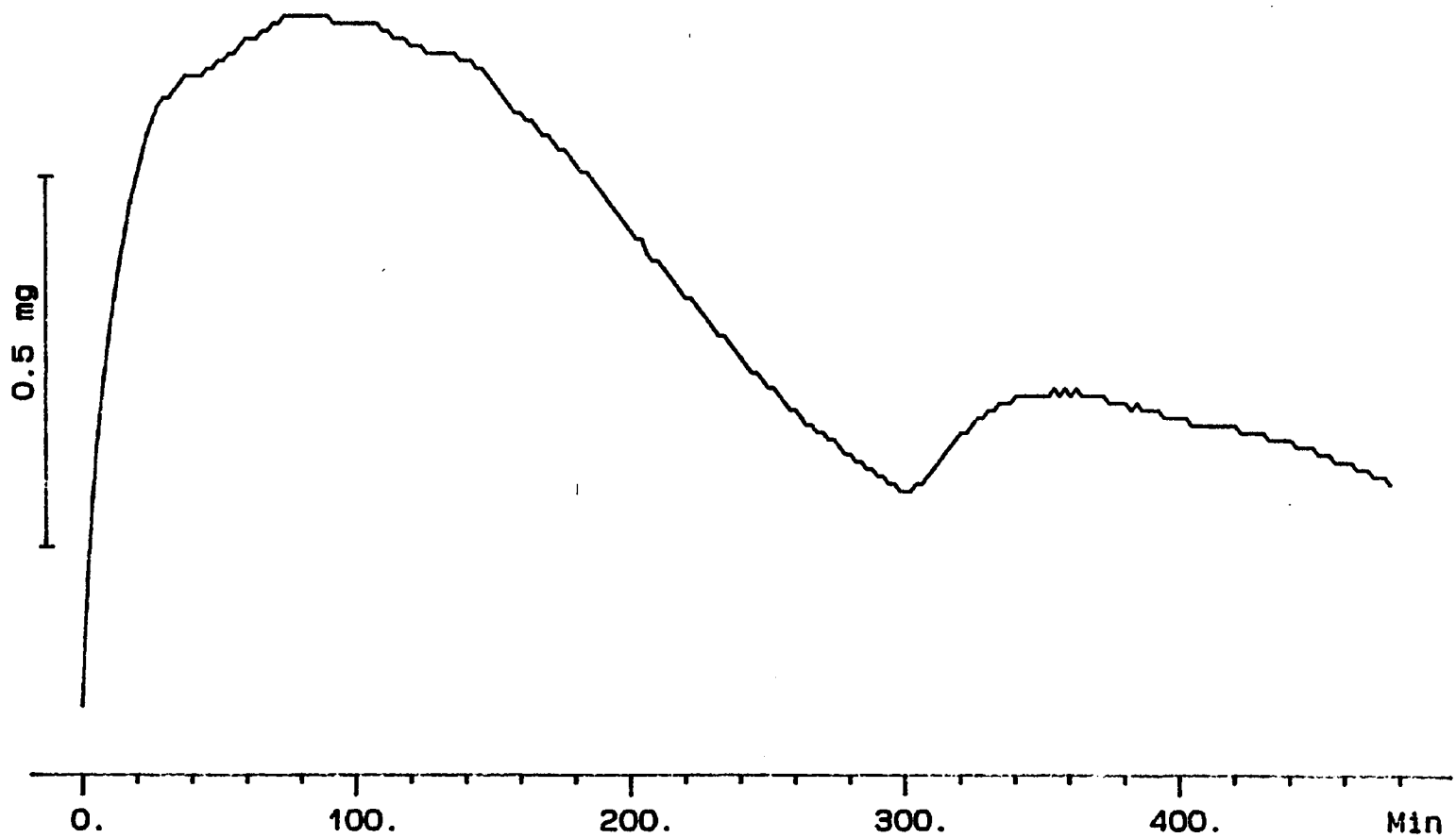
ensayo de desorcion 6 b1

File: 80190.001 TG METTLER 27-Jul-92
Ident: 80190.0 LABORATORIO OFIC. MADARIAGA



ensayo de desorcion 4

File: 80187.001 TG METTLER 21-Jul-92
Ident: 80187.0 LABORATORIO OFIC. MADARIAGA



Para verificar si se ajustaban los resultados obtenidos experimentalmente con los cálculos teóricos, se hizo una simulación con un solo gas (podría ser vapor de agua reabsorbido). El retardo se tomó igual a cinco minutos (300 s), pues se correspondía aproximadamente con el mínimo que se registraba experimentalmente.

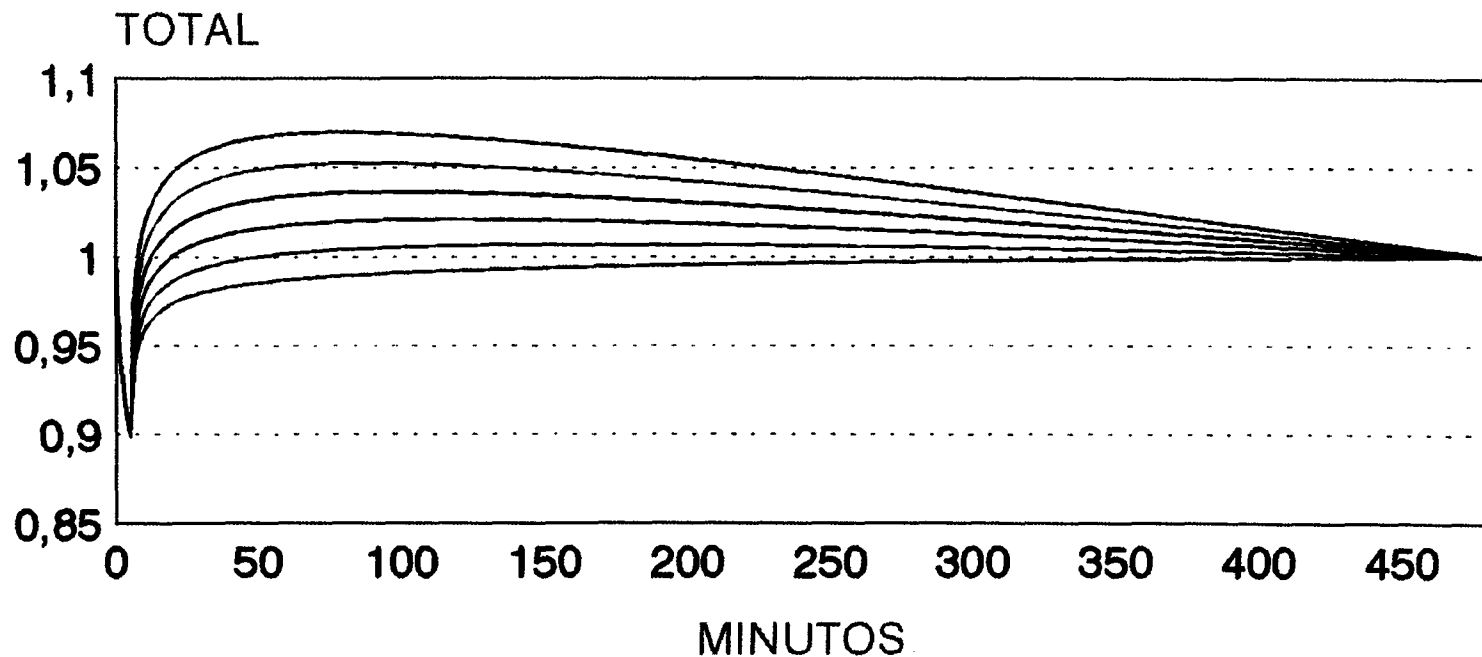
En la figura de la página siguiente se presenta la simulación de la curva de adsorción total para diversos valores de beta, de forma que se obtiene la familia de curvas que se muestran en el gráfico.

La similitud de estas curvas con las obtenidas en los ensayos experimentales indica que puede ajustarse, al menos en primera aproximación, una ecuación de Freundlich para justificar la desorción de metano del carbón y la posterior adsorción de otro gas, que bien podría ser el vapor de agua de la atmósfera.

Para conocer el fenómeno en profundidad y determinar qué factores influyen en la interacción carbón-metano será necesario comprobar qué tipo de adsorción se produce y cuáles son los gases que intervienen fundamentalmente. La experimentación permitirá la determinación de las isothermas de adsorción y, en función del modelo previsto de adsorción, será posible aproximar las condiciones de la experimentación a las condiciones reales a las que el carbón se encuentra sometido en la capa en una explotación. Para esto serán también valiosos los datos sobre cantidad de grisú contenido en la capa, valores que pueden ser medidos en la mina.

CALCULO TEORICO DE LA DESORCION

MUESTRA MH-21



— beta =0.40 — beta=0.42 — beta=0.44
— beta=0.46 — beta=0.48 — beta= 0.50

SOBREPRESION 3 BARES , RETARDO 300 S

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha profundizado en el conocimiento de las características de explosión de algunos carbones españoles. Se seleccionaron las zonas de León y Palencia como representativas de la posible influencia del metano sobre la explosividad del carbón. Casi desde el inicio del proyecto se comprobó que el número de muestras de carbón y minas que se iban a estudiar era muy reducido y que un estudio profundo precisaría un mayor número de muestras.

No obstante, el análisis de las muestras estudiadas ha proporcionado una información muy valiosa, que ha quedado cuantificada por las numerosas mediciones experimentales realizadas y presentadas en este trabajo. En este sentido, se puede afirmar que por primera vez se ha realizado en España un estudio de estas características, que permite respaldar con resultados algunas de las principales conclusiones que se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Se presenta una recopilación actualizada de las principales medidas de prevención y protección aplicables en la minería subterránea del carbón.
- Se ha desarrollado un primer modelo unidimensional de la combustión de mezclas gaseosas, que realiza una aproximación numérica mediante la aplicación conjunta de un método de Euler explícito en tiempo y un método combinado de elementos finitos y volúmenes finitos en espacio.
- En los ensayos de propagación de explosiones se ha podido constatar, en general, una mayor propagación de la explosión cuando el aire contiene bajos porcentajes de metano.
- Las técnicas de microscopía electrónica de barrido y el análisis químico de residuos carbonosos de explosión pueden resultar muy adecuadas para el estudio de residuos de combustión. Se han encontrado discordancias en los resultados debidos a la mera observación visual de propagaciones de explosiones y los obtenidos mediante el análisis por microscopio, lo que puede deberse a una llama rápida propagándose sobre fase gaseosa homogénea.
- En algunos experimentos se ha observado devolatilización y quemado de los granos en el primer tramo del tubo de propagación, lo que podría generar la producción de una atmósfera de gases inflamables, dando lugar a una propagación rápida de la llama. Por efecto de escala (enfriamiento de las paredes) el quemado de los granos puede verse muy reducido.

- La sensibilidad a la inflamación del carbón aumenta en presencia de pequeños porcentajes de metano en la atmósfera. Son especialmente significativas las disminuciones experimentadas por algunos de los parámetros de explosividad, especialmente en el caso de algunas muestras que en atmósfera de aire no responden a alguno de los ensayos de inflamación y, en cambio, en presencia de sólo un 3 % de metano dan lugar a la ignición del carbón.
- En las muestras de carbón procedente de Minas de Ventana, Vellilla y Montebismo se observa una importante disminución de los valores de TMI_n cuando se añade metano al aire de dispersión. Las muestras de Fabero pasan de presentar una sensibilidad nula en aire a responder al ensayo de TMI_n cuando se añade metano al aire.
- La severidad de explosión resulta, en general, fuertemente aumentada por la presencia de metano en la atmósfera, lo que significa que, en el caso de iniciarse una explosión (que podría ser sólo de gas), la propagación de la misma resultará mucho más destructiva de lo que sería en el caso de existir sólo aire en la atmósfera.
- Prácticamente en todas las muestras se ha observado un claro aumento de PME y, sobre todo, de VMAP. El aumento es muy marcado en las muestras que, en atmósfera de aire, producían una severidad de explosión reducida (Fabero y Montebismo).
- En los índices de explosividad se observa que al añadir metano a la atmósfera el valor de SE aumenta claramente, VC11 disminuye (es decir, la explosividad aumenta) y X se mantiene constante, ya que depende sólo de la composición del carbón.
- El metano adsorbido modifica el comportamiento del carbón en cuanto a su explosividad, llegando incluso a aumentar la severidad de explosión en mayor cuantía que las alteraciones debidas a la presencia de metano en la atmósfera junto al polvo de carbón (mezcla híbrida, propiamente dicha).
- Se ha analizado la influencia de la presión de confinamiento, el tiempo de exposición y la granulometría sobre la adsorción. Con respecto a la presión de confinamiento, el equilibrio se alcanza con mayor rapidez cuanto mayor es dicha presión, resultando también una mayor cantidad adsorbida de gas.

- El tiempo de exposición influye incrementando tanto la presión máxima de explosión como la velocidad a la que aumenta. Aunque el equilibrio a 3 bar se alcanza antes de las dos horas para una fracción menor de $74\mu\text{m}$, se puede suponer que el propio metano entra a formar parte de la estructura del carbón o bien que pasa a adsorberse formando una unión más fuerte con el paso del tiempo. Esto explicaría el aumento de la severidad de la explosión.
- La granulometría no sólo influye en la cantidad de metano adsorbida, al ser mucho mayor la superficie de exposición, sino que además, tanto la presión de explosión como (sobre todo) la velocidad de aumento de la presión se llegan a duplicar al exponerlos a una atmósfera de metano.
- La utilización de la pérdida de peso de la muestra para comprobar la desorción de metano, así como las curvas obtenidas y su posterior ajuste a los cálculos teóricos, han resultado positivas para una profundización en los procesos. Esto ha permitido corregir los supuestos iniciales sobre las superficies libres.
- La similitud de las curvas de adsorción y desorción teóricas con las obtenidas en los ensayos experimentales indica que puede ajustarse, al menos en primera aproximación, una ecuación de Freundlich para justificar la desorción de metano del carbón y la posterior adsorción de otro gas, que bien podría ser el vapor de agua de la atmósfera.
- A la vista de los resultados obtenidos, parece evidente la necesidad de ampliar el campo de estudio en trabajos futuros, en los que, además de considerar de nuevo las explotaciones de León y Palencia, se analicen las interacciones carbón-metano para carbones de distintos tipos y procedencias.

BIBLIOGRAFIA

1. Amyotte, P.R., A REVIEW OF THE EFFECTS OF TURBULENCE ON GAS-PHASE, DUST AND HYBRID MIXTURE EXPLOSIONS, Technical Report No. 004. Tech. Univ. of Nova Scotia, 1985
2. Banhegyi, M.; Egyedi, J., METODO PARA EL REGISTRO DE LOS LIMITES DE EXPLOSION DE MEZCLAS DE POLVO DE CARBON/METANO/SUSTANCIAS INERTES, 20 Int. Conf. of Safety in Mines Research Institutes, Sheffield, 1983
3. Bradley, D.; Dixon-Lewis, G.; Habik, S.E., LEAN FLAMMABILITY LIMITS AND LAMINAR BURNING VELOCITIES OF CH₄-AIR-GRAPHITE MIXTURES AND FINE COAL DUSTS, Combustion and Flame, No. 77, pp41-50, 1989
4. Cantalapiedra Fuchs, J., ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE INFLAMACION, COMBUSTION Y PROPAGACION DE MEZCLAS HIBRIDAS Y DETERMINACION DE LOS RIESGOS DE EXPLOSION, Tesis Doctoral. Universidad Politécica de Madrid, 1990
5. Cantalapiedra Fuchs, J. et al., CONTROL Y PREVENCION DE EXPLOSIONES, Fundación Gómez-Pardo. Doc. 70-0189, 1989
6. Cantalapiedra Fuchs, J.; García Torrent, J., PARAMETROS DE EXPLOSIVIDAD DE MEZCLAS HIBRIDAS, Tecnoambiente, No. 1, pp82-85, 1990
7. Cardillo, P.; Anthony, E.J., THE FLAMMABILITY LIMITS OF HYBRID GAS AND DUST SYSTEMS, La Revista dei Combustibili, Vol. 32, fasc. 11-12, pp390-395, 1978
8. Cashdollar, K.L. et al., INHIBITION AND EXTINCTION OF COAL DUST AND METHANE EXPLOSIONS, US Bureau of Mines, RI 8708, 1982
9. Cashdollar, K.L. et al., ELECTRON MICROSCOPY STUDIES OF EXPLOSION AND FIRE RESIDUES, US Bureau of Mines IC 8936, 1983
10. Cashdollar, K.L.; Hertzberg, M., LABORATORY STUDY OF ROCK DUST INERTING REQUIREMENTS: EFFECT OF COAL, VOLATILITY, PARTICLE SIZE AND METHANE ADDITION, 23 Int. Conf. of Safety in Mines Research Institutes, Washington, 1989
11. Cashdollar, K.L.; Hertzberg, M., INFRARED TEMPERATURE MEASUREMENT OF GAS AND DUST EXPLOSIONS, Temperature. American Institute of Physics, No. 5, pp453-463, 1982

12. Cashdollar, K.L.; Hertzberg, M.; Conti, R., DOMAINS OF FLAMMABILITY AND THERMAL IGNITABILITY FOR PULVERIZED COALS, AND OTHER DUSTS, Nineteenth Symposium (Int) on Combustion, pp1169-80,1982
13. Cashdollar, K.L; Hertzberg, M.; Opferman, THE FLAMMABILITY OF COAL DUST-AIR MIXTURES, US Bureau of Mines, RI 8360,1979
14. Cashdollar, K.L; Hertzberg, M.; Richmond, FLAMMABILITY LIMITS AND THE EXTINGUISHMENT OF EXPLOSIONS IN GASES, DUST AND THEIR MIXTURES, First Specialists Meeting (Int) of the Combustion Institute,1981
15. Continillo, G., NUMERICAL STUDY OF COAL DUST EXPLOSIONS IN SPHERICAL VESSELS, Prep. Pap. Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem.; Vol. 33, No. 2, pp188,1988
16. Creed, M.J.; Fauske, H.K., AN EASY, INEXPENSIVE APPROACH TO THE DIERS PROCEDURE, Chemical Engineering Progress, March, pp45-49,1990
17. Cybulski, W.B., SAFETY OF EXPLOSIVES AGAINST COAL DUST IN THE PRESENCE OF METHANE BELOW THE LIMIT OF EXPLOSIBILITY, Arch. Gorn., 12, pp189-225,1967
18. Damec, J.; Foniok, R., ZUND UND EXPLOSIONSEIGENSCHAFTEN HYBRIDER GEMISCHE, Brandschutz, Explosionsschutz, 10, pp87-94,1984
19. Eckhoff, R.K., DUST EXPLOSIONS IN THE PROCESS INDUSTRIES, Butterworth Heinemann,1991
20. Enomoto, H., TEXT FOR THE CLASS OF THE GAS AND DUST EXPLOSIONS, Comunicación particular,1983
21. Foniok, R., EXPLOSIVENESS AND IGNITABILITY OF HYBRID DISPERSIVE MIXTURES AND INERTIZED MIXTURES OF COAL DUST, 20 Int. Conf. of Safety in Mines Research Institutes, Sheffield,1983
22. Franke, H., DETERMINATION OF THE MINIMUM IGNITION ENERGY OF COAL-DUST-METHANE-AIR MIXTURES (HYBRID MIXTURES), Erdoel Kohle, Erdgas, Petrochem., Vol. 33, No. 6, pp283,1980
23. García Torrent, J. et al., Kst VARIATION DUE TO PRESENCE OF INFLAMMABLE GASES, Newsletter Europex, No. 13, pp7-8,1990
24. Garcia Torrent, J.; Cantalapiedra, J. Flammability and explosion propagation of methane-coal dust hybrid mixtures. 23 Int. Conf. of Safety in Mines Research Institutes, Washington 1989
25. Gaug, M.; Knystautas, R.; Lee, J.H., LEAN FLAMMABILITY LIMITS OF HYBRID MIXTURES, Prog. Astronaut. Aeronaut. Vol. 105, pp155-68,1986

26. Gorol, C.; Sobala, J., APPLICATION OF SAFETY TESTING METHODS OF EXPLOSIVES TO FIREDAMP AND COAL DUST AND COMPARISON TO BLASTING SAFETY, *Propellants and Explosives*, No. 5, pp89-92,1980
27. Gray, V.R., THE ROLE OF EXPLOSIVE EJECTION IN THE PYROLISIS OF COAL, *Fuel*, 67, Sept., pp1298-1304,1988
28. Hey, M.A., THE EXPLOSION CHARACTERISTICS OF METHANE-COAL DUST HYBRID MIXTURES. A REVIEW, *Health and Safety Executive, Buxton. SME 268/464/019*,1985
29. Ishihama, W. et al., EXPLOSION CHARACTERISTICS OF COAL DUST-METHANE-AIR MIXTURES, XVIII Int. Conf. on Sci. Res. in the field of Safety at Work,1979
30. JRB, BARRERAS AUTOMATICAS CON AGENTE EXTINTOR EMPLEADAS PARA SOFOCAR LAS EXPLOSIONES DE GRISU Y DE POLVO DE CARBON, *Glukauf*, No. 2, pp90-94,1969
31. Kramlich, J.C.; Seeker, W.R.; Samuelson, OBSERVATIONS OF CHEMICAL EFFECTS ACCOMPANYING PULVERIZED COAL THERMAL DECOMPOSITION, *Fuel*, 67, Sept, pp1182-1189,1988
32. Lavilla Corcobado, F., INFLAMABILIDAD DE MEZCLAS DE AIRE-POLVO DE CARBON, Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. Departamento de Energía,1990
33. Lunn, G.A., MODELLING OF 20-L SPHERE DUST EXPLOSIONS, *Health and Safety Executive, Buxton. IR/L/DE/86/1*,1986
34. Lunn, G.A.,RESEARCH INTO DUST EXPLOSIONS,- Solids Handling Conference, Solidex 86, paper B6,1986
35. Lunn, G.A.; Quince, B.W.; Brookes, D.E., EXPLOSIONS OF METHANE/COAL DUST HYBRID MIXTURES IN THE BUXTON EXPLOSION GALLERY, *Health and Safety Executive, Buxton. IR/L/DE/86/2*,1986
36. Lunn, G.A.; Quince, B.W.; Brookes, D.E., LARGE SCALE HYBRID MIXTURE EXPLOSIONS, *Archivum combustionis*, Vol. 7, No. 1-2, pp145-164,1987
37. Lunn, G.A.; Roberts, A.F., RECENT TRIALS WITH COAL DUST/METHANE HYBRID MIXTURES, 22 Int. Conf. of Safety in Mines Research Institutes, 1987
38. Mason, C.M.; Richardson, P.A.; Van Dolah, THE INCENDIVITY OF PERMISSIBLE EXPLOSIVES IN COAL DUST-GAS-AIR MIXTURES, US Bureau of Mines, RI 7127,1968
39. Miura, H.; Glass, I.I., ON THE PASSAGE OF A SHOCK WAVE THROUGH A DUSTY-GAS LAYER, *Proc. R. Soc. Lond.*, No. 385, pp85-105,1983

40. Nagy, J.; Portman, W.M., EXPLOSIBILITY OF COAL DUST IN AN ATMOSPHERE CONTAINING A LOW PERCENTAGE OF METHANE, US Bureau of Mines, RI 5815,1961
41. Napier, D.H.; Roopchand, D.R., IGNITION PROBABILITY OF HYBRID MIXTURES, ASTM Spec. Tech. Publ. Vol. 958, pp310-323,1987
42. Ng, D.; Sapko, M.; Furno, A.; Pro, R., COAL DUST AND GAS EXPLOSION SUPPRESSION BY BARRIERS, ASTM Spec. Tech. Publ., Vol. 958, pp138-151,1987
43. Nindelt, G.; Lukas, W.; Junghans, R., RESULT OF EXAMINATIONS ON THE EXPLOSION TENDENCY OF HYBRID MIXTURES IN ELECTRIC SEPARATORS, Staub-Reinhalt. Luft, Vol. 41, No. 5, pp184-189,1981
44. Organiscak, J.A.; Doyle-Coombs, D.M., EFFECT OF SHEARER WEB DEPTH ON DUST GENERATION AND METHANE LIBERATION, US Bureau of Mines, RI 9180,1988
45. Pellmont, G., EXPLOSION AND IGNITION BEHAVIOR OF HYBRID MIXTURES, Swiss Chem. Vol. 5, No. 9a, pp59-65,1983
46. Peng, S.S.; Chiang, H.S., LONGWALL MINING. CAP. 10: METHANE AND DUST CONTROL, John Wiley & Sons, New York,1984
47. Reeh, D., EXPLOSIVE BEHAVIOR OF DUST-GAS-AIR MIXTURES, VDI-Berichte No. 304,1978
48. Richmond, J.K.; Liebman, I., A PHYSICAL DESCRIPTION OF COAL MINE EXPLOSIONS, Int. Symp. Combustion (Proc.) Vol. 15, pp115-126,1975
49. Singer, J.M., IGNITION OF COAL DUST-METHANE-AIR MIXTURES BY HOT-TURBULENT-GAS JETS, US Bureau of Mines, RI 6369,1964
50. Singer, J.M.; Bruszak, A.E.; Grumer, J., LIMITS OF FLAME PROPAGATION OF COAL DUST-METHANE-AIR MIXTURES, US Bureau of Mines, RI 7103,1968
51. Singer, J.M.; Cook, E.B.; Grumer, J., EQUIVALENCES AND LOWER IGNITION LIMITS OF COAL DUST AND METHANE MIXTURES, US Bureau of Mines, RI 6931,1967
52. Sliz, J.; Lebecki, K., EXPLOSIBILITY OF HYBRID MIXTURES, Comunicación Particular,1984
53. Tai, C.S. et al., SOME COMBUSTION PROPERTIES OF TURBULENT HYBRID MIXTURES, Annual Tech. Meet., Cent. States Sect. Comb. Instit., Argonne, IL,1987
54. Thiem, E., SAFETY INDEXES OF HYBRID MIXTURES, Brandschutz, Explosionsschutz, Vol. 18, pp88-95,1989

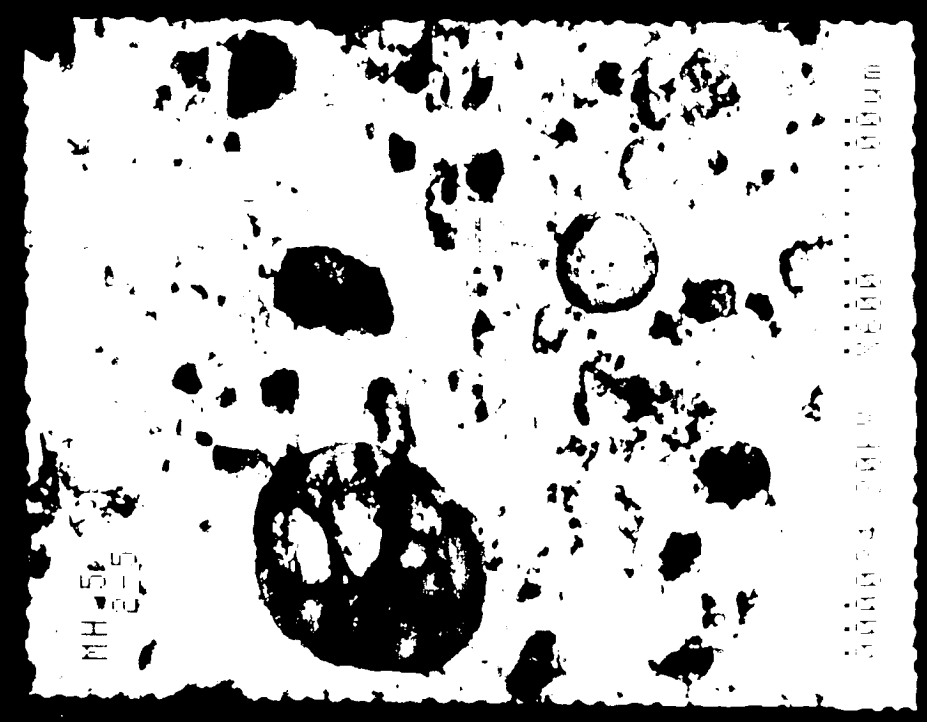
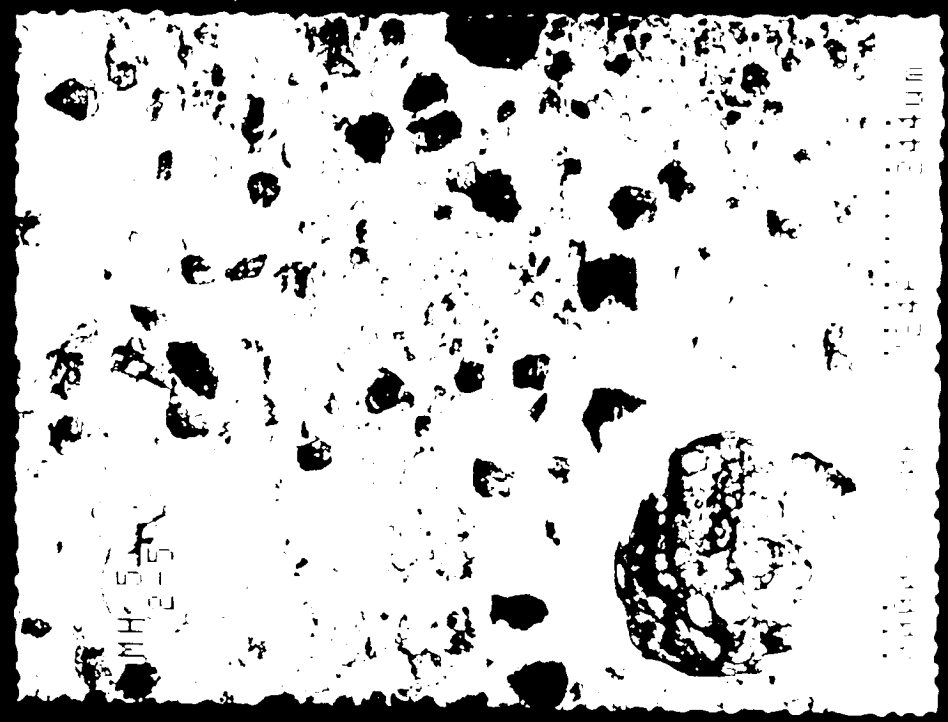
55. Tominaga, T. et al., COAL DUST EXPLOSION CHARACTERISTICS UNDER ATMOSPHERE WITH METHANE GAS COEXISTENCE, 22 Int. Conf. of Safety in Mines Research Institutes, 1987

56. Wiemann, W., INFLUENCE OF TEMPERATURE AND PRESSURE ON THE EXPLOSION CHARACTERISTICS OF DUST/AIR AND DUST/AIR/INERT GAS MIXTURE, ASTM Spec. Tech. Publ.; Vol. 958, pp33-44, 1987

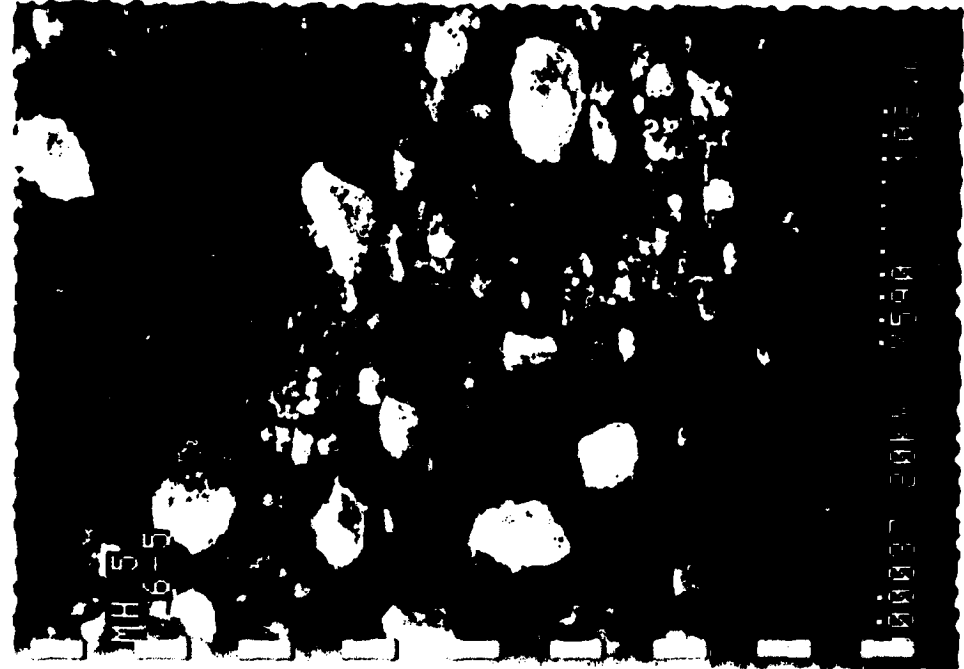
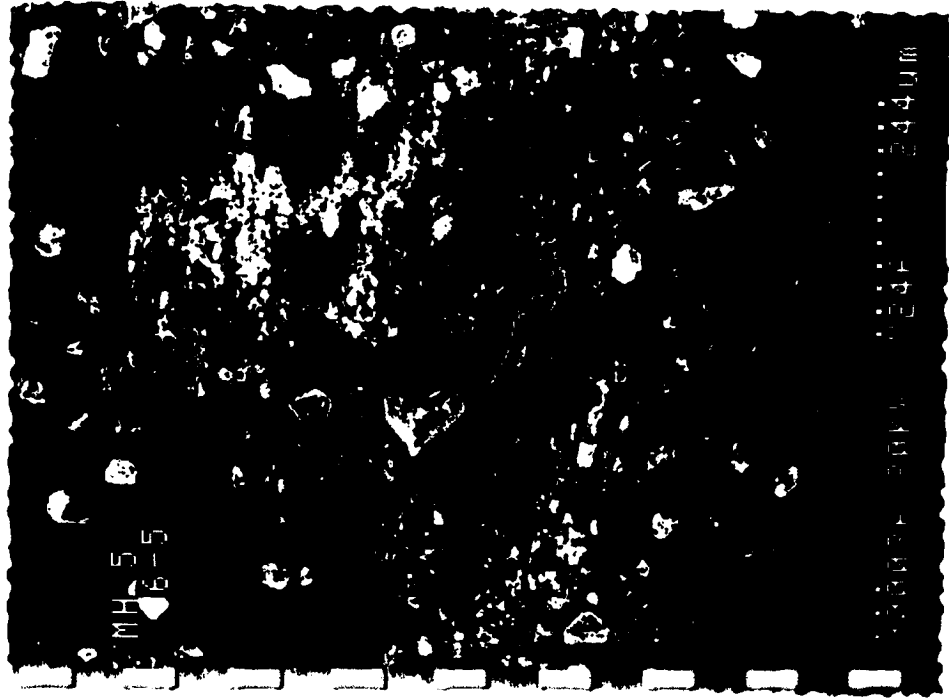
• ANEXO I:

Fotografías de
microscopio de
electrónico de
barrido de la
muestra MH-5

500000



A B E
C D F



MH 5



000035 20KV X2.01K 40um

MH 5
2-5



000035 20KV X2.01K 40um

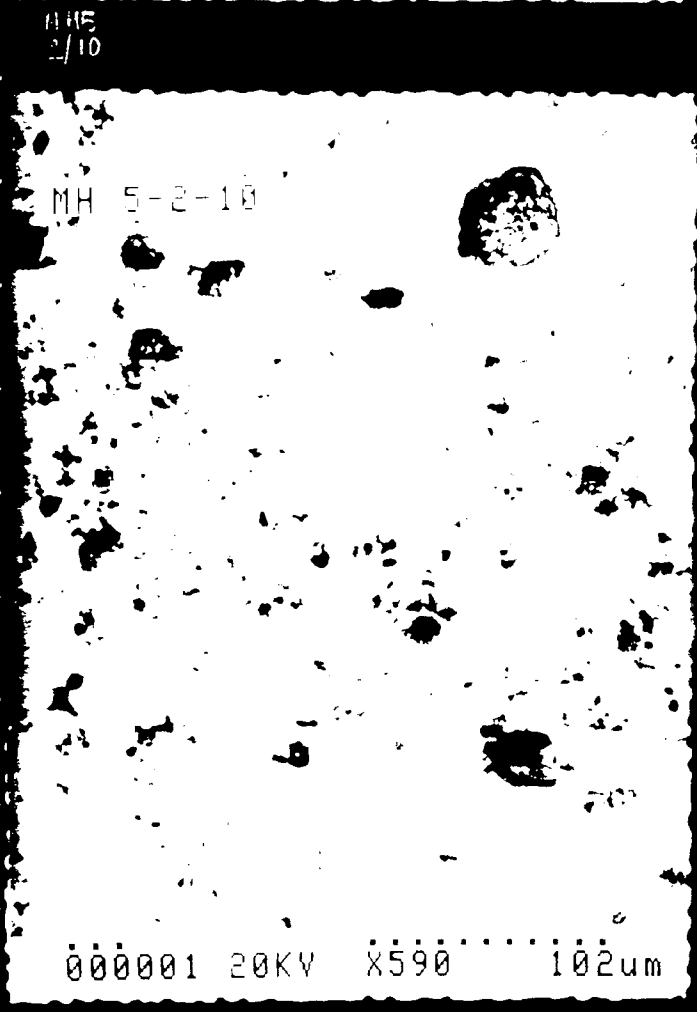
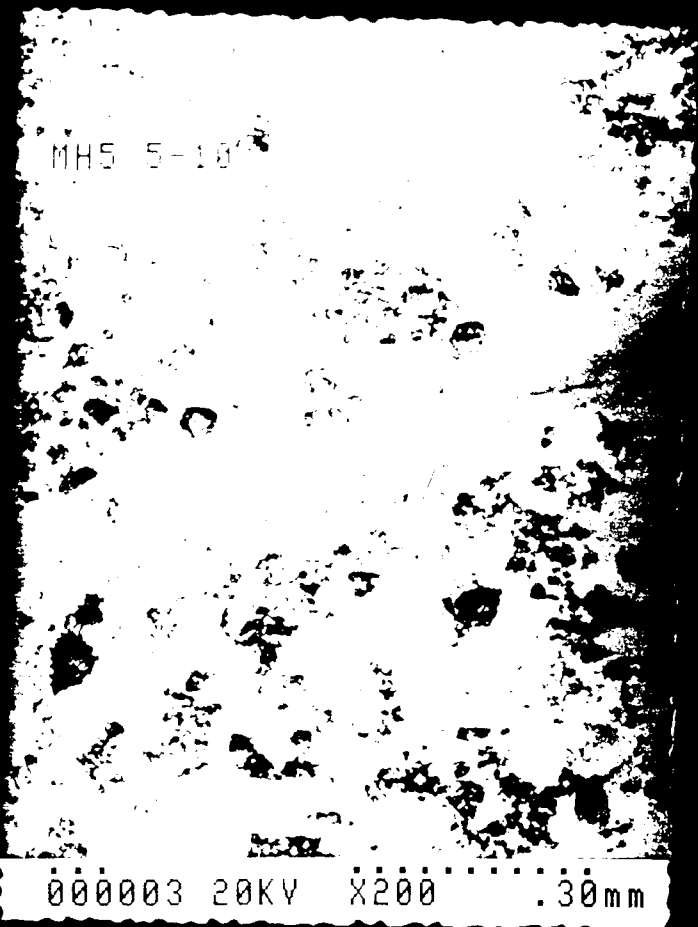
MH 5



000035 20KV X1.50K 40um

MH 5
6-5

000038 20KV X2.00K... 30um



MH5
2/10





72
28



MH5 2 EN



000031 20KV X2.03K 30um

MH5 4 EN



000034 20KV X1.49K 40um

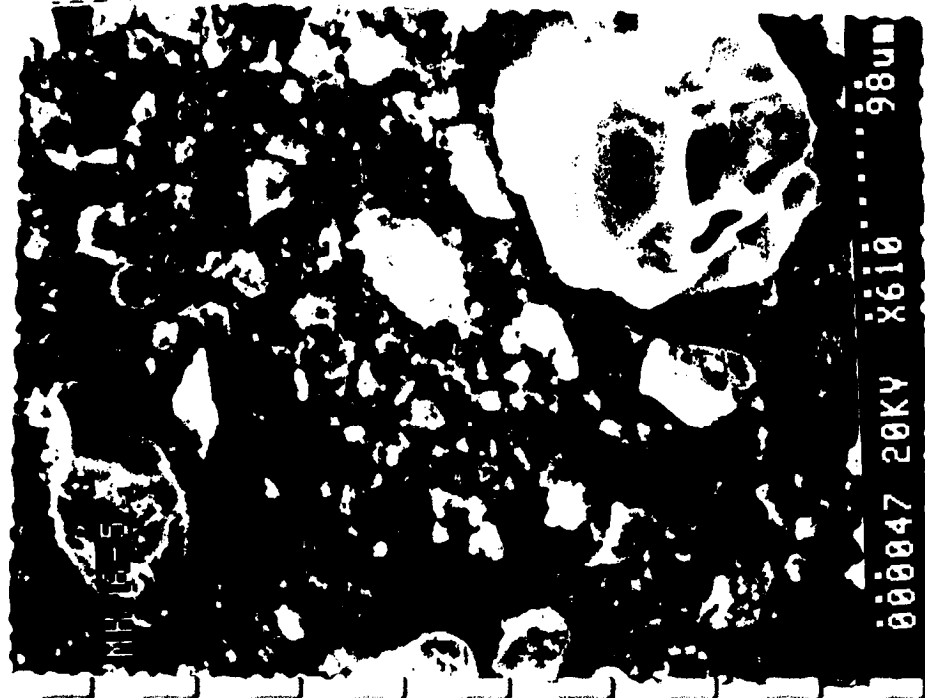
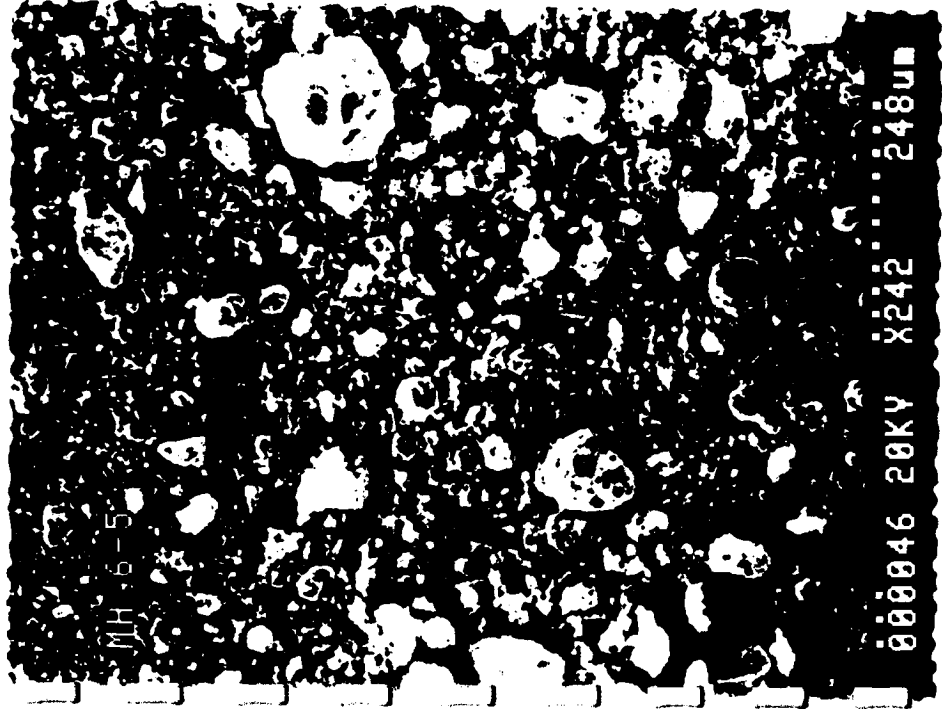
MHE 2-5M

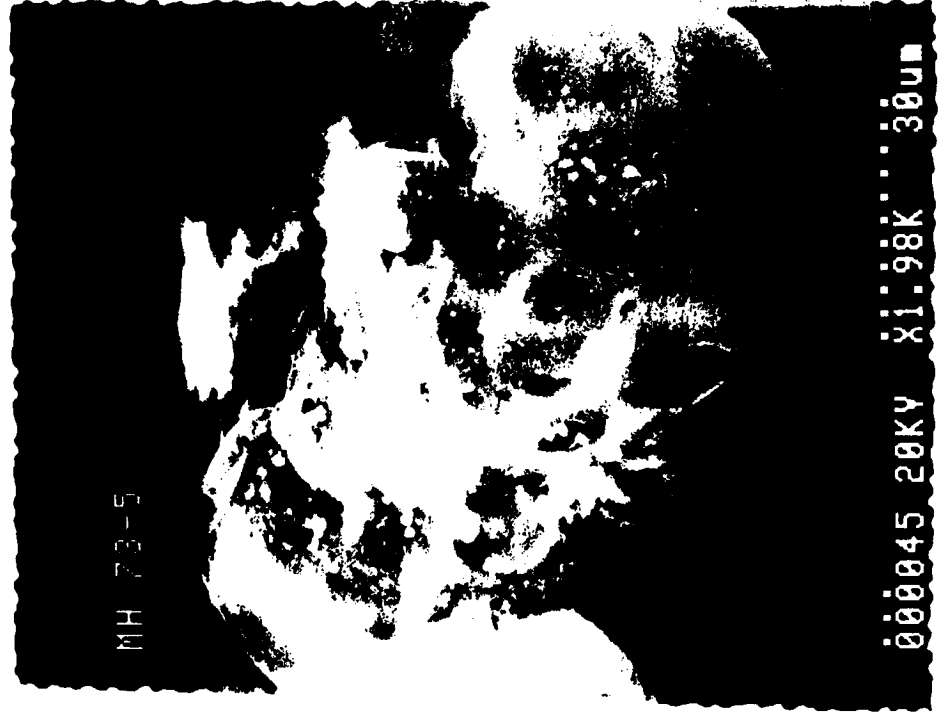
00037 20KV X1.00K 60um

• ANEXO II : Fotografías de
microscopio de
electrónico de
barrido de
muestra MH-7



13
CD







MH 6-5

000049 20KV X1.99K 30um



MH 6-5

000048 20KV X1.29K 47um



000039 20KV X246 244um



000041 20KV X590 102um



000040 20KV X600 100um





0547 20KV X1.99K 30um

• ANEXO III:

Fotografías de
microscopio
electrónico de
barrido de la
muestra MH-12





000062 20KV X250 240um



000063 20KV X600 100um



000065 20KV X580 100um

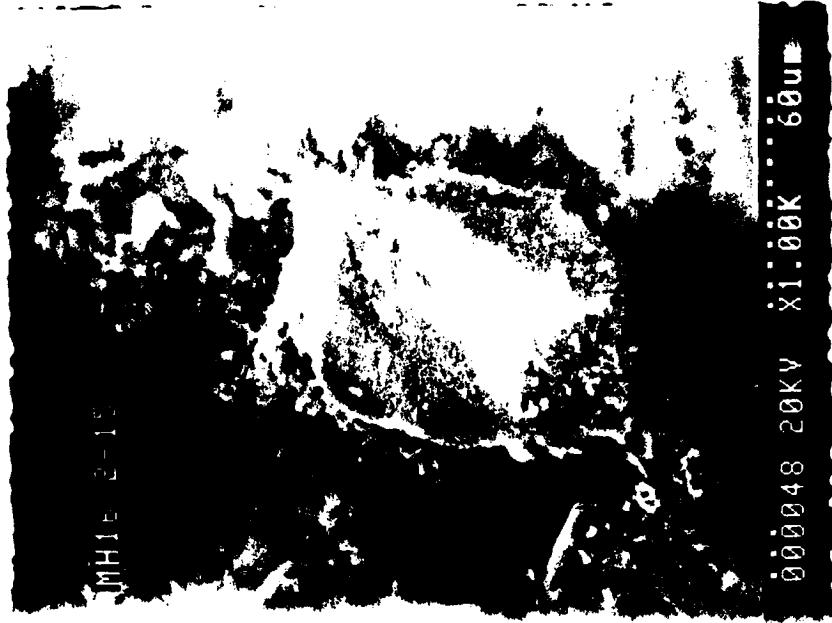




MH12 2-5M

000064 20KV X1.09K 55um

• ANEXO IV: Fotografías de
microscopio de
electrónico de
barrido de
muestra MH-16



• ANEXO V:

Fotografías de
microscopio de
electrónico de la
barra de muestra MH-20

