

GUÍA PARA LA PREVENCIÓN DE EXPLOSIONES DE POLVO DE CARBÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA Y LIMITACIÓN DE SUS CONSECUENCIAS



Diciembre 2009

ÍNDICE

BLOQUE A: IDENTIFICACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RIESGO DE DE EXPLOSIÓN POR GRISÚ Y POLVO DE CARBÓN	8
A.1 MECÁNICA DE LAS EXPLOSIONES POR POLVO DE CARBÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA	9
A.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLVO DE CARBÓN	13
A.3 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EXPLOSIÓN	21
A.4 NIVELES DE RIESGO DE PROPAGACIÓN DE UNA EXPLOSION Y MEDIDAS DE ACTUACIÓN	41
BLOQUE B: IMPLANTACIÓN, VIGILANCIA Y CONTROL DE MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE EXPLOSIONES POR POLVO DE CARBÓN	42
B.1 MEDIDAS DE PREVENCIÓN FRENTEA AL RIESGO DE EXPLOSION POR POLVO DE CARBÓN	43
B.2 ESTADO DEL ARTE EN LA LEGISLACIÓN INTERNACIONAL SOBRE INERTIZACIÓN	52
B.3 PROPUESTA DE METODOLOGIA PARA CALCULAR EL PORCENTAJE DE INERTES	55
B.4 INERTIZACIÓN DEL POLVO DE CARBÓN	58
BLOQUE C: IMPLANTACIÓN, VIGILANCIA Y CONTROL DE LAS BARRERAS PASIVAS CONTRA LA PROPAGACIÓN DE EXPLOSIONES	81
C.1 CONDICIONES DE INSTALACIÓN DE BARRERAS	82
C.2 ESTRUCTURAS Y MEDIDAS CONSTRUCTIVAS DE PROTECCIÓN.	103
BLOQUE D: EJEMPLO DE APLICACIÓN	108

PRESENTACIÓN

La seguridad y la salud en el trabajo no constituía inicialmente uno de los objetivos de la CEE, de forma que no existía ninguna norma que regulase estos aspectos, y sólo podemos referirnos al artículo 2 del Tratado constitutivo de la CEE, el cual establece como uno de sus principios de actuación la búsqueda de un alto nivel de protección y de mejora de la calidad del medio ambiente, la elevación del nivel y de la calidad de vida, la cohesión económica y social y la solidaridad entre los Estados Miembros.

Todos los aspectos relacionados con la seguridad e higiene en el trabajo eran considerados como materias puramente técnicas y que se desarrollaban en las Directivas denominadas de “Antiguo Enfoque”, actualmente se ha pasado a relacionar todos estos aspectos con los ámbitos sociales. Este cambio en el enfoque de los problemas relacionados con la seguridad e higiene no es una evolución casual, sino que está motivada por la necesidad de la Comunidad Europea de dotarse de una política social propia y no sólo conseguir una convergencia económica.

En este sentido, constituye una de las finalidades de los diferentes Estados disponer de unas herramientas de organización similares que les permitan gestionar de forma parecida la seguridad y salud en el trabajo. Los anteriores principios responden a la Directiva Marco 89/391/CEE, que surgió como consecuencia de la importante modificación del Tratado Constitutivo que mediante el Acta Única Europea, artículo 21, significó la incorporación del artículo 118A, actual artículo 137.

Dicho artículo establece como objetivo de los Estados Miembros la mejora del entorno de trabajo, para proteger la salud y la seguridad de los trabajadores, la mejora de las condiciones de trabajo y la información y consulta de los trabajadores. A tal fin, establece cuales deben ser las herramientas que se utilizarán para alcanzar tales objetivos, dicha herramienta serán las Directivas que establecerán disposiciones mínimas que habrán de aplicarse progresivamente. Estas disposiciones sólo tienen la consideración de mínimos y, por tanto, son susceptibles de ser mejoradas por parte de cada Estado Miembro. Se deja, pues, a la voluntad de cada uno de estos, la posibilidad de la

mejora de estos mínimos establecidos, entendiéndose que de esta manera no es posible legislar por debajo de estos mínimos.

Como consecuencia de todo lo anterior, la CEE promulgó la Directiva Marco 89/391/CEE, como primera Directiva amparada en el citado artículo 118A. Es una norma breve de tan sólo 19 artículos, a pesar de que en su artículo 16 establece la posibilidad de que se deriven de ella las citadas Directivas específicas, de las cuales forman parte:

- La Directiva 1999/92/CE, relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas.
- La Directiva 92/104/CEE, relativa a las disposiciones mínimas destinadas a mejorar la protección en materia de seguridad y salud de los trabajadores de las industrias extractivas subterráneas y a cielo abierto.

La Directiva 1999/92/CE, es la decimoquinta directiva con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la citada Directiva Marco. El cumplimiento de las disposiciones mínimas tendentes a mejorar la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores con riesgo de exposición debido a atmósferas explosivas es imprescindible para garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores. En caso de explosión, los efectos incontrolados de las llamas y presiones, así como la presencia de productos de reacción nocivos y el consumo de oxígeno ambiental necesario para respirar, ponen en peligro la vida y salud de los trabajadores.

Las explosiones pueden producirse debido a:

- Materiales procesados o utilizados por los equipos, sistemas de protección y componentes, por ejemplo minerales obtenidos (arrancados) como parte del proceso de explotación.
- Materiales liberados por el equipo, sistemas de protección y componentes.

- Materiales en la proximidad del equipo, sistemas de protección y componentes.
- Materiales con los cuales están contruidos los equipos, sistemas de protección y componentes.

La protección contra la explosión de equipos, sistemas de protección y componentes depende de:

- El diseño y la construcción del equipo, sistemas de protección y componentes.
- El uso a que está destinado.
- Las condiciones ambientales existentes (condiciones ambiente).
- Los materiales explotados y manipulados.

En la norma EN 1127-2:2002 “Atmósferas explosivas - Prevención y protección frente a la explosión – Parte 2: Conceptos básicos y metodología para minería” se especifican “dos condiciones peligrosas” teniendo en cuenta las definiciones de la Directiva 94/9/EEC:

- Condición peligrosa 2 (atmósfera potencialmente explosiva): Intervalo entre el 0% y el LIE o por encima del LSE hasta el 100% de grisú en aire.
- Condición peligrosa 1 (atmósfera explosiva): Intervalo entre el LIE y el LSE de grisú en aire.

En el caso de la minería del carbón, el grisú y el polvo de carbón son liberados por la actividad minera. De esta forma, los riesgos potenciales de explosión son mayores como resultado de las mezclas explosivas aire-gas o polvo-gas formadas y que no pueden ser eliminadas completamente mediante las medidas preventivas adoptadas.

Las mezclas aire-grisú son diluidas mediante la ventilación y evacuadas hasta la superficie (exterior), de forma que el contenido de gas en la explotación se mantiene por debajo del límite inferior de explosión. Sin embargo, como resultado de un fallo del sistema (por ejemplo la avería de un ventilador), la emisión repentina de gran cantidad de gas, o el aumento en la liberación de grisú como consecuencia de la disminución de la presión del aire o el

incremento en la producción de carbón, pueden superarse las concentraciones de gas permitidas. Las atmósferas explosivas así originadas, aunque limitadas en el espacio y tiempo, pueden originar riesgos no sólo en el punto de origen sino también en las vías de evacuación, retornos de aire y otras estructuras anexas a la mina.

Las mezclas aire-polvo de carbón son neutralizadas, normalmente, en el origen de la emisión mediante inyección de agua, sistemas de captación de polvo en minadores de galería en avance y el tratamiento con polvo inerte para reducir el potencial de explosión. Sin embargo, el riesgo de explosión puede aparecer si el polvo explosivo se pone en suspensión, por ejemplo en los puntos de transferencia, en tolvas o en otros sistemas de transporte.

A diferencia de otras industrias, en las minas con grisú los equipos eléctricos y no eléctricos y el personal de la explotación están en contacto permanentemente con mezclas de gas y polvo las cuales, bajo condiciones desfavorables, pueden formar atmósferas explosivas. Por consiguiente, existen en vigor estrictos requisitos particulares de seguridad para la protección frente a las explosiones y la obligación de elaborar planes de evacuación para actuar cuando existan condiciones de riesgo.

A diferencia de la EN 1127-1:2008 “Atmósferas explosivas – Protección y prevención frente a la explosión – Parte 1: Conceptos básicos y metodología”, la cual no incluye la minería, el término “área” (zona) no se utiliza para la clasificación de los lugares de trabajo expuestos al peligro de explosión ya que, este término, representa un espacio determinado, claramente dimensionado, alrededor de una instalación industrial permanente, por ejemplo, una planta química con instalaciones fijas y límites determinados alrededor de diferentes procesos u operaciones industriales. Así, la Directiva 94/9/EC diferencia la industria minera y no-minera clasificando los equipos para minería como Grupo I y los no mineros como Grupo II.

En las minas grisuosas, la decisión sobre si los mineros pueden o no trabajar en un determinado emplazamiento depende de las condiciones ambiente existentes en cada momento. Tradicionalmente, se utiliza como una práctica común en todos los estados miembros de la UE la desconexión de los equipos

y evacuación de los mineros de sus lugares de trabajo cuando las condiciones ambiente alcanzan un porcentaje específico del LIE del grisú en aire, que se define en las diferentes legislaciones nacionales.

En la práctica, las legislaciones nacionales exigen que se realicen mediciones de gas en puntos concretos y con intervalos definidos, y además, que se tomen medidas adecuadas para la desconexión de los equipos, bien manual o automáticamente, si la concentración de grisú alcanza determinados valores.

Una subdivisión de los peligros originados por una atmósfera de gas explosiva y de aquellos causados por una atmósfera explosiva de polvo, en contraste con la EN 1127-1:1997, no es admisible en minería subterránea de carbón en la que los peligros son originados, simultáneamente, por grisú y por nubes de polvo inflamable. De esta forma, las medidas de protección contra la explosión cubrirán ambos peligros, los causados por grisú y los causados por polvos inflamables.

La Directiva 94/9/EC amplía la definición de atmósfera potencialmente explosiva para incluir tanto el grisú como los polvos combustibles. Importantes investigaciones han demostrado que la mínima energía de ignición (MIE) de las mezclas de polvo de carbón–aire es varios cientos de veces la de las mezclas de grisú-aire y, el intersticio experimental máximo de seguridad (IEMS) para las partículas de polvo de carbón es más del doble que para el grisú. Parece razonable asumir que los equipos, sistemas de protección y componentes que son diseñados y construidos para su uso en atmósferas con grisú son también adecuados para uso en mezclas polvo de carbón-aire.

La comparación entre datos experimentales de grisú y polvo de carbón sólo es relativa a atmósferas. De forma que cuando se puedan formar capas de polvo de carbón, será necesario tomar precauciones adicionales.

BLOQUE A: IDENTIFICACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RIESGO DE DE EXPLOSIÓN POR GRISÚ Y POLVO DE CARBÓN

A.1 MECÁNICA DE LAS EXPLOSIONES POR POLVO DE CARBÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

A.1.1 EXPLOSIÓN PRIMARIA

En la minería de carbón existen dos escenarios/maneras diferentes en los cuales se puede provocar una explosión primaria. Por una parte debido a una explosión de grisú y por la otra debido al polvo de carbón:

- a. En el caso de una mina de carbón puede imaginarse la explosión primaria como una **explosión de grisú**. Esta explosión, que incluso puede ser solamente la deflagración de una pequeña bolsa de gas, más fácil de inflamar que el polvo de carbón (EMI, energía mínima de ignición de grisú es mucho más pequeña que EMI de polvo de carbón) es capaz de poner en suspensión el polvo de carbón depositado en galerías adyacentes. Esto daría lugar a una explosión secundaria que se puede propagar a lo largo de cientos de metros de sucesivas galerías a medida que vaya levantando el polvo que alimente el frente de llama.
- b. Para que una explosión de polvo de carbón tenga lugar deben cumplirse simultáneamente unas condiciones que, es lógico suponer, no se van a cumplir en todos los puntos de una mina de carbón donde exista polvo. Sin embargo, el estudio de diferentes escenarios protagonistas de explosiones de polvo muestra que estos han afectado grandes extensiones y no solo las zonas localizadas. Esta situación unida al hecho de que en toda la mina se producen acumulaciones de polvo de carbón, ha conducido a establecer el siguiente mecanismo: cuando se alcanzan localmente las condiciones mencionadas puede producirse la explosión de una primera y pequeña nube de polvo, explosión denominada primaria, de no excesiva importancia y que, en principio debería afectar solo una pequeña área. Ahora bien, esta explosión primaria genera ondas de presión que aumentará la turbulencia del ambiente y favorecerá el que una cierta cantidad del polvo depositado pase a la atmosfera en forma de suspensión. Con esto se alcanzan de nuevo las condiciones necesarias para una explosión y es la propia explosión primaria que propicia la nueva explosión llamada secundaria. Los efectos de esta explosión, que al propagarse puede dar lugar a sucesivas

explosiones en diferentes zonas de la mina, son realmente catastróficos debido a la onda de presión y el frente de llama que puede generar. Sirva como ejemplo la mina Viking en Estados Unidos.

Existe otra posibilidad de iniciar una explosión de polvo de carbón (la que menos posibilidades tiene de ocurrir).

En una mina de carbón se está generando continuamente polvo. El polvo depositado en forma de capa puede sufrir un auto calentamiento por diversas razones. Dependiendo del carácter o composición de polvo de carbón puede iniciarse un proceso exotérmico, bien porque la capa esté depositada sobre una superficie caliente, bien por las características propias del polvo o de contaminantes que en él pueden aparecer.

Hay tres mecanismos que pueden dar lugar a ese calentamiento:

1. El carbón empieza a oxidarse en cuanto entra en el contacto con la atmosfera. Es un proceso exotérmico pudiendo alcanzarse la temperatura de inflamación.
2. Un carbón que este más seco que lo correspondiente a su humedad, tenderá a ganar siempre que pueda humedad, este proceso es exotérmico y puede generar calor suficiente para llegar a la temperatura de inflamación.
3. La pirita presente en algunos carbones también se oxida dando lugar a calor.

Estos procesos de auto calentamiento generan claramente un riesgo de incendio. Pero también pueden dar lugar a explosiones de polvo cuando se ha alcanzado la temperatura de inflamación y esa capa pasa repentinamente a la atmósfera en forma de nube generando una llama que encuentra condiciones propicias para propagarse.

A.1.2 MECANISMO DE PROPAGACIÓN. EXPLOSIÓN SECUNDARIA

Centrando la atención en la propagación de la explosión secundaria (polvo de carbón) a lo largo de una galería de mina, se comprueba experimentalmente que por delante del frente de llama viaja una onda de presión. Esta onda expansiva es la que pone en suspensión parte del carbón depositado, creando

así una nube de polvo que es inflamada posteriormente por el frente de llama que viaja detrás.

En estudios realizados en galerías experimentales (mina Bárbara -Polonia-) se ha podido comprobar cómo normalmente la velocidad de la onda de presión se mantiene constante y es superior a la del frente de llama que suele disminuir, por lo que la distancia entre ambos aumenta a medida que la explosión se propaga. Únicamente en el caso improbable de detonación el frente de onda de presión y de la llama viajan juntos a velocidades del orden de 2000 m/s.

Cuando la onda de presión, llamada onda de choque viaja a velocidad supersónica, alcanza el extremo abierto de la galería, engendra una onda de expansión que progresa hacia el interior de la mina. Esta onda provoca una depresión o succión, fenómeno que puede apreciarse visualmente en el extremo abierto de la galería: parte del humo saliente retorna hacia el interior de la galería. Esta onda de expansión interactúa con el frente de llama, que seguía a la onda de presión a cierta distancia con una velocidad superior a la del aire procedente, de forma que resulta acelerado.

Tanto el frente de llama como el de onda actúan como un pistón, de forma que el aire que está delante es, en cierta medida comprimido, mientras que el aire que queda atrás resulta de alguna forma expandido (en el caso del frente de llama debe tenerse presente que se trata de gases calientes de combustión y, por tanto no puede considerarse que estén expandidos, sino más bien que tienden a ello). Puede imaginarse que en los primeros metros de galería, la onda de presión, o la succión detrás de ella, "tira" del frente de llama, que a su vez es empujado por los gases de combustión.

A medida que el frente progresa, el efecto de succión es menor por encontrarse la onda de presión más lejos y además, los gases de combustión pueden expansionarse también hacia la zona ya recorrida, por lo que se reducirá la velocidad de propagación del frente de llama.

Cuando la onda de expansión generada en el extremo abierto interacciona con el frente de llama se produce una desestabilización. En efecto, una llama premezclada propagándose a través de una mezcla aire-polvo de carbón es una onda de velocidad relativamente baja. Los gases quemados son de 6 a 8

veces menos densos que el gas no quemado delante de la llama. Si tal llama es afectada por un proceso dinámico externo, como puede ser la llegada de la onda de expansión, de tal forma que los gases fríos empujan a los productos gaseosos calientes, aparecerá un mecanismo de inestabilidad (denominado de Taylor) que provocara el aumento del área superficial de la llama y su aceleración.

La interacción entre la llama y la onda de presión puede repetirse dependiendo de la longitud de la galería y las velocidades respectivas de aquellas, de forma que el frente de llama puede verse sucesivamente acelerado y frenado.

A.1.3 EL PROCESO DE COMBUSTIÓN DEL POLVO DE CARBÓN

En el mecanismo de combustión de las partículas de carbón parece no haber acuerdo entre los diversos autores:

1. Algunos autores, postulan por el mecanismo clásico de reacción heterogénea entre el sólido y el fluido, que se basa en la propagación de una explosión de polvo de carbón que puede tener lugar sin satisfacer la condición de destilación o producción de materias volátiles en cantidad suficiente para hacer una mezcla gaseosa explosiva. El proceso se desarrollará en varias fases.

En la primera el reactivo gaseoso se difunde hasta la superficie del sólido a través de la película gaseosa que le rodea, en la segunda el reactivo es absorbido, penetrando hasta la superficie del núcleo que no ha reaccionado (superficie de reacción), a continuación tiene lugar la reacción propiamente dicha.

La siguiente fase es la difusión de los productos gaseosos formados a través de la capa de cenizas hacia la superficie exterior del sólido.

Finalmente, los productos gaseosos de la reacción se difunden a través de la capa gaseosa hacia el seno del fluido. Este modelo de reacción heterogénea con núcleo sin reaccionar, puede alterarse suponiendo la conversión progresiva en la que el gas reaccionante penetra y reacciona simultáneamente en toda la participa sólida.

2. Para otros autores, sin embargo, la reacción es homogénea, pues se basa en que no se produce inflamación hasta que el polvo comienza a destilar los volátiles. Cuando las partículas de carbón se ven afectadas por una fuente de calor (como puede ser el calor radiado por el frente de llama) se produce una pirólisis en la que los productos volátiles se separan del residuo carbonoso. Esos gases se mezclan con el aire y se produce la combustión en fase homogénea en la que la ignición inicial se convierte en llama y el calor de la llama provoca la ignición de los volátiles de las sucesivas partículas.

Se plantea, por tanto, el problema de saber si la reacción empieza en la superficie de las partículas o en las materias volátiles que éstas generan. Puesto que el flujo de las materias volátiles aumenta con el tamaño de las partículas, cuanto más finas sean éstas, mayor será la proporción de reacción en la superficie de las partículas sólidas en relación a la de reacción con los volátiles. Para un tamaño suficientemente pequeño, la inflamación empieza en las partículas sólidas (reacción heterogénea), mientras que con tamaños mayores la inflamación se debe a una reacción entre gases (reacción homogénea).

El proceso de la propagación de una explosión de polvo de carbón puede suponerse, por consiguiente, como una primera oxidación en fase heterogénea (el aire llega con gran rapidez y facilidad a la superficie de las partículas) en la que se produce un calentamiento y comienza el desprendimiento de los volátiles. A continuación esos hidrocarburos gaseosos se mezclan con el aire y se produce la combustión en fase gaseosa. Finalmente, el residuo sólido carbonoso se oxida en fase heterogénea.

A.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLVO DE CARBÓN

A.2.1 TOMA DE MUESTRAS

La toma de muestras debe realizarse de tal manera que se obtenga una muestra **representativa** del carbón que se está evaluando.

Una **muestra** denominada de **roza** corresponde a una muestra de carbón tomada en el frente de arranque de una galería o taller, estas muestras

tomadas en la capas sirven para conocer la calidad el propio carbón en cuanto a sus propiedades relativas al riesgo de explosión.

Sin embargo es también fundamental conocer el estado real bajo el que aparece el polvo de carbón en la mina, ya que durante la realización de diversas operaciones, como son típicamente las incluidas en el arranque y en el transporte de carbón, se producen grandes cantidades de material muy fino, que tiene a acumularse en zonas características (puntos de transferencia de cintas, tolvas, planos inclinados, zonas de menor velocidad de aire, etc.). Este polvo de carbón depositado sufre con frecuencia, ensuciamiento por aporte de estériles, envejecimiento por contacto con la atmósfera y captación de humedad, tanto del ambiente como aportes directos de agua. Puede suceder que un carbón claramente inflamable se presente bajo condiciones tales que sea incapaz de propaga una explosión anteriormente iniciada.

Por ello es necesario estudiar en cada mina ese polvo de carbón, cuyas muestras se denominan de ***tipo natural*** y seleccionar los emplazamientos más propicios para su depósito en cada caso.

Las muestras de las capas de polvo en las galerías deben ser, por tanto, recogidas del suelo y los laterales y en las estructuras, si es que las hubiere, como las de las cintas transportadoras, para obtener una muestra representativa de polvo depositado en la galería.

Otros lugares de formación de polvo en minería subterránea que están ligados a zonas de acumulaciones del mismo son susceptibles de formar nubes de polvo de carbón, y que deben ser tenidos en cuenta a la hora de tomar muestras, son:

◆ **Frentes de avance mecanizado**

La tendencia actual en el avance de los subniveles es la aplicación de minadores. En general, la disposición de la ventilación secundaria es aspirante y la instalación obligada de equipos de filtración en la canalización proporciona una protección suficiente contra el polvo. Sin embargo, hay casos que la ventilación de estas labores es insuficiente, con lo cual, los niveles de empolvamiento son muy elevados, debido a la baja eficiencia de los sistemas de riego de que están dotados los útiles de corte de estos equipos.

◆ **Frentes de avance convencional**

En ocasiones, el carácter derrabable de las capas dificulta el avance mecanizado, aplicándose en este caso medios convencionales tales como, el disparo parcial con explosivos, el arranque con martillo picador y el disparo con aire comprimido a alta presión y, en todos los casos, la carga del mineral con escrapper.

◆ **Perforación de barrenos**

Para provocar el hundimiento del macizo se utiliza bien el disparo con explosivos o con aire comprimido a alta presión. En ambos casos, se realizan barrenos en el mineral, ascendentes y de longitud proporcionada a la altura del macizo a hundir. En algunos casos, la perforación de estos barrenos no es posible realizarla con barrido de agua, lo cual de lugar a importantes cantidades de polvo.

◆ **Arranque y carga**

Arranque y carga de mineral constituye un foco importante de polvo, especialmente cuando se trata de mineral seco. La movilización del mineral que se produce durante esta fase causa avenidas muy significativas de polvo esporádicamente.

◆ **Trasvases de mineral en el transporte**

Los trasvases intermedios de mineral de panzer a cinta deben también ser tenidos en cuenta puesto que también constituyen importantes focos de polvo.

◆ **Transporte de mineral por los pozos primarios**

El transporte de mineral por los pozos primarios, con pendientes aproximadas de 35°, se realiza por gravedad, circulando el material sobre chapas metálicas. La violencia de este tipo de transporte hace que se ponga en suspensión gran cantidad de polvo, el cual se incorpora, a través de la instalación de ventilación secundaria, a los diferentes subniveles abiertos.

La toma de muestras de polvo de carbón viene determinada por la norma UNE 22331-90. En esta norma se determinan los distintos tipos de muestra que

pueden darse, como la muestra natural y la muestra de roza, entre otras, y la cantidad requerida de cada una de ellas.

Asimismo, es importante que la persona designada para de realizar la toma de muestras esté formada en este campo y la identificación de las muestras se realice convenientemente.

Para su envío a un laboratorio se empaquetarán en envases normalizados según UNE 22-332.

Para la toma y preparación de muestras de lignitos duros, hullas y antracitas, utilizar la norma UNE 32-102/1.

A.2.2 FACTORES QUE AFECTAN A LOS PRINCIPALES PARÁMETROS DE EXPLOSIVIDAD

A.2.2.1 Contenido en materias volátiles

En el caso de polvo de carbón los siguientes factores afectan de forma decisiva su composición química:

- a) Contenido en materias volátiles
- b) Cenizas y humedad

a) Contenido en materias volátiles

Contenido en materias volátiles (VSSC) se determina experimentalmente y expresa el contenido en materias volátiles de carbón en base seca exenta de cenizas (véase la formula 1).

$$V_{SSC} = [100 \cdot V / (100-H)] / [1-C_S / 100-H] \quad (1)$$

Donde:

H: contenido en hidrógeno, en %, según ISO 625

C_s: contenido en volátiles, en %, excluido el CO₂, según UNE 32.019

V: Contenido en volátiles, en %, excluido el CO₂, según UNE 32.019

El contenido de volátiles afecta a todos los parámetros de explosividad. La temperatura mínima de inflamación se reduce al aumentar los volátiles, tanto si

se trata de muestra depositada en capa como si se trata de muestra de polvo en suspensión. La concentración mínima explosiva también se reduce considerablemente al aumentar el porcentaje de volátiles y lo mismo sucede con la energía mínima de inflamación.

b) Ceniza y humedad

Ambos factores producen el mismo efecto sobre la explosividad del polvo de carbón. La explosividad se reduce por la presencia de agua o de inertes sólidos, ya que ambos absorben calor de la reacción de combustión y pueden apantallar a las partículas combustibles, dificultando el acceso de las radiaciones de calor; sin embargo, el agua tiene otro efecto, que es el de dificultar la dispersión del polvo de carbón por aumentar su cohesión, mientras que algunos polvos inertes pueden inhibir el proceso de combustión.

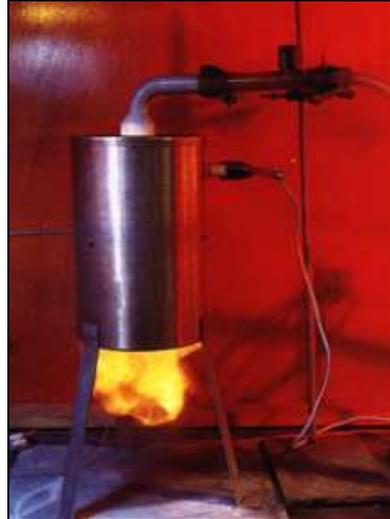
Las cenizas y la humedad producen la reducción de los valores de presión máxima de explosión y velocidad de aumento de presión y provocan que se precisen valores más altos de temperaturas, de concentraciones y de energías mínimas de inflamación.

A.2.2.2 Temperatura mínima de ignición (TMI)

Es la menor temperatura a la que se inicia el proceso de ignición de una muestra de polvo.

Se determina mediante un ensayo de laboratorio según la norma UNE EN 50281-2-1 en el que se comprueba si una fuente de calor presente es capaz o no de iniciar el proceso.

Se puede realizar el ensayo con la muestra dispersada en forma de nube (TMI_n), o depositada en forma de capa (TMI_c). El aparato de ensayo para la TMI_n consiste en un cilindro vertical calentado eléctricamente a una cierta temperatura, en el que se provoca la dispersión de polvo. La aparición de llamas evidencia la inflamación de la muestra fijada.

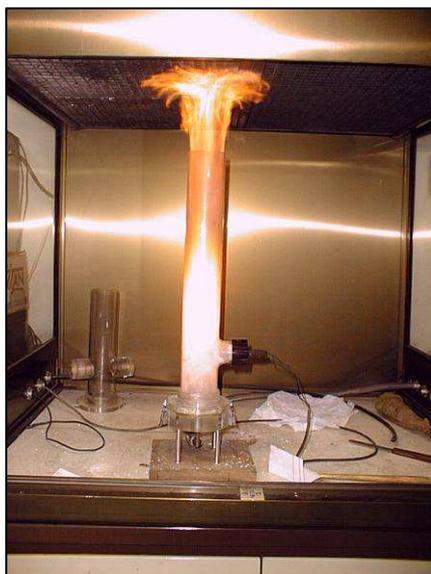


Fotografía A.1 Determinación de la TMI

A.2.2.3 Límite inferior de explosividad (LIE)

Existe un intervalo de concentraciones de polvo en suspensión para la cual la mezcla de aire-polvo es potencialmente explosiva. Los límites del intervalo son las concentraciones mínima y máxima explosivas.

Experimentalmente sólo se mide el límite inferior, LIE. El método de ensayo para la determinación del límite inferior de explosividad se basa en la cámara esférica de 20 l. La muestra se introduce en la esfera de acero inoxidable de 20 litro de volumen, dispersándose. La fuente de ignición está situada en el centro de la esfera. La variación de presión con el tiempo se mide mediante transductores (véase la norma UNE-EN 14034-3:2006).



Fotografía A.2 Tubo del Hartmann

A.2.2.4 Energía mínima de ignición (EMI)

La energía mínima de ignición es la menor energía eléctrica, obtenida por descarga capacitiva, que es capaz de iniciar la ignición de una nube de polvo.

Esta se puede determinar utilizando la norma UNE-EN 13281:2003.

En la primera, el dispositivo de ensayo es un tubo Hartmann. La energía se calcula mediante la expresión $E = \frac{1}{2} CV^2$, donde C es la capacidad de los condensadores empleados en el circuito de descarga y V la tensión aplicada. El valor obtenido de energía mínima de inflamación (EMI) permite determinar si diferentes fuentes de ignición aportan o no la energía suficiente para la inflamación.

Asimismo, mediante la norma UNE-EN 13281:2003 se puede determinar la energía mínima de ignición de polvo de carbón utilizando descargas capacitivas, pero utilizando distintos aparatos.

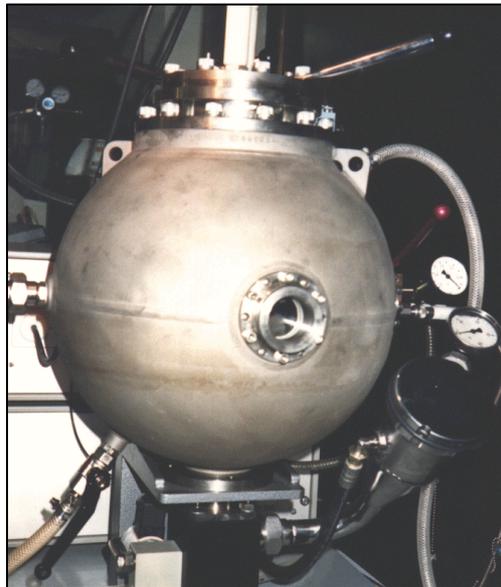
A.2.2.5 Máxima presión de explosión (P_{max}) y Velocidad máxima de aumento de la presión (K_{max})

Durante el proceso de una explosión puede medirse y registrarse la presión que se va alcanzando en el recinto en que aquella tiene lugar. La presión aumenta sólo moderadamente en los instantes iniciales, para pasar enseguida

a alcanzar valores muy altos. Se llama máxima presión de explosión (P_{max}) a la presión más alta alcanzada durante el proceso.

Puede medirse también la velocidad de la variación de la presión. La velocidad promedio y, sobre todo, la velocidad máxima de aumento de presión, K_{max} (gradiente máximo de presión $(dP/dt)_{max}$) dan indicación de efecto destructivo de una explosión y se emplea en el cálculo y diseño de sistema de explosión contra explosiones.

Estos parámetros se determinan en un aparato esférico de 20 litros de capacidad, que tiene una fuente de ignición en su centro geométrico y con un dispositivo de dispersión que asegura una correcta dispersión del polvo en el interior de la cuba, según la norma UNE-EN 26184-1:1993.



Fotografía A.3 Determinación de P_{max} y K_{max}

Mientras que 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 aquel. De hecho, la denominada Ley Cúbica establece una dependencia clara entre variables:

$$(dP/dT)_{max} \times V^{1/3} = K_{St}$$

K_{st} es una constante característica de cada tipo de polvo combustible, que se emplea para establecer una clasificación de la explosividad de polvo.

Cuando se obtiene el valor de $(dP/dT)_{max}$ para un intervalo amplio de concentraciones, el valor máximo de K_{st} se le viene denominando K_{max} .

A.3 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL RIESGO DE EXPLOSIÓN

A.3.1 INTRODUCCIÓN

Cualquier metodología de evaluación del riesgo de desencadenamiento de un suceso debe contemplar como mínimo los dos parámetros más significativos que permiten estimar el nivel de riesgo existente. Estos parámetros básicos son:

- a) la **probabilidad** de que se desencadene el suceso y,
- b) las **consecuencias**, estimadas en términos de daños a personas o instalaciones como consecuencia del suceso.

El nivel de riesgo vendrá determinado por el producto de estas dos magnitudes, ya sea en términos cuantitativos o cualitativos.

En general los riesgos se expresan de tres formas:

- **Cualitativamente**, por ejemplo como; alto, medio, bajo, tolerable, intolerable o aceptable.
- **Cuantitativamente**, calculando la probabilidad de que suceda un determinado evento.
- **Semicuantitativamente**, donde los elementos del riesgo están dados mediante una puntuación numérica resultado de la combinación de algunas formas de valoración semicuantitativa, que permite que los riesgos sean clasificados.

Como se ha visto en el apartado A.1 la presencia del polvo de carbón en relación con las explosiones puede analizarse desde dos puntos de vista distintos.

Establecida la diferencia existente entre explosión primaria de polvo de carbón y explosión secundaria, a continuación se tratará únicamente la evaluación del riesgo de explosión primaria.

En la actualidad no existe ningún método específico para la evaluación de los riesgos de explosión en minería subterránea. El método utilizado en esta guía es el propuesto en el Proyecto RASE (SMT4-CT97-2169) 2000, “Explosive Atmospheres: Methodology on Risk Assessment of Unit Operations and Equipment”, proyecto europeo que recoge una metodología básica para la evaluación de riesgos de explosión en equipos y unidades de operación para su uso en atmósferas potencialmente explosivas. Esta metodología se fundamenta en la identificación sistemática de todas las situaciones con riesgo de explosión que pueden presentarse durante el desarrollo de un proceso.

Si bien la metodología seleccionada ha sido desarrollada para la evaluación de los riesgos de explosión producidos por equipos y unidades de operación en ambientes industriales, su esquema puede extrapolarse con facilidad a tareas mineras siempre y cuando los trabajos contengan en su ejecución características de un proceso, es decir, existan equipos en funcionamiento entre los cuales existe alguna relación en el desarrollo de la tarea, y además se tenga la posibilidad de existencia de atmósferas explosivas en determinados momentos, producidas por la presencia de grisú o polvo inflamable en concentración variable.

Independientemente de lo anterior, existe **una importante diferencia entre la evaluación de los riesgos de explosión producidos por equipos y unidades de operación en ambientes industriales y la evaluación de los riesgos de explosión existentes en la actividad minera**. En las actividades mineras con presencia de gas, la evaluación de la posible atmosfera explosiva presente ha de realizarse de una forma general en función de la grisuosidad de las capas explotadas, de manera que es difícil establecer con exactitud el volumen de atmósfera explosiva implicada en la posible explosión en cada situación y de esta manera las posibles consecuencias, en contra de lo que sucede en la industria en general, en dónde incluso existe una metodología normalizada para la determinación de las tasas de escape de atmosferas explosivas UNE-

EN 60079-10-1:2010 “Atmósferas explosivas. Clasificación de emplazamientos”.

Por este motivo, se efectuará una variación respecto de la metodología general propuesta por el proyecto RASE. Este efectúa la evaluación de riesgos de explosión a través de cinco pasos que son:

1. Determinación de la tarea minera a evaluar.
2. Identificación de riesgos.
3. Estimación de las consecuencias del riesgo / probabilidades.
4. Valoración del riesgo.
5. Análisis de las opciones de reducción del riesgo.

La variación efectuada por la metodología que se propone en esta guía consiste en la modificación de la **fase 3**, estimación de las consecuencias del riesgo. Según el método que se propone, la sola existencia de una pequeña probabilidad de explosión provocaría unas consecuencias **NO ADMISIBLES**, es decir, situándose en el lado de la seguridad se estiman consecuencias catastróficas producidas por un volumen de gas importante. Por tanto, constituyendo las consecuencias un parámetro fijo en caso de existencia de explosión, podemos dejar de tenerlas en cuenta, finalizando la evaluación en la determinación de la probabilidad de existencia de la explosión y tomando las medidas necesarias a partir de la consideración de que los riesgos de explosión están o no están controlados en la explotación.

Por tanto, las fases que comprenderá la metodología propuesta en esta guía serán:

1. Determinación de la tarea minera a evaluar.
2. Identificación del riesgo de explosión.
 - 2.1 Identificación de atmósferas explosivas
 - 2.2 Identificación de fuentes de ignición
3. Valoración del riesgo: Riesgo Controlado y Riesgo No Controlado.

4. Análisis de las opciones de reducción del Riesgo No Controlado

A.3.2 DETERMINACIÓN DE LA TAREA A EVALUAR

Para comenzar el proceso de evaluación se debe empezar por entender cómo se desarrolla la tarea minera que se está evaluando, cómo funcionan los equipos e instalaciones, y la forma en que puede aparecer cada posible riesgo de explosión.

Para ello previamente deben seleccionarse de entre todas las tareas que se llevan a cabo en la explotación, aquellas en las que está presente el riesgo de explosión.

Para realizar esta selección, previamente debe haberse realizado la clasificación de la explotación en función de las condiciones atmosféricas con riesgo de explosión según lo expuesto en la norma UNE-EN 1127-2. Los emplazamientos peligrosos en una mina subterránea se clasifican como sigue:

- *Condición peligrosa 1 (atmósferas explosivas): partes subterráneas de minas e instalaciones asociadas de superficie de dichas minas expuestas al grisú y/o polvos inflamables.*

Estas situaciones incluyen las labores donde la concentración de grisú está dentro de los parámetros de explosión, por ejemplo, como resultado de un mal funcionamiento de los ventiladores (avería de los ventiladores), emisión repentina de grandes cantidades de grisú (desprendimientos de gas) o incrementos en la emisión de gas (debido, por ejemplo, a la disminución de la presión del aire o el aumento de arranque de carbón).

- *Condición peligrosa 2 (atmósferas potencialmente explosivas): partes subterráneas de minas e instalaciones asociadas de superficie de dichas minas que probablemente puedan estar expuestas a grisú y/o polvos inflamables.*

Estos emplazamientos incluyen las labores subterráneas donde la concentración de grisú en la corriente de ventilación está fuera de los parámetros de explosión.

Una vez efectuada la clasificación en condiciones atmosféricas peligrosas de las labores ya se está en disposición de seleccionar los equipos que van a operar en esos lugares en función de su categoría.

La relación entre las categorías de equipos del Grupo I y las condiciones atmosféricas peligrosas se muestra en la Tabla A.5

Tabla A.5: Relación entre categorías y condiciones atmosféricas peligrosas

Categoría		Diseñado para condiciones atmosféricas	Además aplicable a las condiciones atmosféricas
M1	Grisú y/o polvos inflamables	Condición peligrosa 1 (atmósfera explosiva)	Condición peligrosa 2 (atmósfera potencialmente explosiva)
M2	Grisú y/o polvos inflamables	Condición peligrosa 2 (atmósfera potencialmente explosiva)	

A.3.2.1 Descripción del proceso

Una vez seleccionadas todas las tareas en las que está presente el riesgo se irá analizando cada una de ellas sucesivamente. El primer paso para realizar la evaluación de riesgos comienza en las tareas de arranque y continua hacia las galerías anexas y así sucesivamente. De esta forma cuando se analicen las galerías anexas aguas abajo deben tenerse en cuenta las medidas de protección adaptadas frente a la propagación en galerías aguas arriba.

Cada tarea será la descripción de ésta de la mejor forma posible, incluyendo diagramas que muestren la situación de todos los equipos e instalaciones presentes de forma clara.

Igualmente se señalarán paso a paso y de forma metódica todos los trabajos que deben ser realizados para la ejecución de la tarea que se describe.

Deberán detallarse las características (temperaturas, presiones, materiales, etc.) relacionadas con el riesgo de explosión de los equipos involucrados en el desarrollo de la tarea analizada, incluyendo en esta descripción los posibles fallos que puedan presentarse y constituir posibles fuentes de ignición.

El objetivo de este paso es detallar como suceden las cosas durante el desarrollo del proceso estudiado de manera que pueda ser utilizado como base para el desarrollo de los dos pasos siguientes.

A.3.2.2 Análisis funcional de estados

El objeto de este paso del proceso de evaluación es detallar cómo evolucionan las sustancias inflamables durante el desarrollo de la tarea que se analiza.

Mediante este análisis se establecen las relaciones entre el estado físico de la sustancia inflamable (grisú o polvo inflamable), los equipos con los que entra en contacto y las energías que se manejan en todas las fases de operación de una determinada tarea minera.

En el caso de procesos complejos es una ventaja para realizar el análisis funcional de estados establecer un diagrama de flujo, con la inclusión de los niveles de concentración del grisú o polvo inflamable previstos para cada fase de operación. Tal diagrama ayuda a definir el estado de las sustancias explosivas presentes y la disponibilidad de los equipos en esas condiciones (véase Figura A.5).

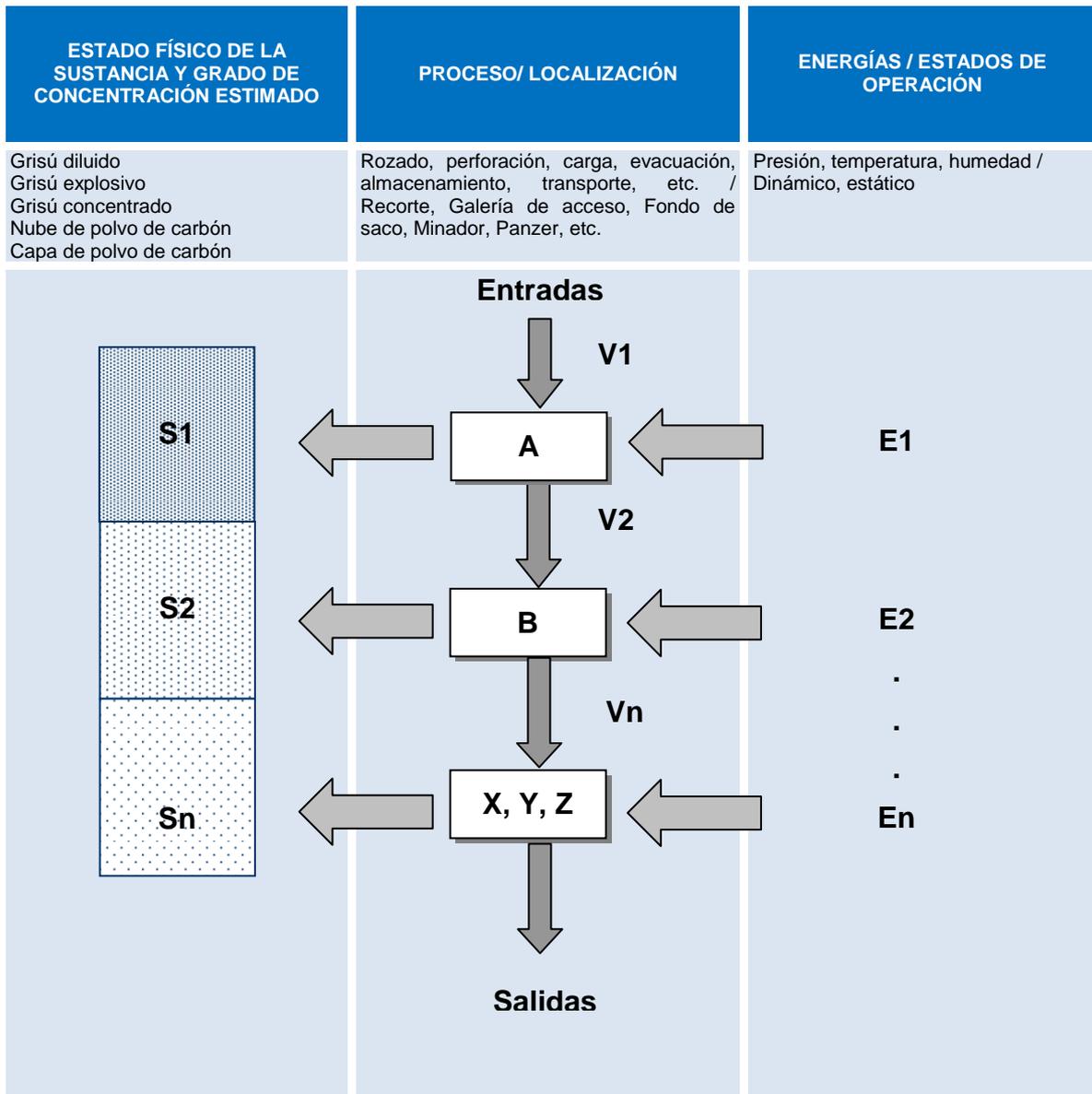
De esta forma, el análisis es útil para determinar, qué, por qué y cómo suceden las cosas, especialmente cuando analizamos procesos complejos.

Para la confección del diagrama se identificarán los posibles focos de aparición de grisú o polvo inflamable, para a partir de aquí efectuar un seguimiento de su evolución durante el desarrollo de la tarea. Los lugares donde se producen cambios de concentración de la sustancia señalaran los puntos intermedios del diagrama, de manera que se señalaran en la columna izquierda los distintos estados por los que atraviesa.

De la misma forma, en la columna central y correspondiéndose con los cambios de concentración indicados en la columna izquierda se incluirán todos los procesos que pueden provocar esos cambios de estado de la sustancia, al igual que la localización de dónde se desarrollan esos procesos. Esta localización es muy importante, ya que permitirá posteriormente cruzar el diagrama de análisis funcional de estados con las tablas de identificación de fuentes de ignición para la obtención del listado de situaciones con riesgo.

Por último, en la columna de la derecha se incluirán datos sobre las energías, temperaturas y otros parámetros que puedan ser de interés respecto al riesgo de explosión en el desarrollo de estos procesos intermedios, así como datos sobre el ambiente de mina en esas situaciones.

Figura A.5: Análisis funcional de estados



Si: estado físico de la sustancia
 A, B, C, X, Y, Z: procesos y localizaciones de estos procesos
 Ei: energía / estado de operación
 Vi: enlaces y localizaciones intermedias

A.3.3 IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

En pocas ocasiones un sólo elemento es el causante de las situaciones de riesgo. Aunque la causa inmediata pueda ser el simple fallo de un equipo o un error del operador, posiblemente existirán otros sucesos que también habrán tenido influencia en el desarrollo del accidente. Tales situaciones incluyen tanto fallos no detectados de los sistemas de protección como fallos en aspectos organizativos.

En la mayoría de los casos, la identificación de peligros es la parte más importante de cualquier evaluación de riesgos. Además, debe haberse realizado con suma precisión la definición de la tarea minera para desarrollar adecuadamente todos los pasos posteriores del proceso de evaluación.

Es de gran importancia en esta fase del proceso el total conocimiento del funcionamiento de los equipos implicados y de los posibles fallos que puedan presentarse, ya sean provocados tanto por equipos, instalaciones como por errores humanos.

A.3.3.1 Listado de posibles fuentes de ignición

La tarea minera debe ser examinada detalladamente para determinar que fuentes de ignición pueden presentarse. Para ello deberemos realizar un listado con todos los equipos presentes durante la ejecución de los trabajos e igualmente tener presentes las etapas de desarrollo de la tarea especificadas en el apartado A.3.2.1 para tener en cuenta las posibles fuentes de ignición originadas por la acción humana. La tabla A.6 contiene una lista de posibles fuentes de ignición que son las incluidas en la norma UNE-EN 1127-2 *“Atmósferas explosivas. Prevención y protección contra la explosión. Parte 2: Conceptos básicos y metodología para minería”*.

Tabla A.6: Lista de identificación de fuentes de ignición

IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE IGNICIÓN (UNE-EN 1127-2)			
TAREA ESTUDIADA:			
POSIBLES FUENTES DE IGNICIÓN			Significativo (Incluir razón)
TIPO DE FUENTE DE IGNICIÓN	Equipo o instalación o acción / Localización	Causa	
1. Superficies calientes			
2. Llamas y gases calientes (incluir partículas calientes)			
3. Chispas generadas mecánicamente			
4. Aparatos eléctricos			
5. Corrientes de fugas, corrosión de las protecciones catódicas			
6. Electricidad estática			
7. Rayos			
8. Radio frecuencias (RF) ondas electromagnéticas de 10^4 Hz a $3 \cdot 10^{12}$ Hz			
9. Ondas eletromagnéticas desde $3 \cdot 10^{11}$ Hz a $e \cdot 10^5$ Hz			
10. Radiaciones ionizantes			
11. Ultrasonidos			
12. Compresión adiabática y ondas de choque			
13. Reacciones exotérmicas, incluyendo autoignición de polvos			

Primeramente, en la columna general sobre “Posibles fuentes de ignición”, se indicarán para cada tipo de fuente de ignición los equipos, instalaciones o acciones que pueden provocar la aparición de ésta, junto al porque de su posible origen.

Cuando durante la ejecución de las labores necesarias para el desarrollo de la tarea estudiada, pueda estar presente alguna de estas fuentes de ignición ya sea por un equipo, instalación o acción humana, esta deberá anotarse en el registro correspondiente al “Tipo” de fuente de ignición de que se trate. En la columna “Equipo o instalación o acción humana / Localización” se identificará el foco específico de que se trate junto con su localización exacta.

En la columna “Causa” se detallará el motivo por el que este tipo de fuente de ignición puede presentarse (cortocircuito, sobrecarga, impacto, rozamiento, etc.).

Finalmente la columna “Significativo” se completará considerando la posibilidad de que la fuente identificada sea capaz de inflamar las atmósferas explosivas que pueden presentarse, de manera que se puedan tomar las decisiones adecuadas. Por ejemplo, si en la tarea analizada es posible la existencia de chispas generadas mecánicamente por roce de las picas de la cabeza de corte del minador con el mineral, entonces en la columna “Significativo” introduciremos ‘NO – Energía < MIE grisú $3 \cdot 10^{-4}$ J’, si se ha determinado que tales chispas nunca alcanzarán los niveles de energía necesarios para inflamar una atmósfera de grisú con concentración explosiva. Si por el contrario existe la posibilidad de que estas chispas posean la suficiente energía o no tenemos dato alguno sobre el que poder decidir, deberemos introducir ‘SI – Energía > MIE grisú $3 \cdot 10^{-4}$ J’, para estar del lado de la seguridad y tener presente esta posible fuente de ignición.

A.3.3.2 Registro de identificación de riesgos de explosión

El principal espíritu de la identificación de riesgos es que todos los posibles riesgos de explosión sean detectados de forma sistemática sin pérdida de ninguno. El objetivo de esta fase es la obtención de una lista de situaciones con riesgo de explosión como la que muestra la tabla A.6, que servirá de punto de

partida para efectuar la estimación de todos los riesgos de explosión identificados.

Esta lista se obtendrá tras cruzar el diagrama funcional de estados, gracias a su columna central de localizaciones, con la lista de fuentes de ignición, que igualmente incluye la localización exacta de cada fuente de ignición identificada, de manera que se obtendrán todas las posibles situaciones de riesgo que pueden presentarse durante el desarrollo de las labores de ejecución de la tarea analizada.

La identificación de riesgos deberá analizar el proceso para identificar todas las posibles situaciones con riesgo de presencia conjunta de atmósferas potencialmente explosivas y posibles fuentes de ignición. El tipo de atmósfera explosiva que puede aparecer deberá ser introducido en la columna “Tipo” de la tabla. Seguidamente deberá estimarse la “Frecuencia de aparición”, mientras que la localización tanto espacial como temporal se introducirá en la columna de “Localización”.

La asignación de la “Frecuencia de aparición” de la atmósfera potencialmente explosiva identificada es un punto clave de la evaluación, ya que por tratarse de una estimación cualitativa la influencia de la subjetividad juega un papel fundamental. Por este motivo, ésta frecuencia de aparición debería guardar estrecha relación con parámetros cuantificables y característicos de las sustancias inflamables analizadas, como son la grisuosidad de la capa y los niveles de empolvamiento de las labores, así como con los niveles de ventilación existentes, de manera que a mayores valores grisuosidad y empolvamiento mayores frecuencias de aparición.

Tabla A.6 Registro de identificación de riesgos de explosión

RIESGO	ATMÓSFERA EXPLOSIVA			FUENTE DE IGNICIÓN				
	Ref.	Tipo	Frecuencia de aparición	Localización	Tipo	Equipo o instalación o acción / Localización	Causa	Probabilidad
001-34.12	Volumen de grisú en movimiento. Conc. explosiva.	$V_1 = 3 \text{ (cm}^3/10\text{g/35s)}$ En operación normal. Remota.	Plano pozo. Zona de proximidad de la turbina.	Superficies calientes	TURBINA T05 Plano Pozo. 5m bajo embocadura 1er subnivel	Calentamiento excesivo del motor de la turbina. FALLO del relé de protección térmica.	M2 35.000 h. Mantenido. Remota.	Función de: Tª superficial <ó> Tª ignición (TMI=537°C)
001-34.13	Volumen de grisú localizado. Conc. explosiva.	$V_1 = 3 \text{ (cm}^3/10\text{g/35s)}$ En operación normal. Remota.	Plano Pozo. Nicho de instalación de cofres de nivel.	Superficies calientes	COFRE C01 Mitad Plano Pozo. Nicho de cofres.	Calentamiento excesivo de envolvente por sobrecarga. FALLO de relé de protección térmica.	Ex I d 125.000 h Ocasional.	Función de: Tª superficial <ó> Tª ignición (TMI=537°C)
001-34.14	Volumen de grisú localizado. Conc. explosiva.	$V_1 = 3 \text{ (cm}^3/10\text{g/35s)}$ En operación normal. Remota.	Plano Pozo. Nicho de instalación de cofres de nivel.	Chispa eléctrica	COFRE C01 Mitad Plano Pozo. Nicho de cofres.	Arco eléctrico en el interior de la caja de bornas del cofre de tajo.	Ex I d 125.000 h Ocasional.	Función de: Energía chispa <ó> Energía mínima de ignición grisú ($3 \cdot 10^{-4}$ J)
001-34.15	Nube de polvo de carbón localizada.	$D_m = 40 \mu\text{m}$ En operación normal. Frecuente.	Frente del fondo de saco. Zona de acción de la cabeza de corte.	Chispa mecánica	MINADOR M01 Fondo de saco. Cabeza de corte.	Choque de las picas de corte con el material del frente. Excesiva velocidad de la cabeza de corte	M2 51.000 h. Mantenido. Remota.	Función de: Energía chispa <ó> MIE nube de polvo
001-34.16	Nube de polvo de carbón localizada.	$D_m = 40 \mu\text{m}$ En operación normal. Sin medidas. Frecuente.	Frente del fondo de saco. Zona de acción de la cabeza de corte.	Chispa mecánica	MINADOR M01 Fondo de saco. Cabeza de corte.	Choque de las picas de corte con el material del frente. FALLO de la inyección de agua en pica	M2 51.000 h. Mantenido. Remota.	Función de: Energía chispa <ó> MIE nube de polvo
001-34.17	Nube de polvo de carbón localizada.	$D_m = 40 \mu\text{m}$ En operación normal. Sin medidas. Frecuente.	Frente del fondo de saco. Zona de acción de la cabeza de corte.	Chispa mecánica	MINADOR M01 Fondo de saco. Cabeza de corte.	Choque de las picas de corte con el material del frente. FALLO, picas de corte desgastadas	M2 51.000 h. Mantenido. Remota.	Función de: Energía chispa <ó>MIE nube de polvo

A.3.3.2.1 Frecuencia de aparición de atmosferas explosivas de grisú

A continuación se muestra una tabla a título orientativo de cómo podría efectuarse la asignación de probabilidades en la frecuencia de aparición de la atmósfera explosiva.

Para el grisú esta probabilidad podría venir dada mediante una tabla similar a la Tabla A.7 en función de la grisuosidad de la capa explotada, dada por el valor del índice de velocidad de desorción de grisú (V_1 , Especificación Técnica 0307-2-92) y en función del estado de operación de la ventilación.

Tabla A.7 Asignación de frecuencias de aparición de atmosferas explosivas de grisú

V_1 (cm ³ /10g/35s) (medido a 1,5 m)	VENTILACIÓN EN FUNCIONAMIENTO NORMAL	VENTILACIÓN PARADA (PROGRAMADA O FALLO)
0-1,5	IMPROBABLE	REMOTA
1,5-3	REMOTA	OCASIONAL
2-3	OCASIONAL	FRECUENTE

A.3.3.2.2 Frecuencia de aparición de atmosferas explosivas de polvo de carbón

En el caso de evaluación de la explosión primaria por polvo de carbón, se plantea la siguiente metodología dependiente de la valoración de dos aspectos importantes de los que depende, que son fundamentalmente:

- las características de explosividad del carbón, y
- la presencia de atmosferas explosivas de polvo de carbón en la explotación.

Las características del propio carbón se evalúan en términos de inflamabilidad y severidad de explosión mediante el índice de explosividad, que es el valor numérico obtenido a partir del conjunto de valores individuales de los parámetros que relacionan las propiedades de un carbón de formar atmosferas explosivas mediante sus características de composición química y sus propiedades físicas relativas a su susceptibilidad a la inflamación y su severidad de explosión.

La probabilidad de formación de una atmósfera explosiva se evalúa en función de las características de la explotación.

La probabilidad de presencia de atmósferas explosivas de polvo carbón se refiere a las diferentes labores y capas de una explotación, siendo asignable a cada tipo de labor una probabilidad diferente, dentro de una misma explotación.

Esta probabilidad corresponde a las condiciones existentes en el momento de la evaluación, que deberán ser representativas de las condiciones habituales de la explotación. Si se producen cambios significativos en las características del carbón o en las condiciones de la explotación, debería efectuarse una nueva evaluación.

La probabilidad de propagación de la explosión de polvo de carbón se cuantifica de menor a mayor frecuencia según cinco niveles: improbable, remota, ocasional, probable y frecuente.

Estos niveles se obtienen aplicando la tabla A.9, una vez calculada la explosividad del carbón y evaluada la probabilidad de presencia de atmósferas explosivas de polvo de carbón.

Tabla A.9. Determinación de la probabilidad de propagación de explosiones de polvo de carbón

PROBABILIDAD DE PRESENCIA DE ATMÓSFERA EXPOSIVA DE POLVO DE CARBÓN	EXPLOSIVIDAD DEL CARBÓN		
	BAJA	MEDIA	ALTA
BAJA	IMPROBABLE	REMOTA	OCASIONAL
MEDIA	REMOTA	OCASIONAL	PROBABLE
ALTA	OCASIONAL	PROBABLE	FRECUENTE

A.3.3.2.2.1 Explosividad del carbón

Las características de explosividad de un carbón se pueden cuantificar en función de dos índices que determinan las características químicas y las características físicas del carbón que están relacionadas con su explosividad. Estos índices son el **Índice químico (IQ)** y el **Índice físico (IF)**.

Índices de explosividad

El **índice químico (IQ)** considera la composición química del carbón, teniendo especial relevancia el contenido en materias volátiles. En función del contenido en materias volátiles en base seca exenta de cenizas se evalúa el índice químico según lo indicado en la tabla A.10:

Tabla A.10 Determinación del Índice Químico a partir de la volatilidad del carbón

ÍNDICE QUÍMICO (IQ)	Contenido en Materias Volátiles en base seca exenta de cenizas (VSSC)
IQ = 0	VSSC < 9 %
IQ = 1	9 % ≤ VSSC ≤ 14 %
IQ = 2	14 % ≥ VSSC

Como puede observarse en la tabla A.10 el Índice Químico aumenta según aumenta la volatilidad del carbón analizado estableciéndose tres niveles de peligrosidad.

El **índice físico** tiene en cuenta las características de la **sensibilidad a la inflamación del carbón (SI)** y su **severidad de explosión (SE)**.

La sensibilidad a la inflamación se evalúa en función de los valores obtenidos en la determinación de los parámetros temperatura mínima de ignición en nube (TMI_n), límite inferior de explosividad (LIE) y energía mínima de ignición (EMI), conforme al siguiente criterio (véase la tabla A.11).

Tabla A.11 Determinación de la Sensibilidad a la Inflamación

SENSIBILIDAD A LA INFLAMACIÓN (SI = T + C + E)	
$TMI_n > 500 \text{ °C}$	T = 0
$TMI_n \leq 500 \text{ °C}$	T = 1
LIE > 150 g/m³	C = 0
LIE ≤ 150 g/m³	C = 1
EMI > 100 mJ	E = 0
EMI ≤ 100 mJ	E = 1

La severidad de explosión (SE) se evalúa en función de la constante característica $K_{m\acute{a}x}$, según el siguiente criterio (véase la tabla A.12).

Tabla A.12 Determinación de la Severidad de explosión

SEVERIDAD DE EXPLOSIÓN (SE)	
$K_{m\acute{a}x} < 20 \text{ bar m/s}$	SE = 0
$20 \text{ bar m/s} \leq K_{m\acute{a}x} < 100 \text{ bar m/s}$	SE = 1
$100 \text{ bar m/s} \leq K_{m\acute{a}x} < 200 \text{ bar}$	SE = 2
$200 \text{ bar m/s} \leq K_{m\acute{a}x}$	SE = 3

En función de SI y SE se valora el índice físico (IF) (véase la Tabla A.13).

Tabla A.13 Determinación del Índice Físico

ÍNDICE FÍSICO (IF)	Función de la suma entre la Sensibilidad a la inflamación y la Severidad de Explosión (SI + SE)
IF = 0	$(SI + SE) = 0$
IF = 1	$0 < (SI + SE) \leq 3$
IF = 2	$3 < (SI + SE) \leq 6$

Nivel de explosividad del carbón

El nivel de explosividad del carbón se evaluará en función de los índices químico y físico, estableciendo tres niveles de explosividad: baja, media y alta.

➤ Explosividad baja

Se considera que la explosividad de un carbón es baja cuando se cumple una de las condiciones siguientes:

- El índice químico (IQ) es igual a 0.
- El índice químico (IQ) es menor o igual que 1 y además el índice físico (IF) es igual a 0.

➤ Explosividad media

Se considera que la explosividad de un carbón es media cuando se cumple una de las condiciones siguientes:

- El índice químico (IQ) es igual a 1.

- b) El índice químico (IQ) es menor o igual que 2 y además el índice físico (IF) es menor o igual que 1.

➤ **Explosividad alta**

Se considera que la explosividad de un carbón es alta cuando se cumple una de las condiciones siguientes:

- a) El índice químico (IQ) es igual a 2.
- b) El índice físico (IF) es igual a 2.

Probabilidad de presencia de atmósferas explosivas de polvo

Para evaluar la probabilidad de formación y existencia de atmósfera explosiva por polvo de carbón se analizarán cuatro grupos de características de la explotación:

- ❖ Tipo y clase de emplazamiento.
- ❖ Acumulaciones de polvo.
- ❖ Condiciones del polvo de carbón.
- ❖ Presencia de grisú.

Se pueden distinguir tres tipos de **probabilidades de presencia de atmosfera explosiva**:

- **Probabilidad baja**: la suma de las puntuaciones está comprendida entre 0 y 2 puntos, ambos inclusive.
- **Probabilidad media**: la suma de las puntuaciones está comprendida entre 3 y 5 puntos, ambos inclusive.
- **Probabilidad alta**: la suma de las puntuaciones está comprendida entre 6 y 8 puntos, ambos inclusive.

Las labores correspondientes a la explotación de una capa de carbón en las que existan antecedentes de explosión o explosiones de polvo de carbón acaecidas durante el laboreo de esa capa se considerarán con probabilidad alta.

a) Tipo y clase de emplazamiento

La evaluación se basará en el siguiente criterio:

A. Talleres de arranque o labores en avance en carbón

- ✓ Arranque con explosivos o carga con pala frontal o carga mecanizada: 0

- ✓ Arranque mecanizado o carga con pala de descarga lateral: 1
- ✓ Arranque manual: 2

B. Galerías y planos de acceso donde se realice carga, transporte o trasvase de carbón

- ✓ Puntos de carga, transferencia o trasvase: 0
- ✓ Transporte continuo: 1
- ✓ Transporte discontinuo: 2

C. Otros emplazamientos

- ✓ No existen acumulaciones de carbón ni de polvo: 0
- ✓ Existen acumulaciones de carbón o polvo: 1
- ✓ Existen sistemas de trituración: 2

b) Acumulaciones de polvo

Las acumulaciones se refieren a partículas con un tamaño medio (d_{50}) menor que 1 mm.

- a) Espesor menor de 5 mm: 0
- b) Para d_{50} mayor que 0,5 mm
 - ✓ Espesor entre 5 mm y 50 mm: 0
 - ✓ Espesor de más de 50 mm: 1
- c) Para d_{50} menor o igual que 0,5 mm
 - ✓ Espesor entre 5 mm y 50 mm: 1
 - ✓ Espesor de más de 50 mm: 2

c) Condiciones del polvo de carbón

La humedad condiciona la dispersabilidad del polvo, siendo aplicable el siguiente criterio:

- a) Contenido en humedad del carbón mayor que 50 %: 0
- b) Contenido en humedad comprendido entre 10 % y 50 %: 1
- c) Contenido en humedad menor que 10 %: 2

d) Presencia de grisú

La presencia de grisú aumenta la sensibilidad a la ignición y agrava la

severidad de explosión:

a)	Minas sin grisú	0
b)	Minas con grisú	1
c)	Minas con desprendimientos	2

A.3.3.3 Registro de identificación de fuentes de ignición

El siguiente paso después de haber incluido todos los registros correspondientes a las atmósferas explosivas que pueden presentarse, es el de cruzar estos registros con las listas de identificación de fuentes de ignición.

Las fuentes de ignición se introducirán en función de la localización que se les haya asignado en la lista de identificación de fuentes de ignición, de forma que cada registro de atmósfera explosiva identificada se repetirá tantas veces como fuentes de ignición existan con la localización coincidente con la de la atmósfera explosiva.

De esta forma, el número de registros a evaluar se multiplicará en función del número de posibles fuentes de ignición que se repitan en cada localización de atmósfera explosiva.

Para cada nuevo registro creado, que ya estará caracterizado por la atmósfera explosiva existente, se incluirán las cuatro columnas que caracterizan cada fuente de ignición identificada tantas veces como fuentes de ignición existan en la localización de la atmósfera explosiva.

De esta forma queda efectuado el cruce entre el diagrama funcional de estados y las listas de identificación de fuentes de ignición.

De nuevo un punto crucial del análisis será el de asignar una probabilidad al suceso aparición de cada fuente de ignición identificada.

En ocasiones, en los manuales de los fabricantes de equipos se aportan probabilidades de distintos tipos de fallo en función de las horas de funcionamiento de éstos, que pueden ser utilizadas para asignar alguna de las probabilidades de las fuentes identificadas en las tablas, si bien esta práctica no es habitual.

Por tanto, al igual que sucedía con la asignación de frecuencias de aparición de las distintas atmósferas explosivas identificadas, deberemos crear tablas de asignación de probabilidades de aparición de fuentes de ignición en función de las características, antigüedad y estado de mantenimiento de equipos e instalaciones.

La tabla 6.5 muestra un ejemplo de cómo podrían diseñarse este tipo de tablas.

Tabla 6.5 Asignación de probabilidad de presencia de fuentes de ignición

TIPO DE EQUIPO	ANTIGÜEDAD (horas de funcionamiento)	EQUIPO MANTENIDO PERIÓDICAMENTE	EQUIPO SIN MANTENIMIENTO PERIÓDICO
NO ATEX O SIN MARCADO	< 10.000	FRECUENTE	FRECUENTE
	10.000 < h < 100.000	FRECUENTE	FRECUENTE
	> 100.000	FRECUENTE	FRECUENTE
ANTERIOR A DIRECTIVA 94/9/CE	< 10.000	IMPROBABLE	OCASIONAL
	10.000 < h < 100.000	REMOTA	PROBABLE
	> 100.000	OCASIONAL	FRECUENTE
POSTERIOR A DIRECTIVA 94/9/CE M1 Y M2	< 10.000	IMPROBABLE	OCASIONAL
	10.000 < h < 100.000	REMOTA	PROBABLE
	> 100.000	OCASIONAL	FRECUENTE

El siguiente paso será la asignación, en función de lo indicado en la columna Relevante de las tablas de identificación de fuentes de ignición, de la “Efectividad” de cada fuente dependiente de la atmósfera explosiva con la que interactúa, junto a las razones que provocan esta efectividad.

A.3.4 Valoración del riesgo: Riesgo Controlado y Riesgo No Controlado.

Esta probabilidad deberá ser función de las dos probabilidades de las que procede, probabilidad de presencia de atmósferas explosivas y probabilidad de presencia de fuentes de ignición efectivas. En la tabla de identificación de riesgos de explosión ya se han asignado estas probabilidades a cada uno de estos dos sucesos. De esta manera, la probabilidad de presencia del riesgo de explosión vendrá dada mediante una tabla similar a la tabla 6.6.

Tabla 6.6 Asignación de probabilidad del riesgo de explosión

		PRESENCIA DE ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS				
		IMPROBABLE	REMOTA	OCASIONAL	PROBABLE	FRECUENTE
PRESENCIA DE FUENTES DE IGNICIÓN	IMPROBABLE	CONTROLADO	CONTROLADO	CONTROLADO	CONTROLADO	NO CONTROLADO
	REMOTA	CONTROLADO	CONTROLADO	CONTROLADO	NO CONTROLADO	NO CONTROLADO
	OCASIONAL	CONTROLADO	CONTROLADO	NO CONTROLADO	NO CONTROLADO	NO CONTROLADO
	PROBABLE	CONTROLADO	NO CONTROLADO	NO CONTROLADO	NO CONTROLADO	NO CONTROLADO
	FRECUENTE	NO CONTROLADO	NO CONTROLADO	NO CONTROLADO	NO CONTROLADO	NO CONTROLADO

A.4 NIVELES DE RIESGO DE PROPAGACIÓN DE UNA EXPLOSION Y MEDIDAS DE ACTUACIÓN

A.4.1 NIVELES DE RIESGO

Los niveles de riesgo representan una escala que permite priorizar las medidas de seguridad a implementar.

Los cruces de la matriz se clasifican en:

A- RIESGO NO CONTROLADO

EXISTE RIESGO

B- RIESGO CONTROLADO

POSIBLES RIESGOS RESIDUALES

NIVEL	TIPO	MEDIDAS DE ACTUACIÓN
A	NO CONTROLADO	No debe iniciarse el trabajo hasta que se no reduzca el riesgo a un nivel aceptable. Si no es posible reducir el riesgo, incluso con grandes recursos, debe prohibirse el trabajo. Este tipo de riesgo requiere tanto la aplicación de medidas técnicas como de medidas organizativas.
B	CONTROLADO	No se necesita mejorar la acción preventiva. Sin embargo, se deben considerar soluciones más rentables o mejoras que no supongan una carga económica importante. Se requieren comprobaciones periódicas para asegurar que no han variado los parámetros evaluados.

**BLOQUE B: IMPLANTACIÓN, VIGILANCIA Y CONTROL DE
MEDIDAS DE PREVENCIÓN DE EXPLOSIONES POR POLVO DE
CARBÓN**

B.1 MEDIDAS DE PREVENCIÓN FRENTEA AL RIESGO DE EXPLOSION POR POLVO DE CARBÓN

Para adoptar las medidas preventivas adecuadas contra la propagación de explosiones por polvo de carbón se proponen los siguientes tres pasos:

Paso 1: Clasificación de las labores en función de las condiciones atmosféricas con riesgo de explosión

La normativa española establece que el polvo de carbón se considera inflamable cuando contenga más de 12 % de materiales volátiles, excluidos humedad, dióxido de carbono y cenizas, siempre y cuando el polvo no se encuentre en estado de barro. En las minas en las que aparezca el polvo de carbón bajo esas condiciones se deberán aplicar medidas encaminadas a evitar que las explosiones se produzcan y a impedir o detener su propagación.

Esta clasificación tan simplificada es similar a las clasificaciones empleadas en otros países:

- ✓ Según el reglamento belga, una mina se clasifica con riesgo debido al polvo cuando el carbón tiene más de 14 % de materias volátiles, excluidos la humedad y cenizas.
- ✓ En Polonia, el carbón se considera inflamable cuando el contenido en materias volátiles es superior al 12 %, aunque existen matices adicionales.
- ✓ El reglamento francés clasifica las minas con polvo inflamable cuando el carbón contiene más del 16 % de materias volátiles (14 % si es una mina grisosa), aunque existen igualmente matices adicionales. Ahora bien, si en la mina existe alguna capa explotada con contenido en volátiles superior al 9 %, se acepta la posibilidad de inflamación sobre todo en presencia de grisú o en el empleo de explosivos, y en tal caso la mina se clasifica como “explotación con polvo poco inflamable”. En caso contrario, la mina se clasificaría como “explotación con polvo inflamable”. Por otra parte, cuando el contenido en volátiles es superior al 16% (14% con grisú) también se examinan las características de la explotación y del yacimiento con el fin de ver si existe riesgo de propagación. Cuando en la mina hay una elevada humedad natural, ausencia de grisú o el contenido en incombustible es alto, la mina se clasifica de nuevo como “explotación con polvo de carbón poco inflamable”. Las medidas de protección dictadas por el reglamento francés se aplican a estas últimas, siendo

algunas aplicables a las explotaciones clasificadas de polvos poco inflamables.

- ✓ Las normas de seguridad norteamericanas establecen un criterio similar, pues consideran como no peligroso polvo de carbón que proviene de un carbón cuya proporción en volátiles es inferior de 0,12, entendiendo por proporción de volátiles la siguiente expresión:

$$\text{proporción de volátiles} = \frac{\text{volátiles}}{\text{volátiles} + \text{carbón fijo}}$$

En una primera aproximación, la semejanza de los criterios empleados en diferentes países es elevada y viene indicando que solamente algunas minas de antracita no se consideran de entrada con riesgo de explosión, a falta de contrastar la explosividad del carbón.

El empleo de clasificaciones tan simples debería conducir a la puesta en funcionamiento de toda una serie de medidas de prevención y de protección contra las explosiones en prácticamente todas las explotaciones subterráneas de lignitos y hullas; solo quedarían exceptuadas aquellas en que el polvo sea incapaz de formar una mezcla explosiva en el aire, debido a su alto contenido en agua o en material incombustible. Sin embargo, no queda claramente definido cuando el polvo inflamable deja de serlo por las condiciones propias de la mina, lo que induce a los explotadores de las minas a considerar que su carbón siempre se comporta de forma segura.

En junio de 1988 en la mina Borcken, en Alemania se inicio una explosión secundaria de polvo de carbón a pesar de tener alto contenido en humedad. Los explotadores de la mina dedujeron que el polvo de carbón era seguro por la humedad de la mina (superior a 45%). Una fuerte explosión primaria del grisú puso en suspensión el polvo de carbón acumulado en las tuberías y partes altas de la galería y se propagó a lo largo de 5 km de galería, provocando consecuencias catastróficas en vidas humanas (53 muertos) y en las instalaciones de la propia mina.

La norma UNE-EN 1127-2 *“Atmosferas explosivas. Prevención y protección contra las atmosferas explosivas. Parte 2: Conceptos básicos y metodología para minería”* establece dos condiciones de peligrosidad de la Directiva 94/9/CEE, es decir:

Condición de peligrosidad 1 (atmosfera potencialmente explosiva): Rango entre 0% y por debajo del LIE o por encima del LSE hasta el 100% de grisú en el aire.

Condición de peligrosidad 2 (atmosfera explosiva): Rango entre el LIE y el LSE de grisú en el aire.

Las minas pueden ser grisuosas o no grisuosas dependiendo del material que se extrae y de la ocurrencia de desprendimientos de grisú durante el laboreo de las mismas. En la práctica habitual las minas de carbón se consideran como grisuosas.

Para efectuar la clasificación de una mina de carbón es necesario determinar previamente la secuencia de explotación en función del tipo de laboreo que se desarrolla o se pretende desarrollar. En función de esta secuencia de operación y teniendo en cuenta los cálculos de ventilación efectuados para mantener los lugares de trabajo en condiciones seguras, se efectuara la clasificación de la mina.

Finalmente, las medidas de prevención difieren para cada condición de peligrosidad. Para la *condición de peligrosidad 1* las medidas de prevención adecuadas serían control y eliminación de polvo e inertización con agua o con polvo inerte, mientras para la *condición de peligrosidad 2* se recomienda, además el uso de barreras de agua.

Como se ha descrito anteriormente el polvo de carbón presenta un riesgo permanente puesto que se produce continuamente y se dispersa en la corriente del aire. La campaña de inertización puede resultar una medida de prevención insuficiente si no se controla la continua acumulación de polvo fino sobre el carbón previamente inertizado.

Nagy y Mitchell han establecido que la acumulación de polvo de carbón en suspensión puede llegar a 100 g/tonelada del material extraído en las galerías de retorno, aunque, también, encontraron que cuando se emplean los ventiladores aspirantes auxiliares se deposita considerablemente menos polvo. En el año 1975 Richmond estableció la acumulación de polvo de carbón entorno a 50 g por tonelada del material extraído. Kazimierz Lebecki establece que, en la minería de carbón polaca, entre 2% y 3% del mineral extraído se transforma en polvo. También establece una variable llamada *intensidad de acumulación* que se define como masa de polvo depositada en una superficie dada en un determinado tiempo ($\text{g/m}^2/\text{día}$). Según él los valores típicos de intensidad de acumulación de polvo de carbón están entre el 0 y $150 \text{ g/m}^2/\text{día}$.

Para el propósito de prevenir la acumulación de polvo entre dos campañas de inertización, debe mantenerse el grado de inertización necesario y la limpieza adecuada ya que con el aumento de espesor de polvo de carbón depositado aumenta el grado de inertización. Incluso si el grado de inertización, por ejemplo, de polvo inertizado subyacente es mayor de 80%, una capa de polvo

depositada sobre el polvo inertizado de un espesor de tan solo 2 a 4 mm es capaz de formar una nube con la concentración (LIE) suficiente para propagar una explosión primaria.

Paso 2: Evaluación de riesgos

En el Bloque A de esta guía se propone el método sistemático para el desarrollo de la evaluación de riesgos, discusión de la existencia de posibles áreas peligrosas y las posibles fuentes de ignición. Además, debería tenerse en cuenta el arranque y parada, mantenimiento y los defectos de funcionamiento, así como el funcionamiento normal de los equipos destinado al uso en minería. La evaluación de riesgo, por lo tanto, debería incluir:

- La probabilidad de formación y la duración de las atmósferas explosivas.
- La probabilidad de presencia y activación de fuentes de ignición.
- Las instalaciones, las sustancias empleadas, los procesos industriales y sus posibles interacciones.

Asimismo, deberían tenerse en cuenta los lugares que puedan estar en contacto, mediante aperturas, con lugares en los que puedan crearse atmósferas explosivas.

Paso 3: Especificación de las medidas de prevención a adoptar frente a la atmósfera explosiva de polvo de carbón

En cualquier mina de carbón existe una continua producción de polvo que al ser combustible genera un riesgo de inflamación y a su vez lleva asociado el riesgo de explosión.

Las medidas de prevención a adoptar frente a atmósfera explosiva de carbón se fundamentan en previa evaluación de riesgos (véase el Bloque A) y en descripción de las medidas de prevención elegidas que se adoptaran para que:

- El entorno de trabajo sea tal que el trabajo pueda efectuarse de manera segura.
- Asegurar una supervisión adecuada de los trabajadores con arreglo a la evaluación de riesgos mediante el uso de los medios técnicos apropiados.
- Las medidas que se deberán tomar serán medidas de carácter técnico y organizativo, todas encaminadas para controlar la producción de polvo de carbón, es decir:
 - ✓ Reducir la generación de polvo en el desarrollo de la tarea.
 - ✓ Controlar y eliminar el polvo de carbón generado en su zona de

origen, evitando su reparto en zonas próximas.

- ✓ Control del polvo suspendido en el ambiente de la mina.
- ✓ Consolidación del polvo sedimentado mediante inertización.

B.1.2 CONTROL Y ELIMINACIÓN DEL POLVO DE CARBÓN MEDIANTE LIMPIEZA

Para controlar y eliminar el polvo de carbón generado en su zona de origen es necesario programar las operaciones de limpieza y mantenimiento impidiendo la formación de acumulaciones, con una atención especial a los puntos donde tiende depositarse el polvo. Las partículas menores de 100 μm pueden desplazarse a una cierta distancia para depositarse sobre superficies, tales como: maquinaria, aristas, o en sitios donde se manifiestan cambios en la velocidad de aire. Las partículas menores de 20 μm pueden viajar hasta 200 m en una corriente de ventilación moderada.

La operación de limpieza es esencial en los lugares, tales como:

- arranque en el tajo;
- parte baja de planos inclinados;
- debajo de cintas transportadoras en avance de guías;
- puntos de transferencia, carga, vuelco, etc.
- galería de retorno
- puertas de ventilación
- cambios de sección, bifurcaciones, etc.

Los lugares de limpieza arriba mencionados se ajustan a la práctica recomendada en la *“Guideline for the Compilation of a Mandatory Code of Practice for the Prevention of Coal Dust Explosions in Underground Coal Mines”* en el Anexo II, elaborada por Mine Health and Safety Act (MHS). [10]

Para mantener los lugares de trabajo en condiciones seguras, una de las medidas necesarias, pero insuficientes, es eliminar el polvo de carbón acumulado en la medida de lo posible. Con esta sencilla medida se reduce la cantidad de material combustible que podría participar en una posible explosión. Además, esta medida lleva una ventaja adicional ya que con una rigurosa limpieza se empleara menor cantidad de material inerte.

La eficacia de la limpieza programada, debería comprobarse mediante una verificación in situ para asegurar que es apropiada. Si en cualquier momento aparece un cambio significativo en las condiciones iniciales en las que se

realizó el estudio, debería efectuarse una nueva verificación para asegurar que la limpieza programada es adecuada a las nuevas condiciones.

Cuando se emplean las operaciones de limpieza como una de las medidas preventivas hay que especificar las aéreas que se van a tratar, el método de que se va a aplicar y el tiempo transcurrido entre dos operaciones de limpieza.

B.1.3 INYECCIÓN DE AGUA EN EL MACIZO

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

La inyección en vena también se utiliza para desgasificar la capa de carbón de grisú. Cuando se trata de capas de carbón con posibilidad de desprendimientos instantáneos o fuertemente grisuosas en las que a veces se puede dar incluso la circunstancia de que se produzcan mini o macro explosiones en la propia capa, incluso sin existencia de energía de activación más que la propia apertura del hueco por el altísimo porcentaje de grisú que puede existir en la capa a elevada presión, éste puede deflagrar o detonar. Por ello se procede a realizar una serie de tiros o perforaciones vacías para que se produzca la desgasificación por ellos, disminuyendo así el contenido y presión de gas intrínseco en la capa.

La inyección del agua en vena, tiene por objeto la humidificación del carbón antes de ser arrancado, para evitar que las partículas del polvo de carbón susceptible de ponerse en suspensión durante el arranque y el transporte por el taller, quede flotando en la atmosfera. Las partículas cuya granulometría sea menor de 75 μm son realmente peligrosas. Hasta la fecha no se conoce un tipo de inyección ideal, es decir, una forma de inyección que elimine la totalidad de las partículas en suspensión para un sistema de arranque y explotación dados, debiendo de hablarse, pues de eficiencia de inyección; para cada tipo y forma de realizar ésta se considerará la cantidad, calidad y tamaño de partículas que se evita que entren en suspensión.

Para cualquier macizo de carbón, la eficacia de la inyección alcanza su grado máximo cuando la presión de inyección, que depende de las características de ese macizo, es mínima y el tiempo de impregnación apropiado para la humidificación de todo el macizo.

Uno de los problemas más importantes en la inyección convencional o inyección a poca profundidad, para alcanzar un grado de eficacia elevado dentro de las características del taller, es la falta del tiempo necesario. Al trabajar con presiones elevadas disminuye la eficacia de la inyección produciéndose un efecto de arranque. La eficacia de una buena inyección entre otras reside en la disminución del polvo en suspensión.

Tipos de inyección:

- Inyección a corta profundidad de longitud del taladro entre 1 y 3 metros
- Inyección a media profundidad de longitud de taladro entre 3 y 6 metros.
- Inyección a larga profundidad de longitud de taladro superior a 6 metros.

a) Inyección a corta profundidad:

Este es el tipo más empleado admitiendo muchas variables en su realización que van a influir en la eficacia de la inyección. Estas variables pueden ser:

- Características del taller:
 - ✓ Composición química del carbón
 - ✓ Sistema de explotación
 - ✓ Avance diario del taller
 - ✓ Composición de los hastiales
 - ✓ Contenido en grisú
- Parámetros de influencia
 - ✓ Longitud de los taladros
 - ✓ Distancia entre taladros
 - ✓ Presión y caudal de agua
 - ✓ Frecuencia de la inyección
 - ✓ Tiempo de impregnación
 - ✓ Disposición de los taladros
- Útiles necesarios: Bomba de presión, mangueras, cánulas, descompresor etc.
- Medidas de seguridad en la inyección.

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

Realizar la inyección de agua en vena, a baja presión o mediante bombas de alta presión y cánulas inyectoras, con el fin de eliminar el polvo en suspensión al arrancar el carbón. La presión de inyección de la bomba se gradúa conforme a la dureza de la capa.

B.1.4 FIJACION DE POLVO POR SALES HIGROSCOPICAS

Otro método de prevención para fijar el polvo de carbón es el empleo de sales higroscópicas. Estas sales son normalmente Cloruro de Calcio (CaCl_2) y Cloruro de Magnesio (MgCl_2) a las que se añaden agentes humidificantes. El resultado es una disolución aglutinante que llega a formar una especie de costra sobre el polvo. De esta manera se reduce la dispersabilidad del polvo depositado dificultando su puesta en suspensión.

Las ventajas del empleo de sales higroscópicas es que su acción es más duradera que la del riego, pues no se evaporan. Además, proporcionan un efecto retardador ante posibles fuegos al impedir el acceso del oxígeno al núcleo de la combustión y tiene efectos beneficiosos para la salud, pues reducen la cantidad de polvo respirable y reducen la humedad en el ambiente.

El principal inconveniente es el riesgo de corrosión que originan sobre los metales y los daños que pueden causar a los equipos eléctricos.

Existen tres modalidades en el empleo de sales higroscópicas (véase la tabla B.1).

	ESTADO DE LA SAL HIGROSCÓPICA		
	PASTA	POLVO	ESCAMAS
CONTENIDO DE LA MEZCLA	22% MgCl_2 (27%-29%) CaCl_2 + 1% agente humidificador + 77% agua	(81%-85%) CaCl_2 + 3% agente humidificador + (17%-12%) agua	(76%-78%) CaCl_2 + 2% agente humidificador + (22%-20%) agua
CONDICIONES DE APLICACIÓN	De 2 a 4 Kg/m^2 de sección de la galería. o De 20 a 60 kg/m lineal de longitud de galería.	1ª aplicación: 300g/m^2 - 500g/m^2 de sección de la galería. Sucesivas aplicaciones: 200g - 300g/m^2 de sección de la galería.	De 1 a 4 kg/m^2 de sección de la galería.

Tabla B.1. Diferentes modalidades de empleo de sales higroscópicas [2]

Al igual que en el caso de riego con agua, cuando se propone la fijación del carbón por el empleo de sales higroscópicas se deben especificar **los lugares o circunstancias que más demandan el empleo de sales higroscópicas como una medida de prevención.**

Las recomendaciones seleccionadas en este apartado se ajustan a la práctica habitual en las minas de carbón alemanas y francesas y a la información difundida por el *Órgano Permanente para la Seguridad y Salubridad en las Minas de Hulla y otras Industrias Extractivas* [29], [30], [31]. Los materiales utilizados actualmente responden a las siguientes características:

- La modalidad de *sales higroscópicas en forma de escamas* se utiliza sobre todo para el tratamiento de los suelos de galerías subterráneas. Las sales higroscópicas en forma de escamas contienen 76%-78% de cloruro de calcio, 2% de agente humidificador y se les añade un 22%-20% de agua. Las escamas se suministran en bolsas de papel protegidas contra la humedad y se extienden a mano o por medio de un equipo de proyección mecánico o neumático, de 1 a 4 kilogramos por metro cuadrado de suelo limpio de polvo.
- La modalidad de *sales higroscópicas en forma de polvo*, contiene un 81%-85% de cloruro cálcico, 3% de agente humidificador y se les añade un 17%-12% de agua. La granulometría es muy fina e higroscópica, absorbe la humedad del aire y se transforma en una solución tensoactiva de cloruro de calcio. Un kilogramo de polvo de estas sales fija de 3 a 7 kilogramos de polvo de carbón. En una primera aplicación puede proyectarse sobre las paredes una cantidad de 300 a 500 g/m², mediante aire comprimido, y de 200 a 300 g por metro cuadrado de sección de galería en las aplicaciones posteriores.
- La modalidad de *sales higroscópicas en forma de pasta*, ricas en agua, contiene el 22% de cloruro de magnesio o 28% de cloruro de calcio, 2% de hidróxido de magnesio y 1% de agente humidificador. Un kilogramo de sales higroscópicas en forma de pasta neutraliza alrededor de 1 kilogramo de polvo. Las sales se aplican sobre las paredes de la galería en capas de 2 a 5 milímetros de espesor, lo que representa de 2 a 4 kilogramos por metro cuadrado, aplicados mediante un equipo de proyección.

Límites de empleo

Debe evitarse el empleo de las sales higroscópicas en las zonas donde se encuentra una importante concentración de equipos, en los techos de las galerías equipados de un hilo trolley o de un monocarril y en las proximidades de un cable de arrastre.

Condiciones de aplicación

En una atmósfera suficiente húmeda para que las soluciones salinas no cristalicen, las superficies con polvo de carbón acumulado pueden neutralizarse

por aplicación, proyección o esparcimiento de sales higroscópicas en forma de pasta, polvo o escamas. La cantidad de sales higroscópicas aplicadas a una galería debe garantizar la fijación de todo el polvo acumulado (véase la tabla B.1).

Verificación y control

La capacidad de fijación de las sales higroscópicas disminuye con la disminución de la granulometría de polvo de carbón y con el aumento de su contenido en carbono.

Al cabo de cuatro a seis semanas, el polvo de carbón acumulado sobre las superficies tratadas por sales, no se fija y se puede poner en suspensión. Este es el momento en que es necesario tratar de nuevo las superficies de las galerías mediante sales higroscópicas.

La verificación y control de la eficacia de la neutralización mediante sales higroscópicas deben hacerse por soplado sobre las superficies con acumulaciones de polvo de carbón. Por lo tanto, la neutralización debe renovarse siempre y cuando esta prueba ponga de manifiesto que el polvo ya no se fija íntegramente.

B.2 ESTADO DEL ARTE EN LA LEGISLACIÓN INTERNACIONAL SOBRE INERTIZACIÓN

El año 1965, *Nagy* [13] descubrió que en las minas modernas se produce polvo de carbón mucho más fino. Esta información ha conducido al incremento de requisitos de polvo inerte en el reglamento de EE.UU. y por tanto, el porcentaje necesario para inertizar una galería de retorno de ventilación ha aumentado del 65% al 80% de inertes.

Richmond et al. [11] también, han discutido sobre los requisitos de inertización de polvo de carbón. Ellos sugieren que el contenido apropiado de inertes para los carbones con un 15% de volátiles es del 65%, y que el porcentaje de inertes no debería bajar de este valor. Los ensayos que se han llevado a cabo se han basado en estudios de ignición con inflamadores fuertes.

Weiss et al. [14] han realizado ensayos en una galería experimental en Lake Lynn y determinaron que para prevenir la propagación en galerías largas de transporte, el contenido en inertes debe ser del 79% al 82%.

En la galería experimental de Lake Lynn, también se ensayaron polvos de carbón con un 18% de volátiles y se ha encontrado que el contenido apropiado de inertes es del 60%.

Sapko et al. [15] han determinado que en el caso de carbones con un 18% de

volátiles el contenido adecuado de inertes es mayor del 70%.

La eficacia de inertización se calcula en términos de cantidad de polvo inerte que se requiere para impedir la propagación de una explosión al polvo de carbón. El contenido de polvo inerte total representa el porcentaje de polvo inerte sobre la masa de carbón.

Se ha comprobado experimentalmente que cuanto mayor es el contenido en materias volátiles de un carbón, más fácil se inflama. Si se añade polvo inerte a un determinado carbón para impedir una explosión, se observa que cuanto mayor sea el porcentaje de volátiles, mayor cantidad de inerte es necesario añadir.

En la tabla B.2 se muestra el contenido de inertes requerido por diferentes reglamentos internacionales.

Tabla B.2 Porcentaje de polvo inerte requerido según los Reglamentos internacionales

Jurisdicción	Año	Contenido de inertes requerido	Contenido de inertes incrementa con el aumento de:	Disminuye con disminución de:	Contenido mínimo de inertes
Alberta, Canadá	1995	65%	El contenido de inertes aumenta 1% por cada 0,1% de grisú presente	Volátiles	50%
Nueva Escocia, Canadá	2003	75%			
Columbia Británica, Canadá	1997	65%		Volátiles	
Bélgica	1965	78%		Volátiles de 14% a 26%	60%
Gran Bretaña	1961	75%		Volátiles– aproximadamente 5% por cada 2% de volátiles debajo de 35%	50%
EE.UU.		80%		Entradas – 65%	65%
Nueva Gales del Sur, Australia	1999	85%		Entradas – 80%	70% en todas las galerías a más de 200 m fuera de la última línea completa desde frente
Canadá, Código Federal de trabajo	1990	75%			
República Checa	1957	80%			
Francia	1965	70%		Volátiles de 22% a 29%	50%
Alemania	1965	80%			
Italia	1965	75%		Volátiles de 20% a 35%	
Holanda	1965	65%	grisú de 0 a 1,5%		

Jurisdicción	Año	Contenido de inertes requerido	Contenido de inertes incrementa con el aumento de:	Disminuye con disminución de:	Contenido mínimo de inertes
Polonia	1959	70%	grisú – 80% en galerías “grisuosas”		
Sudáfrica	2002	80%			
Rusia	1953	60%	grisú – 75% en galerías “grisuosas”		

NOTA: por material inerte se entiende tanto los sólidos (cenizas) como el agua (humedad de cualquier tipo)

- El Reglamento norteamericano exige un mínimo del 65 % de polvo inerte, aumentando en un 1% los inertes por cada 0,1% de grisú presente. Sin embargo, en los retornos de ventilación se requiere un 80 % de polvo inerte, aumentando en un 0,4 % de inertes por cada 0,1 % de grisú presente.
- El Reglamento francés fija un mínimo del 50% de polvo inerte si el contenido en volátiles es inferior al 22% y un 70 % en el caso contrario. Sin embargo, esos porcentajes se corrigen en cada caso, según las condiciones de grisú, así como por la presencia de barreras pasivas como medida de protección.
- El Reglamento belga exige un mínimo del 60 % de polvo inerte para los carbones cuyo contenido en volátiles está entre el 14% y el 26%. Para contenidos mayores de 26% se recomienda un 78% de inertes.
- El Reglamento inglés establece distintos porcentajes de incombustibles según el contenido en volátiles de carbón. Para los carbones cuyo contenido en volátiles es mayor del 35% se requiere un 75% de inertes. Este porcentaje disminuye en un 5% por cada 2% menos en el contenido de volátiles, hasta la cantidad mínima de inertes de 50 % .
- En la Reglamentación española no se establece ningún valor mínimo en cuanto a la concentración de polvo inerte en la mezcla. Sin embargo, los reglamentos extranjeros fijan el porcentaje de polvo inerte necesarios, de acuerdo con las características de la mina o del carbón.

En lo referente a los requisitos que el polvo inerte debe cumplir, hay concordancia en las características tales como, tamaño fino, poco higroscópico, fácilmente dispersable, etc.

Recientemente en Estados Unidos se ha llevado a cabo uno de los estudios más extensos realizados hasta la fecha [16], para comprobar la eficacia de distintos polvos inertes. Se han ensayado 37 distintos polvos inertes. Los resultados de los ensayos sobre la eficacia de dichos polvos inertes se muestran en la Tabla B.3.

Tipo de polvo inerte	Peso – porcentaje necesario para inertizar		
	Cámara de 8 litros	Galería de 2m de diámetro	Mina experimental
Hidrógeno-carbonato potásico (KHCO ₃)	75 – 80	70 – 75	67 – 73
Carbonato Cálcico (CaCO ₃)	~ 60	65 – 70	67 – 70
Cloruro de potasio (KCl)	50 – 55	20 – 30	35 – 40
Cloruro de Sodio (NaCl)	45 – 50	18 – 24	35 – 40
Fosfato monoamónico, compuesto fertilizante de baja toxicidad (NH ₄ H ₂ PO ₄ (ABC))	18 – 20	10 – 15	18 – 24

Tabla B.3: Eficacia de diferentes polvos inertes para inertizar el carbón de Pittsburgh

Según los resultados de los ensayos que se muestran en la tabla A.3, la eficacia de los inertes ordenada de de mayor a menor, es la siguiente:

Fosfatos > Halogenuros > Carbonatos

B.3 PROPUESTA DE METODOLOGIA PARA CALCULAR EL PORCENTAJE DE INERTES

La experiencia adquirida por el *Laboratorio Oficial J.M. Madariaga (LOM)* [3] y [4] ha permitido desarrollar un método para calcular de forma teórica el porcentaje de humedad y de inertes que se precisaría agregar a cada carbón.

El cálculo se basa en establecer las variables que se determinan en el laboratorio para caracterizar químicamente un tipo de carbón y que están correlacionadas con las variables que caracterizan la explosividad de dicho carbón.

$$VC12 = f(C, H, S, h, Cs, V) \quad (1)$$

$$VC11 = f(TMin, LIE, EMI, Pmax, Kmax) \quad (2)$$

El primer conjunto (1) de variables se refiere a las combinaciones lineales de las variables relativas a los análisis químicos,

donde,

C es carbón;

H es hidrógeno;

S es azufre,

H es humedad;

Cs es el contenido en ceniza;

V es el contenido en volátiles

La variable canónica VC12 reúne todas las características del análisis elemental y del inmediato del carbón. Es obvio que el contenido en volátiles (3) lleva un mayor peso sobre VC12 que el resto de las características del carbón, pero su ventaja reside, precisamente, en que considera la influencia de todas las características.

$$VC12 = -3,05 + 0,052C - 0,039H + 0,041S - 0,012W + 0,064A - 0,057V \quad (3)$$

El segundo conjunto de variables (2) VC11 se refiere a las combinaciones lineales de las variables relativas a los parámetros de explosividad,

Donde,

TMI_n es la temperatura mínima de ignición;

LIE es el límite inferior de explosividad;

EMI es la energía mínima de ignición;

P_{max} es la presión máxima;

K_{max} es la velocidad de aumento de presión.

La variable canónica VC11 tiene en cuenta los valores de los parámetros de sensibilidad a la ignición y severidad de explosión. Según los valores que alcancen VC12 y VC11, normalmente muy próximos cuantitativamente, el polvo de carbón se considera más o menos peligroso. Este método de las variables canónicas se presta a una representación gráfica muy descriptiva del comportamiento de los carbones.

Se obtiene fácilmente un diagrama canónico en el que se representan los valores de las variables canónicas correspondientes a cada muestra.

Como consecuencia de un estudio estadístico de valores correspondientes a carbones de diversos rangos y procedencias se estableció que $VC12 \times VC11 = -0,4$ y $VC12 \times VC11 = 1,7$ marcaban la frontera entre tres tipos de comportamientos del polvo de carbón (véase la figura B.1).

De acuerdo con esto, se distinguen tres zonas en el diagrama:

A = Sensibilidad y severidad elevados

B = Sensibilidad y severidad moderadas

C = Sensibilidad y severidad bajas

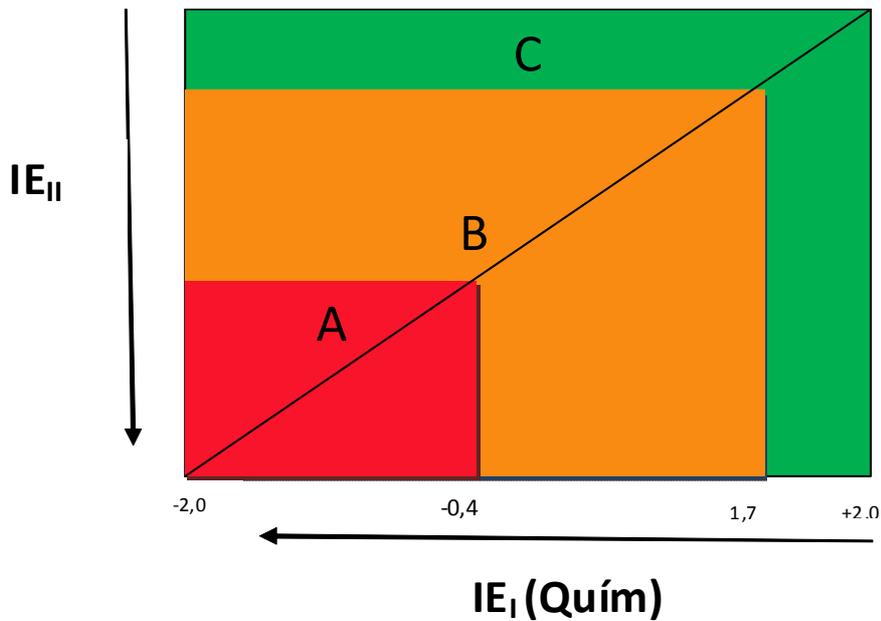


Figura B.1. Diagrama canónico para carbones

Es posible, además, calcular de forma teórica el porcentaje de material incombustible (agua o polvo inerte) que se precisaría agregar a cada carbón que se encuentre en las zonas A o B para llevarlo hasta la “zona segura” C, es decir, para inertizarlo.

Para hallar el porcentaje de inertes que hay que añadir a un determinado tipo de carbón para inertizarlo y situarlo en la “zona segura” C se recomienda la siguiente ecuación:

$$Z = (100 VC12 - 170) / (VC12 - 3,35) \quad (4)$$

donde,

$$Z = X + Y$$

X = % de polvo estéril añadido

Y = % de agua añadido

La experiencia ha demostrado que se obtiene muy buena concordancia entre los valores calculados y los determinados de forma experimental en el laboratorio y a escala real en galerías de ensayo.

Las variables canónicas varían habitualmente entre -2,0 y +2,0.

Para una comprensión más intuitiva de su significado se suelen emplear dos índices de explosividad, denominados *Índice Químico (IEI)* e *Índice Físico (IEII)*, obtenidos de forma inmediata a partir de las variables canónicas:

$$IE I (Quím) = 2-VC12$$

$$IE II (Fís) = 2-VC11$$

A modo de ejemplo de cálculo de variable canónica, véase la tabla B4: En ella se dan los valores de variable canónica y los porcentajes de inerte que se precisan para tres tipos de carbones.

Carbón	C	H	S	W	A	V	VC12	Z (Estériles) = X + Y
TER-12	58,9	3,7	6,8	2,8	13,8	33	-0,88	61
US	77,1	5	1	1,75	6,5	35,9	-0,85	60,7
H5N1	70,1	4,7	1,7	0	9,7	37,6	-1,04	62,4

Tabla B.4: Análisis químico de diferentes muestras de carbón con porcentajes del contenido en inertes

B.4 INERTIZACIÓN DEL POLVO DE CARBÓN

B.4.1 INERTIZACIÓN DEL POLVO DE CARBÓN POR RIEGO

Generalidades

La inertización del polvo de carbón por riego tiene dos propósitos:

- Prevenir la dispersión de polvo, y así impedir que se establezcan las condiciones necesarias para una explosión
- Prevenir la participación del polvo de carbón en una explosión subterránea

Al agua empleada para el riego 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. Este es un procedimiento barato y sencillo, aunque puede resultar poco eficaz, debido a la evaporación del agua.

La capacidad del carbón para absorber agua varía según los tipos de carbón, su composición petrográfica, o estado de fracturación, etc. y depende también del tiempo que se esté aplicando el riego con agua y de la presión del agua. La presión del agua condiciona también la 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 zona microfisurada, se precisa una mayor presión del agua de riego.

Se recomienda que todas las labores dispongan de una red de agua, con una presión y caudal suficientes, con tomas de agua espaciadas a cada 50 metros

y con mangueras de longitud apropiada [12].

Cuando se recomienda el empleo de agua como inertizante hay que especificar las áreas de aplicación, el método que ha de aplicarse, el tiempo transcurrido entre dos aplicaciones y el método adoptado para verificar que se ha aplicado la cantidad suficiente de agua.

El agua aplicada al polvo de carbón reduce el riesgo de explosión siempre y cuando se pueda garantizar que se ha aplicado la cantidad suficiente de agua. En el Anexo VII de la *“Guideline for the Compilation of a Mandatory Code of Practice for the Prevention of Coal Dust Explosions in Underground Coal Mines”* [24] elaborada por MHS se recomienda la inertización por riego como primera línea de defensa contra la propagación de una explosión al polvo de carbón. El porcentaje de la humedad que recomienda MHS es de al menos el 30 % de humedad, pero con una aclaración: la humedad añadida por el riego no proporciona una protección eficaz contra una explosión de polvo de carbón en suspensión porque éste no se adhiere a las superficies húmedas.

Los resultados de los ensayos sobre la eficacia de agua como agente de inertización en detener la propagación de una explosión llevados a cabo en minas experimentales de Polonia y EE.UU. recomiendan mantener un mínimo del 50% de humedad añadida al polvo de carbón si se trata de una única medida de prevención aplicada [28].

La granulometría de polvo de carbón, entre otras cosas, tiene una gran influencia sobre la severidad de explosión, es decir, la severidad de explosión aumenta linealmente con el aumento de la superficie específica al disminuir la granulometría.

Muchos autores están de acuerdo que el polvo de carbón cuya granulometría es mayor de 850 μm no contribuye a una explosión de polvo de carbón, aunque Maguire and Casswell [25] sugieren que el tamaño restrictivo sea más pequeño que este (240 μm).

Otra propiedad que también afecta la explosividad es el contenido en volátiles.

En EE.UU. se ha comprobado que la explosividad aumenta con el incremento en volátiles.

En Australia, los investigadores opinan que un contenido en volátiles inferior al 10% no afecta a la propagación, y que la granulometría del polvo de carbón, entre otros factores, tiene una mayor influencia. El límite inferior de explosividad (LIE) varía con la granulometría de polvo, con el contenido en volátiles y con la presencia de grisú. Nagy [26] considera, que el polvo de carbón tiene el Límite Inferior de Explosividad de 100g/m³ si el 100% de polvo

pasa a través de un tamiz de 840 μ m y el 20 % de éste pasa a través de un tamiz de 75 μ m. Los ensayos que se han llevado a cabo con diferentes polvos de carbón en minería moderna (más de 70% pasa a través de un tamiz de 75 μ m) muestra un LIE del 50g/m³. Esta disminución de la granulometría del polvo de carbón, en gran medida, es la responsable del aumento en inertes necesario para inertizar las galerías.

Aparte de todo mencionado anteriormente, si se confía únicamente en la inertización mediante el riego con el agua como agente de inertización debe tenerse presente lo siguiente:

- La observación visual es un método insatisfactorio y pobre para estimar el contenido de humedad porque la tendencia general es a sobreestimar el contenido de humedad;
- Las superficies encharcadas no necesariamente proporcionan la protección suficiente contra una explosión ya que el polvo de carbón en suspensión tiende a depositarse sobre la superficie de agua debido a la alta tensión superficial del agua;
- El polvo de carbón seco en suspensión, aunque se adhiere mejor a las superficies mojadas que a las secas, se deposita por la corriente de aire y permanece seco a pesar de que debajo de la superficie el carbón está mojado.
- Por lo tanto los depósitos de polvo fino de carbón acumulados en las superficies altas, en los lados, en el techo, tuberías, equipos y otros dispositivos deberían lavarse, o eliminarse por otro método de inertización diferente.

Una mina grisosa con una fuerte humedad no es infaliblemente segura. Un ejemplo de posible iniciación de una explosión secundaria de polvo de carbón a pesar de un alto contenido en humedad sucedió en junio de 1988 en la mina Borken, en Alemania.

La eficacia de la inertización por riego se incrementa con el incremento de la tendencia a humedecerse del carbón; las condiciones son especialmente favorables cuando en las paredes de las galerías hay una presencia notable de agua filtrada de capas acuíferas vecinas, aguas subterráneas o incluso de la superficie.

No obstante, se necesita un riego complementario para alcanzar el contenido de humedad requerido.

Cuanta mayor parte de las superficies de una galería está húmeda por filtración de agua, mejor inertización por riego se consigue. Sin embargo, es difícil

inertizar los lados o el techo, o tramos secos aislados aportando suficientemente cantidad de agua. En estas zonas normalmente secas se debe prever un tratamiento adicional.

Lugares o circunstancias que más demandan inertización por riego como medida de prevención

La inertización por riego se recomienda en los casos siguientes:

- En las galerías de una explotación subterránea no clasificadas como grisuosas;
- En las galerías de una explotación subterránea clasificadas como grisuosas cuyas paredes están permanentemente húmedas a causa de la filtración de agua natural, por riego durante el arranque de carbón;
- En las galerías de una explotación subterránea clasificada como grisuosas cuyo suelo contiene polvo de carbón cuyo contenido en cenizas en base seca excede 35%.

Al margen de estos tres casos, la inertización por riego se puede aplicar cuando sean impracticables o ineficaces otros métodos de inertización, en particular, en las galerías de carbón en capa dura o en las galerías de transporte donde circulan máquinas con neumáticos.

El contenido de humedad y de los inertes sólidos recomendados pueden obtenerse mediante inertización por riego o añadiendo inertes, o por ambas medidas a la vez.

Para determinar el contenido de incombustibles sólidos se escoge polvo de carbón que pasa a través de un tamiz de 250 μm . Esta dimensión del tamiz es una indicación sobre la granulometría del polvo incombustible destinado a la inertización. El contenido de humedad, en porcentajes, expresa el peso del agua retenida en la muestra sobre el peso total de la muestra.

Se recomienda que el contenido de humedad añadida al polvo de carbón exceda los siguientes valores [19]:

- 12% en las minas no grisuosas;
- 12% en la explotación subterránea clasificada como grisuesa cuyo polvo de carbón excede 35% en cenizas en base seca;
- 20% en la explotación subterránea clasificada como grisuesa cuyo polvo de carbón tiene un contenido en cenizas en base seca inferior al 35%.

El empleo de riego como medida de prevención se recomienda en las áreas que se listan a continuación:

- Frentes con arranque rápido mecanizado, o
- Lugares de empleo de explosivos,
- Las zonas de perforación, las operaciones de carga y transporte,
- Los puntos de descarga, llenado y vuelco de las vagonetas,
- Transferencia de cintas,
- Extracción, etc.

Frecuencia de verificación

La verificación de las características del polvo de carbón húmedo en una galería se realiza mediante análisis de muestras, con un método similar al que se emplea para verificar la inertización por polvos inertes.

Para verificar el grado de inertización hace falta determinar a la vez la humedad y el contenido de material inerte en el polvo de carbón:

- El contenido de humedad se determina de la siguiente manera: la muestra se introduce en una estufa de aire caliente y se seca durante al menos 1 hora a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pasado este tiempo la muestra se saca de la estufa y se espera un tiempo para que se enfríe. A continuación se pesa y calcula el porcentaje de humedad perdida mediante siguiente expresión:

$$H (\%) = (M - M_S)/M \times 100 \quad (5)$$

donde,

H (%) es el contenido de la humedad de la muestra de polvo de carbón

M es el peso de la muestra recogida antes de secado (g)

M_S es el peso de la muestra después de secado (g)

- El contenido de inertes se determina sobre una segunda muestra, o sobre una fracción de la muestra anterior que se tamiza a través de un tamiz de 250 μm después de secarse (véase el apartado B.4.2)

Las características del polvo húmedo en una galería inertizada por riego deben comprobarse mediante análisis de muestras obtenidas a partir de un muestreo realizado. En la tabla B.6 se muestran los valores orientativos de número de muestras, longitud de tramos y la frecuencia de muestreo.

Los intervalos de verificación que se recomiendan no deben exceder:

- al menos una vez al mes en los frentes de avance;
- al menos una vez cada tres meses en otras galerías de la explotación

subterránea.

Mediante comprobaciones periódicas se puede apreciar cuantitativamente el cumplimiento de los porcentajes recomendados. Las condiciones de muestreo se especifican en la tabla B.6 de esta Guía.

Control

La humedad de saturación de polvo de carbón se alcanza cuando el polvo de carbón presionado con las manos mantiene su forma sin exceso de agua.

El porcentaje de humedad necesario para añadir a un determinado polvo de carbón depende del tipo de carbón, su composición petrográfica y su granulometría. [18].

Con el control del grado de humedad se pretende garantizar la eficacia de inertización, pero también justifica la reducción o aumento de la cantidad de agua necesaria.

Se procede a supervisar la inertización por riego, apreciando:

- la presencia de polvo de carbón seco y no fijado a la superficie;
- presionando con las manos un puñado de polvo de carbón;
- Cuando, a causa de la naturaleza del polvo acumulado y de grado de humedad exigido, este control puede considerarse como suficiente, al verificar que el contenido de agua añadida mediante los ensayos cumple los requisitos.

Antes de reanudar la actividad de extracción de carbón, por ejemplo, después de un paro prolongado, excepto en el caso de filtración constante de agua natural, es necesario completar la inertización por riego. Este procedimiento también se recomienda después de una parada de varios días, o incluso después de una parada de fin de semana. También se recomienda eliminar el polvo de carbón acumulado.

B.4.2 INERTIZACIÓN DE POLVO DE CARBÓN CON POLVOS INERTES

Generalidades

La inertización es uno de los métodos de prevención de la propagación de una explosión primaria al polvo de carbón. El método consiste en la adición de polvo inerte (llamado polvo diluyente o estéril) al polvo de carbón de manera que forman una mezcla cuyos parámetros de explosividad son reducidos.

La aplicación de polvo inerte tiene dos propósitos:

- Previene la dispersión de polvo, y
- Previene la participación del polvo de carbón en una explosión subterránea de forma siguiente:
 - ✓ Actúa de sumidero de calor (adsorción de energía).
 - ✓ Proporciona un apantallado a la radiación del frente de llama.
 - ✓ Dificulta la cinética de la combustión.
 - ✓ El polvo inerte y otros inhibidores de una explosión diluyen la concentración de polvo de carbón,
 - ✓ Impide que el oxígeno u otros gases participen en una explosión.

Los polvos inertes deben cumplir con los límites establecidos en la ITC 2.0.02 de polvo relativa a los valores límites ambientales de exposición diaria a sílice, que son siguientes:

- ✓ la concentración de la fracción respirable de polvo: máx. 3 mg/m³
- ✓ la concentración de sílice libre contenida en la fracción respirable:
 - a) máx. 0,1 mg/m³ (cuarzo)
 - b) máx. 0,05 mg/m³ (cristobalita, tridimita)

El polvo inerte aplicado debe tener una granulometría adecuada que le permita dispersarse fácilmente por una onda explosiva y cumplir lo siguiente:

- ✓ al menos un 95 % del polvo inerte debe pasar a través de tamiz de 250 µm y,
- ✓ de la fracción de polvo inerte que inicialmente ha pasado a través del tamiz de 250 µm, entre un 60 % y un 80 % debe pasar a través del tamiz de 63 µm.

Un polvo inerte eficaz debe ser incombustible, no se debe aglomerar y debe ser poco higroscópico. También debe dispersarse fácilmente y permanecer en suspensión.

Lugares o circunstancias que más demandan el empleo de polvos inertes como medida de prevención

Los requisitos mínimos de inertización recomendados han sido calculados por el método desarrollado por el *Laboratorio Oficial J.M. Madariaga* [3], [4] que calcula de forma teórica el porcentaje de inertes (incluidos humedad y ceniza) en ausencia del grisú.

En minas clasificadas como grisuosas se recomienda incrementar el porcentaje de inertes con una cantidad adicional por cada 1% de grisú presente:

$$A = (100 - I)/5 [32] \quad (5)$$

donde,

A es la cantidad adicional de polvo inerte en presencia de grisú (%),

I es el porcentaje total de incombustibles en ausencia de grisú.

A continuación se expone un ejemplo de cálculo de inertes adicional, para polvo de carbón de Pittsburgh. Este carbón necesita el 78% de inertes en ausencia de grisú, por tanto, la cantidad adicional es:

$$A = (100 - 78)/5 = 4,4\%$$

- para 1 % de grisú en la mina se necesita $78 + 4,4 = 82,4$ %,
- para 2 % de grisú en la mina se necesita $78 + 8,8 = 86,8$ %, etc.

Las áreas de especial interés, que más demandan del empleo de polvos inertes como medida de prevención son las que siguen a continuación:

- ✓ Frentes con arranque rápido mecanizado, o convencional
- ✓ Lugares de empleo de explosivos,
- ✓ Las zonas de perforación, las operaciones de carga y transporte,
- ✓ Los puntos de descarga, llenado y vuelco de las vagonetas,
- ✓ Transferencia de cintas,
- ✓ Extracción, etc.

Límites de empleo

Como se ha comentado anteriormente, el material inerte debe dispersarse fácilmente por una onda explosiva. Está claro que la inertización no se recomienda en los lugares donde se emplea la fijación por sales higroscópicas. Si se procede a la inertización de una superficie anteriormente tratada con sales, la fijación del material inerte no será inmediata, sino tardará unas horas o días.

No obstante, en una galería tratada correctamente con polvos inertes, pueden subsistir ciertas zonas húmedas, por ejemplo, en las proximidades de un pulverizador. Además, la inertización por polvos inertes puede aplicarse al techo, a los lados o a la estructura de una galería cuyo suelo está inertizado

por riego o por sales higroscópicas.

No se recomienda la aplicación de polvos inertes a la capa principal.

Condiciones de aplicación

Los polvos inertes deben cumplir las siguientes recomendaciones:

- el porcentaje de inertes debe ser igual o superior al porcentaje teórico calculado (véase el apartado B.3) para un carbón determinado en todas las áreas recomendadas;
- controlar la formación de acumulaciones de polvo de carbón sobre la superficie tratada por inertes, susceptibles de ponerse en suspensión por una onda explosiva de escasa potencia.

Porcentaje en peso de polvo inerte que se precisa para inertizar el polvo de carbón

- En las explotaciones subterráneas clasificadas como no grisuosas
Se recomienda el porcentaje teórico de inertes como el contenido total de incombustibles (incluidos humedad y ceniza) en la mezcla (se calcula de acuerdo con la metodología propuesta en el apartado B.3).
- En las explotaciones subterráneas clasificadas como grisuosas
Se recomienda incrementar el porcentaje teórico de inertes calculado de acuerdo con la metodología propuesta en apartado B.3. con una cantidad adicional de inertes por cada por ciento de grisú presente (véase la formula (5)).

Si se instalan las barreras de agua se puede reducir el porcentaje teórico de inertes necesarios para inertizar los laterales y el techo de una galería en un 5% (véase el apartado B.3) [18].

Requisitos relativos al muestreo y análisis de muestras de polvo para el control de la inertización

Básicamente, el propósito de un muestreo es recoger las muestras de polvo de carbón que proceden de acumulaciones, en un lugar que ha sido inertizado, de manera que las muestras sean representativas y que reflejen las verdaderas características de la masa total de la cual fueron extraídas.

Esta muestra representativa, será del tipo denominado “muestra de tipo natural” y está sujeta a lo descrito en la norma UNE 22-331-90 [6] (véase el

apartado 3.2.2 de esta norma). El método empleado para la recogida de muestras, la frecuencia de muestreo y la exactitud de las muestras recogidas, dependen de la naturaleza del polvo de carbón muestreado.

Se recomienda elaborar un programa de muestreo que asegure el cumplimiento de los requisitos mínimos de contenido de humedad y de polvo inerte conforme a los siguientes pasos:

- Definir la frecuencia de muestreo en función de las zonas de la mina
- Definir el método de muestreo (procedimiento, materiales, cantidades de muestra)
- Definir el método de análisis de las muestras de carbón
- Definir los criterios de aceptación y rechazo
- Recomendar las medidas a adoptar en función de los casos que puedan presentarse (aceptación/rechazo)

La probabilidad de propagación de una explosión primaria al polvo de carbón se reduce exponencialmente con el aumento del grado de inertización, por lo tanto es muy importante mantener el grado recomendado del material inerte.

En la tabla B.5 se recogen las recomendaciones sobre el lugar y la frecuencia de recogida de muestras de polvo. La mina podría dividirse en áreas y subáreas según el porcentaje de polvo inerte que se requiera en cada una.

Lugar de recogida de muestra	Frecuencia de muestreo en función del porcentaje
A. Frentes de avance mecanizado y convencional, perforación de barrenos, arranque y carga, trasvase de mineral en el transporte, transporte de mineral por los pozos primarios, galerías de retorno de aire, galerías con cinta transportadora.	Recogida de muestras <u>una vez al mes</u> , a no ser que el análisis de riesgo o de muestra de polvo, que incluye las tasas de acumulación de polvo de carbón en suspensión indique lo contrario.
B. Galería de entrada de aire, lugares alejados de galería de retorno, lugares distintos de los mencionados en (A), las galerías mencionadas en (a) que cuentan con barreras pasivas de polvo estéril/agua.	Recogida de muestras <u>una vez cada tres meses</u> , a no ser que el análisis de riesgo o de muestra de polvo, que incluye las tasas de acumulación de polvo de carbón en suspensión indique lo contrario.

Tabla B.5. Recomendaciones sobre el lugar y la frecuencia de muestreo

Las acumulaciones de carbón susceptibles de ponerse en suspensión en una galería por una onda explosiva dependen esencialmente de las características locales de esta explosión. Una onda de presión puede levantar el polvo fino y seco acumulado en el piso, en los lados y en la azotea, también, puede secar y levantar el polvo húmedo, o el polvo de carbón acumulado debajo de la capa de estériles aplicados.

Verificación y control

El método de verificación es un método convencional que mediante comprobaciones periódicas permite apreciar cuantitativamente el cumplimiento de los porcentajes recomendados.

Para clasificar una galería subterránea en áreas se han tenido en cuenta los trabajos del Órgano Permanente de Seguridad y Salud en las Minas de Hulla y otras Industrias Extractivas, y los trabajos que condujeron a la elaboración del reglamento francés y alemán de inertización. Según estos reglamentos se distinguen los siguientes tipos de labores:

- A: labores o partes de labores en las proximidades de las fuentes de emisión de polvo de carbón; con acumulaciones de polvo de carbón importantes e irregulares:
 - ✓ A1: en proximidades de una fuente importante de emisión de polvo (los puntos de vertido de polvo de carbón en proximidades de una cinta transportadora, trituradoras, los puntos de carga de vagonetas, los volquetes, cintas transportadoras que atraviesan las puertas de ventilación, o donde no se puede eliminar satisfactoriamente el polvo en suspensión en la atmósfera, frentes de avance mecanizado y convencional, perforación de barrenos, arranque y carga, transporte de carbón por los pozos primarios, galerías de retornos de aire, galerías con cinta transportadora);
 - ✓ A2: una parte de galería a menos de 300 metros de una labor de arranque activa;
- B: labores o partes de labores situadas a mayor distancia de las fuentes de emisión de polvo en las que las acumulaciones de polvo son escasos y más uniformes:
 - ✓ B 3: en una de galería a más de 300 metros de una labor de arranque activa;
 - ✓ B 4: fuera de una sección aislada de galería con una cinta transportadora;

- ✓ B 5: otras labores.

La clasificación en diferentes labores se caracteriza también, por un índice que va de 1 a 5. Con el aumento de índice aumenta:

- la longitud L del tramo de muestreo;
- la distancia I entre dos sucesivas tomas de muestras;
- el intervalo T entre dos verificaciones.

En la tabla B.6 se muestran los valores orientativos para L, I, y T. En la última fila de la tabla se recomienda el número de las muestras que se deben tomar en cada tramo:

- ✓ 2 significa que deben formarse dos distintas muestras, una del piso de un muro, y otra de los hastiales;
- ✓ 1 que las dos muestras pueden mezclarse.

Tipo de labores	A1	A2	B3	B4	B5
Longitud de los tramos de muestreo $L <$	50m	200m	400m	1000m	1000 m
Distancia entre dos tomas de muestras $I <$	4m	10m	20m	20m	50 m
$L \text{ max} / I \text{ max}$	12,5	20	20	50	20
Intervalos entre dos verificaciones					
Intervalo normal $T \leq$	1 mes	1 mes	3 meses	3 meses	3 meses
Numero de muestras por tramo	2	2	1	1	1

Tabla B.6 Condiciones de muestreo [19]

En las galerías en las cuales la acumulación de polvo de carbón es nula o muy pequeña no es necesario verificar el contenido en inertes mediante análisis de las muestras, a causa de la gran distancia que las separa de las labores activas y por ausencia de transporte del carbón.

En las galerías en las cuales la acumulación de polvo de carbón es importante, se recomienda realizar inertización después de estudio de las cantidades de inertes necesarios y frecuencias de aplicación para una inertización eficaz.

La muestra que hay que analizar es un conjunto de tomas de muestras elementales, que deben recoger el polvo de carbón que puede intervenir en la

propagación de una posible explosión. Se trata de polvo más fino que pasa a través de un tamiz de 250 µm. Las indicaciones dadas en la tabla B.6 son orientativas.

La toma de muestras de las superficies verticales o inclinadas se realiza con un suave cepillado para formar una muestra representativa del techo, de los lados o de las estructuras que se hallan en una galería que tiene mucha importancia ya que se trata de polvo de granulometría muy fina y más fácil de ponerse en suspensión.

El mismo método se aplica para tomar las muestras del suelo. Si el suelo está cubierto con una capa de polvo seco, no hay que eliminar aglutinantes de la muestra susceptibles de ponerse en suspensión. Si el piso está solidificado por la humedad o por la circulación de maquinaria u operarios, la toma de muestra se realiza con un raspador metálico, sin exceder 1 centímetro de profundidad, eliminando las granulometrías más gruesas que no pueden pasar a través de un tamiz de 3 mm.

El procedimiento de análisis de las muestras recomendado está de acuerdo con las recomendaciones del *Órgano de Trabajo Permanente para la Seguridad y Salud en las Minas de Hulla y otras Industrias Extractivas*:

- La muestra se introduce en una estufa de aire caliente y se seca durante al menos 1 hora a $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Pasado este tiempo la muestra se saca de la estufa y se espera un tiempo para que se enfríe. A continuación se pesa y se determina el contenido de humedad. Finalmente, se procede a:
- Tamizar la muestra a través de un tamiz de 250 µm;
- Calentar una muestra de 1 gramo aproximadamente en un horno de mufla cuya temperatura alcanza $490\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ durante sesenta minutos;
- Mantener esta temperatura hasta que la masa se haya vuelto constante, a 1 miligramo aproximadamente
- Calcular el porcentaje de inertes mediante la siguiente expresión:

$$I = [(H + R)/M] \times 100 \quad (6)$$

donde,

I es el porcentaje total de incombustibles del polvo de carbón que ha pasado a través de un tamiz de 250 µm;

H peso de humedad;

R es el peso de residuo después de inflamar la muestra de polvo de

carbón;

M es el peso de la muestra recogida.

- Las galerías de muestreo se dividen en tramos más cortos en proximidades de fuentes de emisión de polvo de carbón donde las acumulaciones son más importantes;
- Las galerías o partes de las galerías alejadas de frente de avance no requieren verificaciones periódicas del contenido en estériles;
- El muestreo se realiza mediante un ligero cepillado de las superficies poco inclinadas, de las estructuras que se hallan en una galería y del techo. La toma de muestras del piso se realiza sobre un espesor inferior a un centímetro con una herramienta adaptada a la naturaleza de la acumulación. No obstante, el muestreo no se realiza debajo de un transportador cuya altura disponible es inferior a 0,25 m, o en tramos equipados por cubas de agua instaladas bajo una guía, con por lo menos una cuba de 80 litros cada 30 metros;
- En cada tramo de muestreo, las tomas de muestras del suelo y las muestras de las estructuras que se hallan en una galería y las del techo deben constituir dos tomas distintas; no obstante, estas dos tomas pueden reagruparse en una sola muestra en los tramos de galería alejadas del frente de avance o de fuentes de emisión de polvo importantes;
- La frecuencia de las verificaciones de las muestras debe ser fija de manera que se garantice el contenido de inertes recomendado:
 - 1) el intervalo entre dos verificaciones no puede exceder un mes en un tramo de muestreo próximo a frentes de avance, perforación de barrenos, arranque y carga, trasvase de mineral en el transporte, transporte de mineral por los pozos primarios, galerías de retorno de aire, galerías con cinta transportadora o en las proximidades de cualquier otro tipo de fuente de emisión de polvo importante.
 - 2) el intervalo entre dos verificaciones no puede exceder tres meses en otros tramos tales como Galería de entrada de aire, lugares alejados de galería de retorno, lugares distintos de los mencionados en (1), las galerías mencionadas en (1) que cuentan con barreras pasivas de polvo estéril/agua.
 - 3) el intervalo entre dos verificaciones puede aumentarse hasta tres meses en vez de un mes, y nueve meses en lugar de tres meses en el caso de que el análisis de riesgo o de muestra de polvo, que incluye las tasas de acumulación de polvo de carbón en suspensión

indique que el contenido de estériles se mantiene.

B.4.3 METODOLOGÍA DE INERTIZACIÓN

Los métodos utilizados para inertizar galerías subterráneas se dividen fundamentalmente en tres tipos: el espolvoreo manual, el espolvoreo automático o el método que se conoce como “trickle dusting”. [4]



Fotografía B.2: Equipo para la dispersión de agente inertizante. Mina Bobrek (Polonia)

Una medida general de prevención por espolvoreo aplicada en un área de 12 metros [8] desde todos los frentes de avance impide la propagación de una explosión primaria al polvo de carbón.

Si antes de aplicar el polvo inerte al techo y a los lados se riegan previamente, la adherencia de polvo inerte a estas superficies aumenta considerablemente [17].

La norma norteamericana ASA, [27] recomienda aplicar el polvo inerte por vía húmeda en algunas áreas, tales como techos, lados y galería de avance. El uso de polvo inerte por vía húmeda tiene la capacidad reducida para prevenir la propagación hasta que no esté completamente seco.

Todas las galerías de una mina de carbón deben dividirse en diferentes áreas, según los resultados de la evaluación de riesgos de propagación de explosiones de polvo de carbón con el fin de adoptar las medidas necesarias y adecuadas en cada área.

Cuando la evaluación de riesgos indique la necesidad de inertización del polvo de carbón, considerando toda la información disponible, se recomienda emplear el inerte.

A modo de ejemplo, en la Tabla B.7 se muestra el contenido de estériles

(Z=X+Y) necesario para inertizar diferentes tipos de carbones. El porcentaje de inertes necesario se obtiene mediante los cálculos de los valores de VC12 y Z (formulas 3 y 4). El factor Z representa el contenido de inertes que hay que añadir a un determinado carbón para asegurar que el dicho carbón se encuentre en la zona segura C (Figura 1).

$$Z = (100 \text{ VC12} - 170) / (\text{VC12} - 3,35)$$

	Carbón	C	H	S	W	A	V	VC12	Z (Estériles) = X + Y
1	PO	70,6	4,8	0,9	5,2	8	35,8	-1,12	63,1
2	T2	34,5	1,9	8,3	11,4	41,1	24,3	0,12	48,9
3	E6-7	51,8	3,4	0,4	1,4	33	25,5	0,17	48,1
4	TER-12	58,9	3,7	6,8	2,8	13,8	33	-0,88	61
5	AS-42	62,1	3,1	2,1	0,3	26,7	12	1,17	24,3
6	MOS-1	16,8	1,8	0,6	0,2	72,8	12,9	1,7	0
7	TER-7	52,3	3,4	6	10,5	17,5	31,9	-1,04	62,4
8	US	77,1	5	1	1,75	6,5	35,9	-0,85	60,7
9	T1	38,3	2,4	7,1	14,5	36,7	25	-0,11	52,3
10	T2	34,5	1,9	8,3	11,4	41,1	24,3	0,12	48,9
11	T3	60,4	3,9	7,3	18,4	12,4	33,9	-1,12	63,1
12	T4	65,4	3,9	7	19,6	7,1	35,7	-1,33	64,7
13	T6	62,9	3,5	6,5	18,1	11,2	31,9	-0,97	61,8
14	T7	56,5	2,5	8,9	17,9	15,7	31,1	-0,83	60,5
15	E61	43,1	3,6	0,5	2,5	42,3	22,8	0,45	43,1
16	E6-2	56,8	3,7	0,5	2,9	26,9	26,4	-0,04	51,3
17	E6-3	54,9	3,7	0,4	2,6	29,1	24,7	0,1	49,2
18	E6-4	54	3,8	0,4	2,1	30,2	26,5	0,02	50,5
19	E-6-5	62,1	4	0,4	1,5	20,6	24	-0,03	51,2
20	E6-6	42,5	3,1	0,5	2,7	43,9	21,8	0,59	40,2
21	E6-8	41	3	0,4	2,5	45,5	20	0,72	37,3
22	E6-9	41,2	3,3	0,4	1,7	44,7	22,1	0,56	40,9
23	E6-10	43,6	3,1	0,6	3,9	38,7	22,6	0,26	46,6
24	E6-11	42,8	3,1	0,6	4,6	42,7	21,4	0,54	41,3
25	E8-1	57,3	2,5	0,9	2,3	32,8	6,7	1,56	7,8
26	E8-2	53,8	2,1	0,9	4,7	37,5	5,6	1,73	0
27	E8-3	39,6	1,9	0,5	0,9	52,2	7	1,89	0
28	E8-4	33,2	1,8	0,4	1,5	57,8	6,5	1,93	0
29	E8-5	48,6	1,8	0,6	5,7	40,7	5,4	1,66	2,4
30	BA-1	50,9	4,1	9,9	3,1	20,8	45,7	-1,47	65,8
31	H5N1	70,1	4,7	1,7	0	9,7	37,6	-1,04	62,4
32	BA-2	42,3	3,5	8,9	2,1	32,7	44,3	-1,08	62,8
33	TER-1	25,9	2,7	6,2	4,8	52,6	21,9	0,51	41,9
34	TER-3	35,4	2,8	6,9	5,4	40,4	25,8	0,01	50,6
35	TER-8	54,2	3,6	6,6	7,9	15,4	32,1	-1,04	62,4
36	TER-11	50,1	3,6	7,1	7	20,7	32,2	-0,89	61,1
37	TER-15	34,8	2,8	6,6	1,8	43,9	25,1	0,28	46,3
38	TER-16	43,7	3,4	9,2	2,1	30,6	30,2	-0,32	55
39	TER-20	68,5	3,7	1,8	4,7	7,1	30,4	-0,89	61,1
40	TER-21	47,8	3,5	3,7	0,6	23,6	28	-0,64	58,6
41	TER-23	44,4	3,1	5,7	2	35,3	25,7	0,14	48,6

	Carbón	C	H	S	W	A	V	VC12	Z (Estériles) = X + Y
42	TER-25	39,4	3	5,9	5,3	33,8	26,8	-0,3	54,8
43	TER-26	46,4	2,9	5,8	3,6	27,4	28,9	-0,45	56,6
44	TER-27	35,3	2,2	8,6	3,8	37,6	25,6	-0,05	51,5
45	TER-29	39,2	2,8	5,6	2,9	37,1	26,2	-0,04	51,3
46	TER-31	61,5	3,7	4,1	2,8	10,9	34,7	-1,14	63,3
47	TER-33	59,1	3,9	6,8	2,5	12,9	33,3	-0,95	61,6
48	TER-35	54,8	3,9	6,4	2,1	17,4	35,2	-1,01	62,2
49	TER-37	41,6	3	9,9	1,4	28,3	31,6	-0,6	58,2
50	TER-39	57,1	4	5,7	1,3	16,9	35,3	-0,95	61,6
51	AS-36	50,5	2,7	0,4	0,4	40,5	6,5	1,7	0
52	AS-39	38,2	2,3	1,4	0,4	51,9	7,8	1,78	-5,1
53	AS-40	79	3,5	0,8	0,2	10	7,9	1,14	25,3
54	AS-44	43,5	2,5	0,8	0,6	46,8	10,7	1,53	9,3
55	AS-46	67	3,3	0,6	0,2	23	12,6	1,08	27,3
56	UEE	75,4	4,7	2,8	1,7	4,1	30,6	-0,7	59,3

Tabla B.7 Análisis químico de diferentes muestras de carbón con porcentajes recomendados del contenido en inertes

B.4.4 RESUMEN DE FRECUENCIAS DE APLICACIÓN DEL POLVO INERTE POR LABORES

Frentes de avance mecanizado y convencional, perforación de barrenos, arranque y carga, transvase de mineral y transporte por primarios.

El polvo inerte debe aplicarse tantas veces como sean necesarias para mantener el contenido mínimo de polvo inerte calculado para muestras de un polvo de carbón determinado (véase el apartado B.3 y B.4.2) independientemente de la frecuencia de aplicación, que no debe ser inferior a una vez al mes, a no ser que el análisis de riesgo o de muestra de polvo, que incluye las tasas de acumulación de polvo de carbón en suspensión indique lo contrario.

En las operaciones de voladura se recomienda que el área minada se riegue previamente antes del disparo inicial para impedir así que se forme una nube de polvo explosivo después de la pega.

Galería de retorno de ventilación y galerías con cintas transportadoras

Tanto en el sistema de tajos largos como en el de subniveles la frecuencia de aplicación de polvo inerte no debe ser superior a una vez al mes, a no ser que el análisis de riesgo o de muestra de polvo, que incluye las tasas de acumulación de polvo de carbón en suspensión indique lo contrario y se puede recomendar.

En las galerías de retorno de ventilación, se recomienda mantener el contenido mínimo de polvo inerte para un determinado polvo de carbón (véase el apartado B.3 y B.4.2) hasta una longitud mínima de 300 m medida desde el frente de avance.

En zonas más alejados del frente de avance y zonas con barreras pasivas de agua/polvo, se puede reducir el porcentaje teórico de inertes necesarios para inertizar los laterales y el techo de una galería en un 5% (véase el apartado B.3).

Las galerías equipadas con cintas transportadoras constituyen un riesgo particular debido a la emisión de gran cantidad de polvo de carbón en puntos de transferencia y durante el transporte. El vertido de carbón desde la cinta también contribuye al aumento del riesgo. Además, la estructura de cinta transportadora es un lugar ideal para que el polvo se acumule debajo de la cinta, en los puntos de transferencia, carga o vuelco.

En las galerías con cinta transportadora se recomienda mantener el contenido mínimo de polvo inerte calculado para un determinado polvo de carbón (véase el apartado B.3) en un área mínima de 180 m desde el frente de avance.

Galerías de entrada de aire

En las áreas alejadas del frente de avance, en las galerías de entrada de aire se recomienda aplicar el polvo inerte tantas veces como sean necesarias para mantener el contenido mínimo de polvo inerte para un determinado polvo de carbón (véase el apartado B.3) independientemente de la frecuencia de aplicación que no debe ser superior a una vez cada tres meses, a no ser que el análisis de riesgo o de muestra de polvo, que incluye las tasas de acumulación de polvo de carbón en suspensión indique lo contrario.

Sin embargo en áreas de talleres, subestaciones, estaciones de carga de batería o áreas similares, situadas en galerías de entrada de aire, donde se está realizando trabajo o mantenimiento de equipos, se deben extremar las precauciones y la limpieza debido a la proximidad de las fuentes de ignición.

Las recomendaciones relativas a los requisitos de inertización se han basado en la reglamentación europea e internacional y en la información difundida por el *Órgano Permanente para la Seguridad y Salubridad en las Minas de Hulla y otras Industrias Extractivas*, y éstas a su vez se han basado en una amplia investigación. En minas clasificadas como grisuosas se recomienda incrementar el porcentaje de inertes con una cantidad adicional por cada porcentaje de grisú presente (véase la fórmula (5))

B.4.5 PLAN DE APLICACIÓN DE INERTES EN LA MINERÍA SUBTERRANEA DE CARBÓN

Al polvo de carbón deben aplicarse las medidas de prevención tantas veces como sean necesarias para mantener la condición de carbón seguro ya sea inertización por riego o inertización por polvo inerte. El grado de inertes que deben mantenerse y que dependen de análisis de riesgo o de muestra de polvo se calculará mediante las fórmulas (3) y (4) recomendadas por el *Laboratorio J.M.Madariaga*.

Se recomiendan los siguientes pasos:

PASO 1:

- Antes de aplicar cualquiera de las medidas recomendadas es necesario llevar a cabo un muestreo primario para determinar las características químicas y de explosividad de carbón.
- Muestreo primario de carbón: para determinar el contenido en volátiles deben tomarse muestras en las secciones de las galerías representativas, tanto de la capa como de las acumulaciones en el suelo, lados o en el techo.

PASO 2:

Cuando se haya caracterizado el carbón se toma la decisión sobre la(s) medida(a) preventiva(s) que se va(n) a aplicar a determinadas áreas para llevar determinado carbón a la zona segura (véase el apartado B.3):

- **Limpieza** (véase el apartado B.1.2 de esta guía)
- **Inyección de agua en macizo** (véase el apartado B.1.3 de esta guía)
- **Fijación de polvo de carbón por sales higroscópicas** (véase el apartado B.1.4 de esta guía)
- **Inertización** (véase el apartado B.4 de esta guía)

PASO 3:

Si el análisis de riesgo de una galería o parte de galería ha mostrado existencia de un riesgo significativo de propagación de explosión al polvo de carbón se deben tomar las siguientes medidas:

- Inertización por riego, el grado de humedad, el modo de empleo y la frecuencia de aplicación deben asegurar en todo momento que el polvo acumulado en el suelo, techo o en los lados tenga un

grado de humedad adecuado y asegurado entre dos sucesivas aplicaciones de esta medida, (véase el apartado B.4.1. de esta guía)

- Inertización por polvo inerte, el grado de inertes, el modo de empleo y la frecuencia de aplicación deben asegurar que el polvo acumulado en el suelo, techo o en los lados tenga el grado de inertes adecuado y asegurado entre dos sucesivas aplicaciones de esta medida.

PASO 4:

Se deben recoger muestras representativas para llevar a cabo el análisis de control de inertes. Si es viable, en un perímetro completo de la galería, incluidas las estructuras que se hallan en ella (vigas, tuberías, equipos, etc.), de un tramo de galería no inferior a 50 m de longitud.

- La muestra representativa de polvo de carbón se prepara minuciosamente y se pesa. Seguidamente se introduce en una estufa. Se seca a 105 ± 2 °C. Se vuelve a pesar y el peso perdido se corresponde con el contenido de humedad.
- Una segunda muestra o una fracción de la muestra anterior se calienta hasta el rojo blanco ($490 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$) durante sesenta minutos en un horno de mufla hasta completar la incineración. El peso del residuo de la incineración más la humedad perdida se consideran materia incombustible y se expresa como porcentaje del peso total de la muestra

Grisú: en presencia de grisú se recomienda aumentar la cantidad teórica de inertes para reducir el porcentaje de la materia combustible de polvo de carbón (fórmula 5), (véase el apartado B.4.2.)

Humedad: el porcentaje de polvo incombustible se reduce por una cantidad equivalente al porcentaje del agua presente en la mezcla (humedad añadida)

Excepciones: Las recomendaciones de este apartado no se aplican a una galería subterránea, si las condiciones naturales en ella en cuanto a la presencia de incombustibles en el carbón y/o humedad hallados en los ensayos están conformes con el contenido teórico de inertes de manera que cumple los requisitos anteriormente mencionados.

BIBLIOGRAFÍA DEL BLOQUE B

- [1] Javier García Torrent *“Seguridad industrial en atmosferas explosivas”*
- [2] Javier García Torrent *“Atmosferas explosivas en la minería. La problemática del grisú y del polvo de carbón”*, Jornada sobre aplicación de las barreras pasivas de agua a la minería española, Madrid, diciembre del 2008.
- [3] Javier G. Torrent, Iñigo S. Armada and Ramon A. Pedreira: *“A correlation between composition and explosibility index for coal dust”*, FUEL, 1988, Vol 67, December.
- [4] Javier García Torrent, Juan Cantalapiedra-Fuchs, Jose Maria Montes Villalón and Ramon Alcantara Pedreira: *“Improvement in the correlation between the composition index and the explosibility index for coal dust”* FUEL, 1991, Vol 70, September.
- [5] J. García Torrent, J. Barquero Tenllado, *“Clasificación de minas respecto al polvo de carbón”*, Canteras y Explotaciones, octubre 1986, nº 236.
- [6] UNE 22-331-90 *“Explosividad de polvo de carbón. Método para la toma de muestras”*
- [7] UNE 32-102-83 *“Lignitos duros, hullas y antracitas. Toma y preparación de muestras. Parte 1 Toma de muestras”*
- [8] Peter Cain, *“The use of Stone dust to control coal dust explosions: A Review of international practice”* The stakeholders of the Federal Government/Industry, March 2003, Canada
- [9] J.J.L. du Plessis and D.J. van Niekerk, *“Inertization Strategies and practices in underground coal mine”*, Safety in Mines Research advisory committee, January 2002.
- [10] *“Guideline for coal dust explosion prevention and suppression”* produced by Mine Safety Operations Division New South Wales Department of Primary Industries, December 2001
- [11] Richmond, J.K. et al. (1975) *“Effect of Rock dust on the Explosibility of Coal Dust”*, US DOI BuMines RI 8077, 1975.
- [12] *Explotación de minas de carbón con propensión a fuegos ITC - MIE S.M. 05.3.01*
- [13] Nagy, J., (1965); *“Float coal Hazard in Mines: A Progress Report”*, U.S. Department of Interior, BuMines RI 6581, 15pp.
- [14] Weiss, E.S., et al, (1989): *“Recent results of Dust explosion Studies at the*

Lake Lynn Experimental Mine” Proc. 23rd Int. Conf. of Safety in mines research Institutes, Washington, DC, September, 1989

[15] Sapko, M.J., et al. (1989a): “*Review paper: prevention and Suppression of Coal Mine Explosions*” Proc. 23rd Int. Conf. of Safety in mines research Institutes, Washington, DC, September, 1989

[16] Hertzberg, M., Kashdollar, K.L., Lazzara, C.P., Smith, A.C. “*Inhibition and extinction of coal dust and methane explosions*”. Report of investigations. Bureau of Mines, Pittsburgh, PA (USA). 1982.

[17] Hartmann, I., and Westfeld, J. (1956): “*Rock Dusting and Sampling*” US DOI BuMines IC 7755 June 1956.

[18] CIRCULAIRE DU 2 SEPTEMBRE 1994 relative à l'application du décret n° 94-785 du 2 septembre 1994 modifiant le titre: *Poussières inflammables, du règlement général des industries extractives NOR: INDB9400197C* (Journal officiel du 8 septembre 1994)

[19] “*Poussières Inflammables, Section unique: Travaux souterrains des mines de charbon*”, Décret N° 94-785 du Septembre 1994, Circulaire du 2 Septembre 1994.

[20] UNE-EN 1127-2:2002, “*Atmosferas explosivas. Prevención y protección contra las atmosferas explosivas. Parte 2: Conceptos básicos y metodología para minería*”.

[21] Mitchell, D.W., Stahl, R.W. and Kawenski, E.M. “*Continuous Rock Dusting to reduce the float Dust Explosion Hazard*”. Mine Institute of American. Richmond, VA, June 17, 1964.

[22] Lebecki, K., Cybulski, K. “*Risk of coal dust explosion and its elimination*”, New Technologies in underground mining – Safety in Mines, International mining forum, 2004.

[23] NCB (1964); National Coal Board Mining Research Establishment, Isleworth, Middlesex, England, Bulletin N° 5, September, 1964.

[24] “*Guideline for the Compilation of a Mandatory Code of Practice for the Prevention of Coal Dust Explosions in Underground Coal Mines*” Guidelines Mine Health and Safety, disponible en la página web: www.dme.gov.za/pdfs/mhs/guidelines/coal_dust_explosions.pdf

[25] Maguire, B.A. and Casswell, C. (1970) “*Fineness of Coal Dust deposited on the roof and Sides of a Mine Roadway*”, NCB SMRE Research Report 268, 1970.

[26] Nagy, J., (1981) “*The Explosion Hazard in Mining*” US, Department of

Labour, Mine Safety and Health Administration, 1981

[27] ASA (1960) *“American Standard Practice for Rock Dusting Underground Bituminous Coal and Lignite Mines to Prevent Coal Dust Explosion”*, USDOl BOM IC 8001, 1960.

[28] D.S. Kingery and D.W.Mitchell *“Observation on Control of the Coal Dust Explosion Hazard in European Mines”*, Society of Mining Engineers, June 1964-157.

[29] *Informe de trabajos relativos a la neutralización de polvos inflamables y las barreras* (7º Informe del O.P., 1970. Anexo VIII).

[30] *Procedimientos de neutralización de polvos con ayuda de pastas, polvos y productos salinos*. (11º Informe del O.P., 1974, Anexo VI (1)).

[31] *Aplicación de procedimientos de fijación de polvos mediante sales higroscópicas en el marco de la lucha contra las explosiones de polvo de carbón*. (14º Informe del O.P., 1977, Anexo V).

[32] Kenneth L. Kashdollar et al. *“Laboratory and mine dust explosion Research at the Bureau of Mines”*, 1987.

**BLOQUE C: IMPLANTACIÓN, VIGILANCIA Y CONTROL DE LAS
BARRERAS PASIVAS CONTRA LA PROPAGACIÓN DE
EXPLOSIONES**

C.1 CONDICIONES DE INSTALACIÓN DE BARRERAS

C.1.1 Generalidades

Las barreras son una parte esencial del sistema de prevención y protección contra las explosiones por polvo de carbón en las minas subterráneas siendo consideradas como una de las capas en el siguiente esquema general.



Figura C.1 Niveles de medidas de protección en minas subterráneas de carbón

La figura C.1 muestra la posición de las barreras en el sistema de protección. La utilización de barreras corresponde a un nivel de protección bastante alejado que actúa en el caso de fallos de los niveles de protección más cercanos al proceso de producción.

Las barreras se dividen en dos grupos en función del agente de extinción utilizado:

- Las barreras de polvo inerte donde se utiliza el polvo incombustible, por ejemplo, carbonato cálcico, y
- Las barreras de agua donde el agente extintor es agua

Las barreras de agua en función de su utilización se dividen en:

- Barreras concentradas que protegen y aíslan la zona de laboreo donde

pueden aparecer fuentes de ignición.

- Barreras distribuidas que protegen todos los trabajos, desempeñando el papel de inertización. La cantidad del agente extintor en el caso de las barreras distribuidas es 1 l/m³.

En Polonia el 70 % de la totalidad de las barreras instaladas son barreras de polvo inerte y el 30 % restante son barreras de agua. En el Reino Unido, Alemania y República Checa se emplean íntegramente las barreras de agua.

- **Ventajas de las barreras de agua:**

- ✓ protección muy fiable y eficaz de labores que se encuentran detrás de la barrera,
- ✓ instalación y mantenimiento fácil,
- ✓ el agente extintor, es decir agua no se vuelve ineficaz con el tiempo como en el caso de barreras de polvo inerte.

- **Desventajas de las barreras:**

- ✓ grandes dimensiones, hasta 50 m de largo,
- ✓ disminuye la sección transversal de la galería,
- ✓ es necesario cambiar la disposición de las barreras con el desplazamiento del frente de arranque de carbón.
- ✓ cuando hay muchos equipos en las proximidades de frente de arranque es difícil cumplir los requisitos de instalación de las barreras de agua.

Las dimensiones de las barreras están limitadas mediante el requisito de suministro de 5 l (kg) de agente extintor por metro cúbico de espacio de laboreo donde están instaladas las barreras. Esto está calculado para 200 l/m² (kg/m²) de sección de laboreo.

En el año 2007 se publicó la norma UNE-EN 14591-2 "*Prevención y protección contra las explosiones en la minería subterránea – Sistemas de protección – Parte 2: Barreras de cubas de agua pasivas*". Esta norma precisa las reglas de construcción de barreras de agua, su disposición, modo de utilización, marcado, etc. Esta norma es idónea para secciones grandes de laboreo como las disponibles en Alemania o en la mayoría de las minas de carbón de Polonia. La norma es bien conocida en la industria de carbón española aunque su implementación a las condiciones locales requiere una interpretación ligeramente flexible, debida a las reducidas dimensiones de las secciones de galería de las minas españolas. La norma en cuestión expresa claramente que

es aplicable a las “barreras de cubas de agua” pero no por ejemplo, a las “barreras de bolsas de agua”.

La implementación de las barreras de agua en el laboreo debe tener en cuenta principalmente las posibles fuentes de explosión y las propiedades del polvo de carbón.

En las minas de carbón españolas estos dos factores se diferencian considerablemente de los de otros países europeos [1]. Por lo tanto, la instalación de barreras de agua se debería realizar de manera ligeramente diferente de la descrita en la norma UNE-EN 14591-2.

C.1.2 BARRERAS PASIVAS DE CUBAS DE AGUA

C.1.2.1 Condiciones de instalación según UNE EN 14591-2

La norma UNE-EN 14591-2 propone las siguientes condiciones generales para el emplazamiento de barreras (figura C.2):

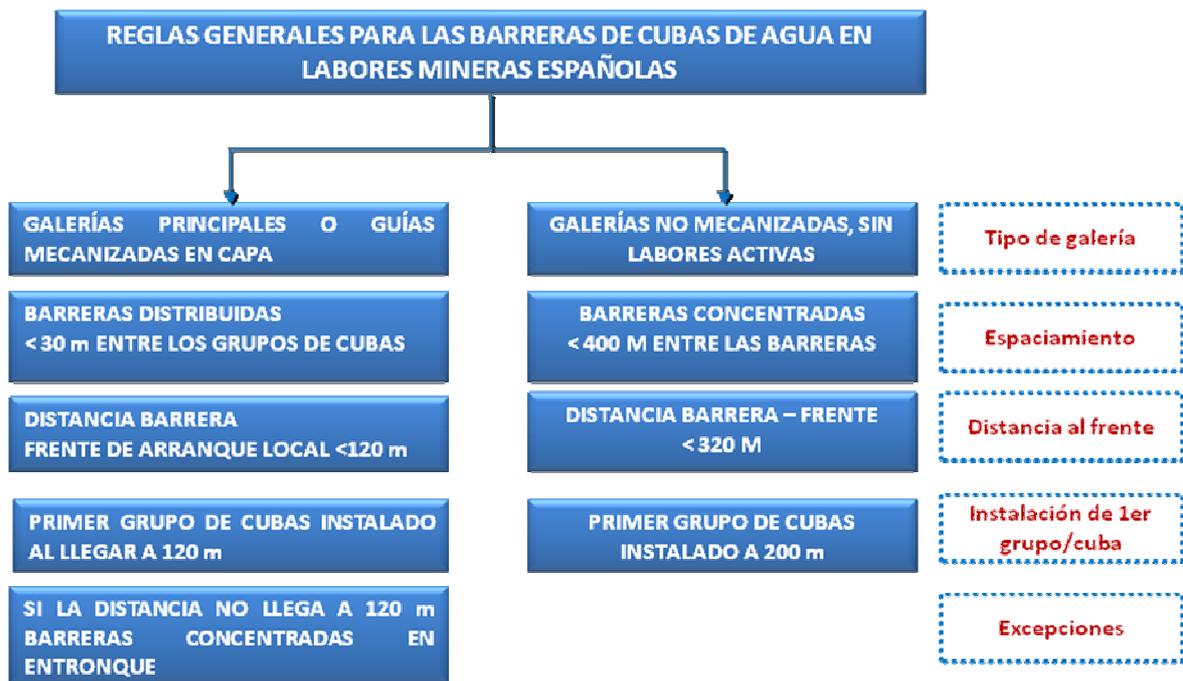


Figura C.2 Condiciones generales para el emplazamiento de barreras de cubas de agua

De acuerdo con el artículo 8.3a de la norma UNE-EN 14591-2:2007, las barreras se disponen de la siguiente manera [3]:

- Los grupos de cubas deben cubrir la máxima anchura de la sección perpendicular de la galería (anchura de suelo o el diámetro de la galería)

en el punto de instalación. La cobertura alcanzada debe ser la siguiente:

- al menos 35 % de sección perpendicular de la galería hasta 10 m²
- al menos 50 % de sección perpendicular de la galería hasta 15 m²
- al menos 60 % de sección perpendicular de la galería mayor de 15 m²

Estos cálculos se basan en medidas tomadas entre los bordes de las cubas exteriores de los grupos de cubas en los paramentos de la galería.

- La distancia horizontal medida perpendicularmente a la dirección de la galería:
 - es inferior o igual a 1,2 m entre la paramenta de la galería y la cuba más próxima. ($\leq 1,2$ m)
 - es inferior o igual a 1,5 m entre dos cubas. ($\leq 1,5$ m)
 - la distancia total no debe exceder a 1,8 m.
- La distancia vertical entre la parte inferior de cualquier cuba y el límite de la sección perpendicular de la galería no debe exceder 2,6 m en dirección descendente tampoco 2,0 m en dirección ascendente. Si la distancia medida en dirección ascendente desde la cuba es mayor de 2 m se debe instalar una cuba adicional. En este caso, la distancia vertical entre la parte inferior de las cubas en cada fila debe tener menos de 2,0 m.
- Las cubas están normalmente instaladas con su lado largo perpendicularmente a la dirección de la galería (disposición transversal). Otra opción de instalación es la disposición de cubas individuales longitudinalmente (disposición longitudinal), sin embargo el número no debe exceder la mitad de todas las cubas en el grupo donde esto es necesario para proporcionar la cobertura para la anchura de la galería y para reducir los espacios intermedios.
- Se permite distribuir más del 50% de las cubas en una distribución longitudinal pero sólo si la eficacia de extinción está comprobada mediante ensayos.
- Las cubas se deben disponer de manera que no se oculten por soportes o fijaciones de la galería. Las cubas, que guardan una distancia entre ellas inferior a 1,2 m en la dirección de la galería, no deben ocultar unas a otras.
- Una variación de lo expuesto anteriormente son las cubas individuales que están situadas a una distancia menor de 1,2 m de los soportes o

fijaciones de la galería que se pueden ocultar hasta 50%.

- Cuando las distancias entre soportes y/o fijaciones y cubas de agua son mayores de 1,2 m, las cubas se pueden ocultar más de 50%.
- Cuando la distancia vertical entre las cubas y soportes o fijaciones es < 0,5 m, las cubas individuales se pueden ocultar hasta 50 %
- Las cubas que están distribuidas a una distancia inferior a 0,5 m por encima de otras cubas no deben ocultar más de la mitad de la superficie de una cuba cualquiera situada encima de ellas.
- La distancia entre las barreras de cubas de agua y las intersecciones o entronques debe ser tan pequeña como sea posible y no debe exceder 75 m en el caso de barreras de cubas de agua concentradas y 30 m en el caso de barreras de cubas de agua distribuidas.
- La distancia máxima de 75 m y 30 m respectivamente entre las intersecciones y entronques no se aplica, cuando la distancia entre barreras de cubas de agua concentradas adyacentes, utilizadas para aislar las zonas de intersección y entronque, es inferior a 200 m.
- Estas distancias no se aplican tampoco entre intersecciones y entronques con poca distancia entre ellas, cuando la distancia entre una barrera de cubas de agua distribuida y una barrera adyacente concentrada o distribuida, utilizada para aislar la zona de la intersección y el entronque, es inferior a 120 m. En esta zona puede evitarse la instalación de barreras de cubas de agua. Esto significa que los puntos donde se cruzan las galerías con los pozos de acceso, pozos insertados o pozos interiores se considerarán como intersecciones o entronques. Los grupos de cubas de estas barreras de cubas de agua distribuidas deben contener al menos 200 l de agua por metro cuadrado de la sección transversal de la galería.
- Las barreras de cubas de agua concentradas deben estar dispuestas en las galerías de tal manera que la distancia entre las barreras no debe superar a 400 m.
- Las barreras de cubas de agua distribuidas deben estar dispuestas en las galerías de tal manera que la distancia entre las barreras no debe superar a 30 m. Dentro de una galería, la distancia entre una barrera de cubas de agua concentrada y el primer grupo de cubas de una barrera de cubas de agua distribuida no debe sobrepasar 30 m. Por el contrario, la distancia entre una barrera de cubas de agua concentrada y el primer grupo de cubas de una barrera distribuida, puede ser como máximo 105

m (30 m + 75 m) cuando se mida a través de entronques entre galerías o entronques individuales.

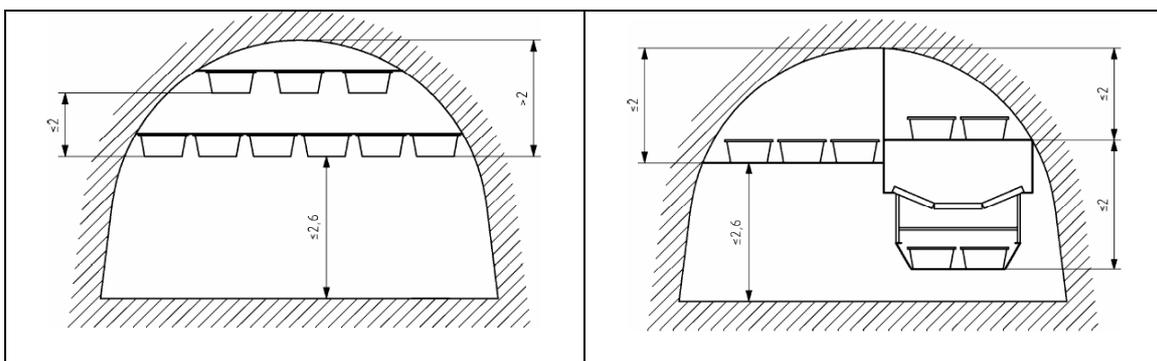
- Generalmente, las barreras de agua se instalan como barreras distribuidas, en las galerías de transporte así como en avances en capa mecanizados.
- Cuando no se estén llevando a cabo labores de arranque en la galería o tareas de arranque puntual mecanizado, las barreras de cubas de agua distribuidas se pueden reemplazar por barreras de cubas de agua concentradas, si se considera necesario para las actividades de transporte o similares.
- Cuando se utilizan las barreras de cubas de agua concentradas en operaciones de avance en galería, la distancia desde el frente de avance hasta la barrera de cubas de agua más próxima en la galería debe ser tan pequeña como sea posible. Esta distancia no debe sobrepasar 320 m, no obstante la primera barrera de cubas de agua se debe instalar para alcanzar la longitud de avance de la galería de 200 m.
- Cuando se utilizan las barreras distribuidas en operaciones de avance en galería, la distancia desde el frente de avance hasta el grupo de cubas más próximo en la galería debe ser tan pequeña como sea posible. Esta distancia no debe sobrepasar 120 m, no obstante el primer grupo de cubas se debe instalar para alcanzar la longitud de avance de la galería de 120 m. Como una variación de esto, la longitud de avance en la galería de transporte puede alcanzar 200 m antes de instalar la primera barrera de cubas de agua, con la condición de que esta última se diseñe como una barrera concentrada. En las galerías de transporte, la distancia entre la labor de extracción y la galería de transporte hasta el grupo de cubas más cercano, debe ser tan pequeña como las condiciones de operación lo permitan; esta distancia no debe sobrepasar 120 m en ningún caso.
- Cuando la longitud de avance de una galería de transporte no interconectada sea superior a 120 m, en este punto se instalarán las barreras de cubas de agua distribuidas. Además, la cantidad de agua de todos los grupos de cubas debe ser como mínimo de 200 l/m² de la sección transversal de la galería.
- Cuando la distancia entre el frente de avance y su entronque con la galería de transporte es inferior a 120 m durante la extracción del carbón normalmente se instala una barrera de cubas concentrada en el entronque o intersección con la galería de transporte. Esta barrera de

cubas de agua concentradas se pueden omitir cuando el modo de protección contra la explosión utilizada en la galería de capa de carbón principal está constituida por barreras de cubas de agua distribuidas.

- En caso de entronques entre galería de transporte y frente de ataque cuando la distancia es inferior a 120 m:
 - a) Si el frente de ataque está protegido por las barreras distribuidas y la distancia es menor de 120 m se puede omitir la instalación de la barrera concentrada en el entronque o intersección.
 - b) Si el frente de ataque está protegido por las barreras concentradas y la distancia es menor de 120 m no se puede omitir la instalación de la barrera concentrada en el entronque o intersección
- Cuando la distancia entre el frente de ataque y su entronque con la galería de transporte es inferior a 120 m durante la extracción del carbón, normalmente se instala una barrera de cubas concentrada en el entronque o intersección con la galería de transporte. Esta barrera de cubas de agua concentradas se pueden omitir cuando el modo de protección contra la explosión utilizada en la galería de capa de carbón principal está constituida por barreras de cubas de agua distribuidas. Esta capacidad de proporcionar la protección contra la explosión en tales casos debería tenerse en cuenta durante la planificación de frente de arranque de carbón y galería. Los requisitos mencionados anteriormente no son validos sí el frente de explotación está protegido por barreras de cubas de agua concentradas.

Debido a las condiciones locales se pueden reducir las distancias máximas mencionadas anteriormente.

En las figuras que se muestran a continuación se muestran ejemplos de disposiciones que ilustran las condiciones de instalación expuestas anteriormente.



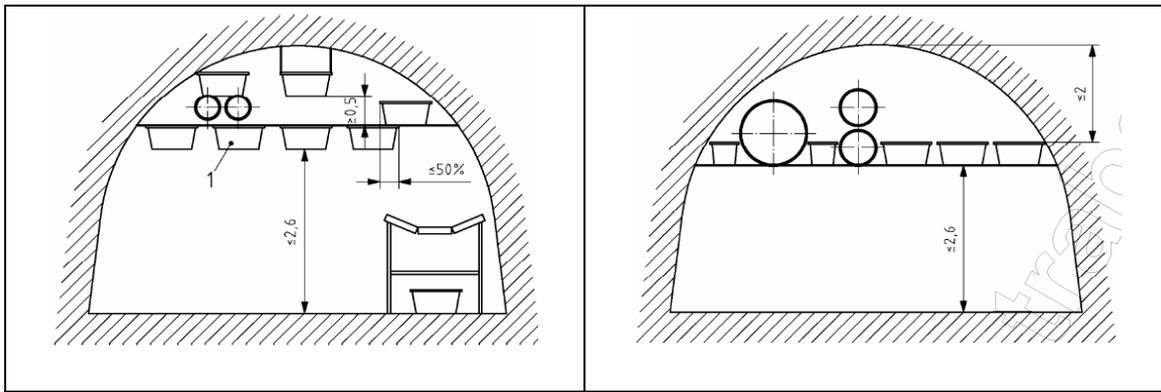


Figura C.3 Ubicación de las cubas de agua en una sección perpendicular de avance. Distancias verticales desde galería y entre cubas

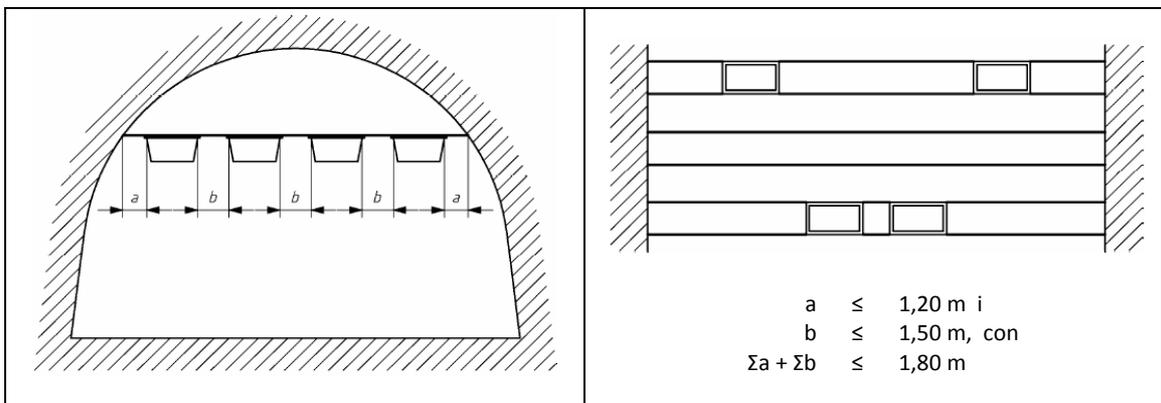


Figura C.4 Disposición de cubas de agua en la sección perpendicular. Distancias horizontales entre cubas

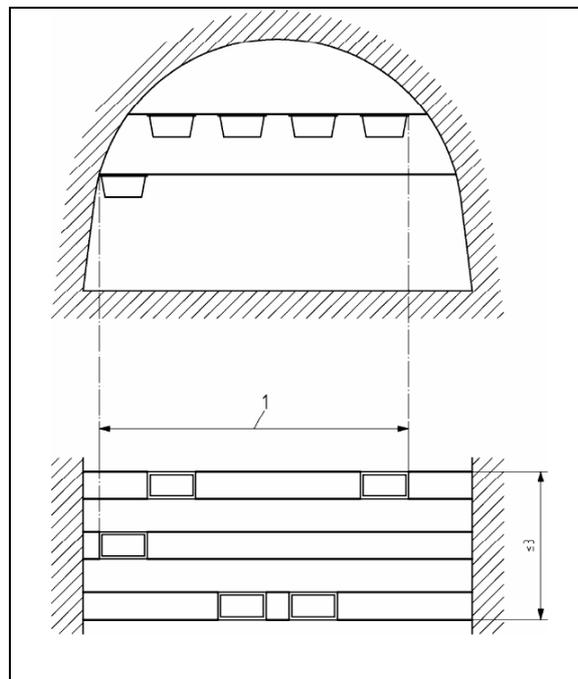


Figura C.5 Disposición de cubas de agua en la sección perpendicular. Distancia máxima horizontal de grupos

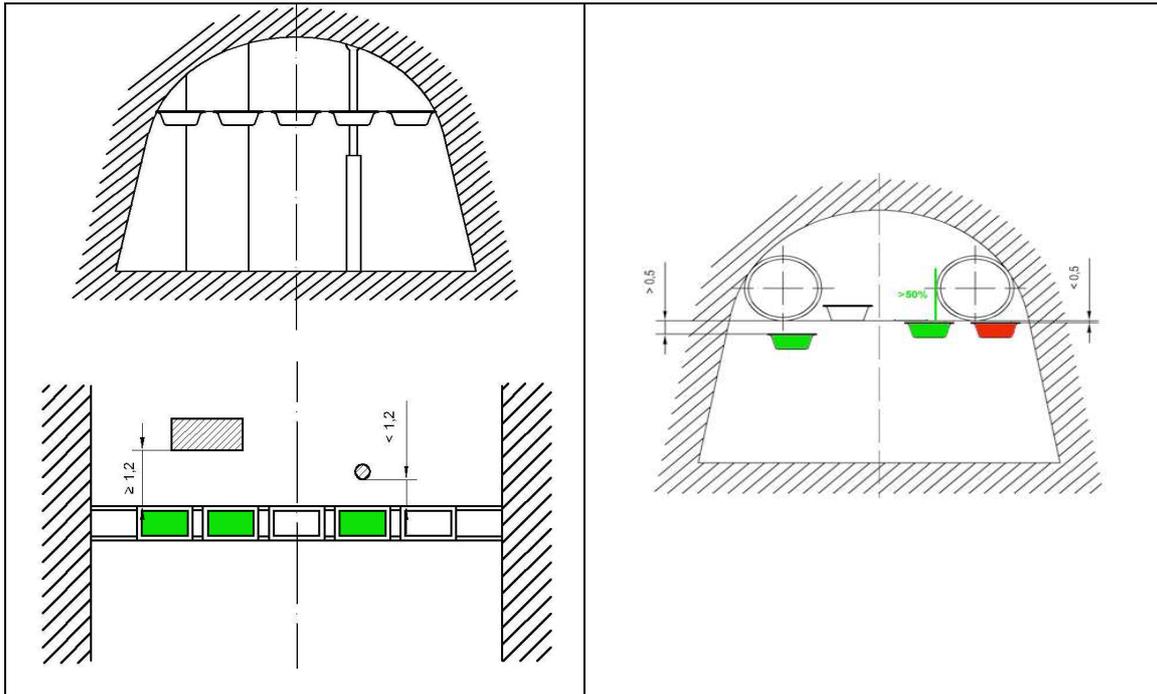


Figura C.7 Distancias a obstáculos

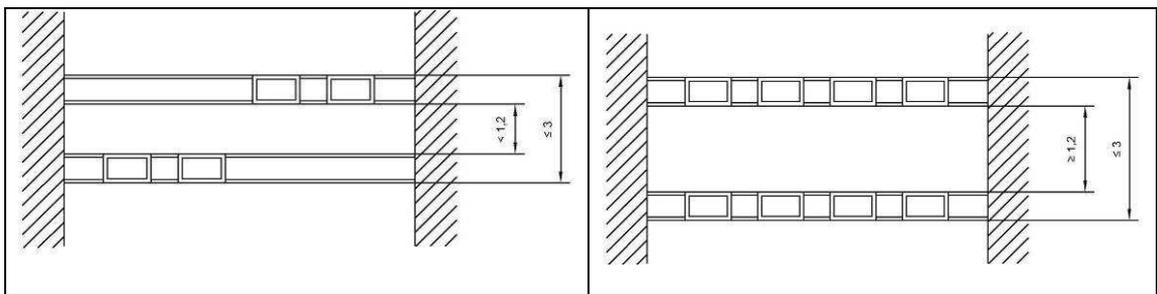


Figura C.8 Superposición entre filas de cubas de un grupo

La Norma UNE-EN 14591-2 admite dos tipos de suspensión de cubas de agua: sobre bastidores metálicos o apoyados sobre estanterías. El segundo tipo es más cómodo para usar.

Las cubas de agua deben suspenderse de acuerdo a la Norma UNE-EN 14591-2 sobre bastidores que deben soportar la carga debida al peso de las cubas y del agua que contienen. Si tomamos como ejemplo la instalación de una barrera concentrada de cubas de agua en una galería de 9 m² de sección, la cantidad mínima de agua que ésta debe incluir es de 1800 l, lo que nos da idea de la carga que deben soportar los bastidores.

La configuración más habitual de los bastidores consiste en dos vigas situadas en el eje perpendicular de la galería, con piezas transversales o traviesas para

dotar de rigidez a la estructura y con un estante sobre la estructura anterior. Los bastidores deben fijarse a las estructuras fijas de las galerías mediante soportes apropiados, utilizando, por ejemplo, cadenas, cables de acero o barras de suspensión. Los bastidores deben permitir que se apoyen las cubas sobre ellos en toda su base o, al menos, sobre la superficie de la base definida por sus lados más largos, o que las cubas se pueden construir donde es necesario usar los estantes.



Fotografía C.1. Barreras de cubas de agua dispuestas en el techo de las galerías

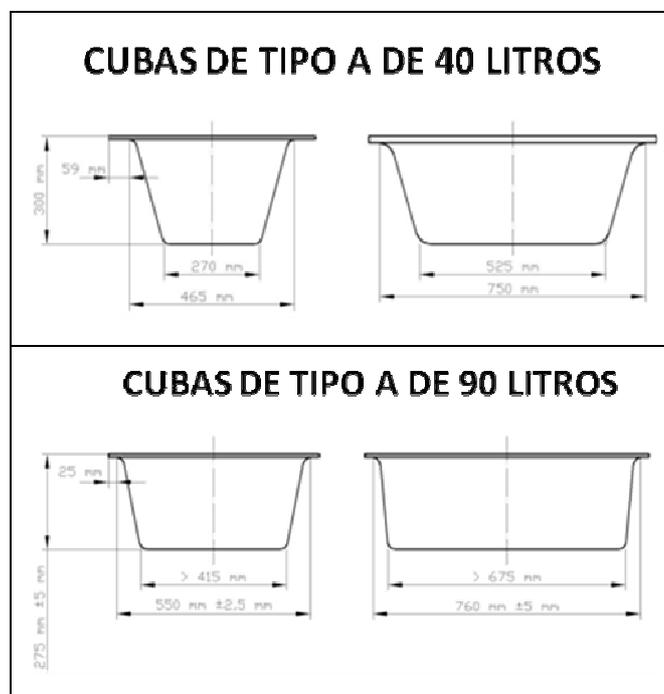


Figura C.9 Geometría de la cubas de tipo A para su instalación en bastidores

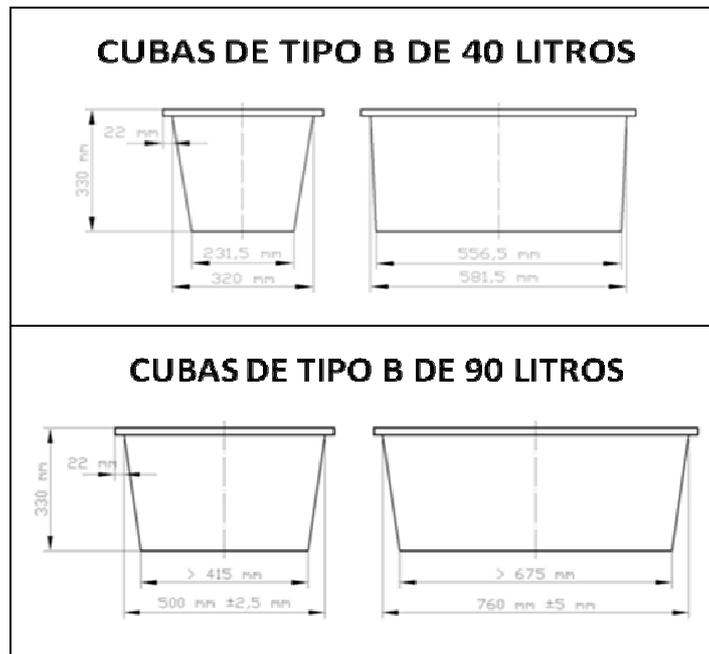


Figura C.10 Geometría de la cubas de tipo B para su instalación en estanterías

Los ejemplos de distribución de barreras de cubas de agua en la explotación minera se presentan en las Figuras siguientes.

La distancia entre las barreras de cubas de agua y las intersecciones o entronques debe ser tan pequeña como sea posible y no debe exceder 75 m en el caso de barreras de cubas de agua concentradas y 30 m en el caso de barreras de cubas de agua distribuidas (Figuras C.11 y C.12).

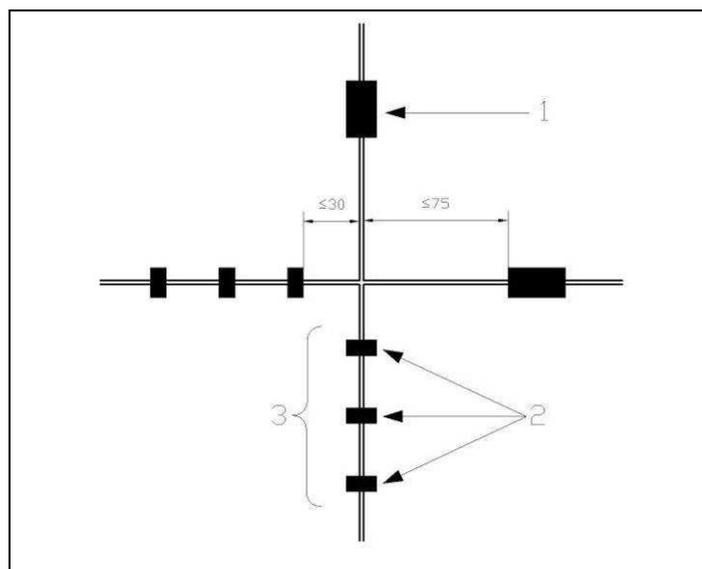


Figura C.11 Cordón de barreras en intersección de galerías

(1-Barrera concentrada, 3-Barrera distribuida, 2-Grupos de cubas)

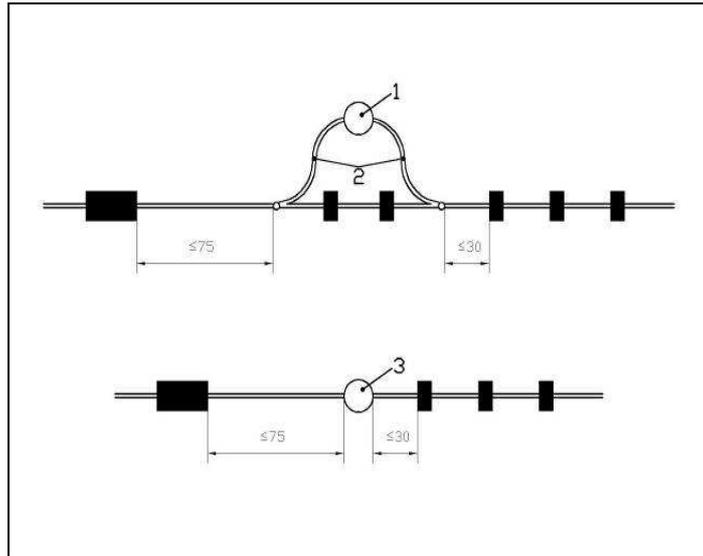


Figura C.12 Cordón de barreras en intersección de galerías con poca distancia entre ellas (1 – 3-Pozos verticales, 2- Galerías de acceso)

La distancia máxima de 75 m y 30 m respectivamente entre las intersecciones y entronques no se aplica, cuando la distancia entre barreras de cubas de agua concentradas adyacentes, utilizadas para aislar las zonas de intersección y entronque, es inferior a 200 m (Figuras C.13 y C.14).

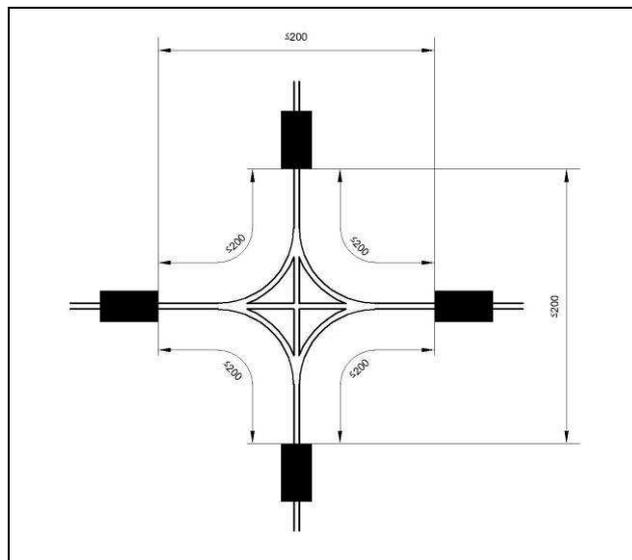


Figura C.13: Cordón de barreras para intersecciones de galerías con poca distancia entre ellas

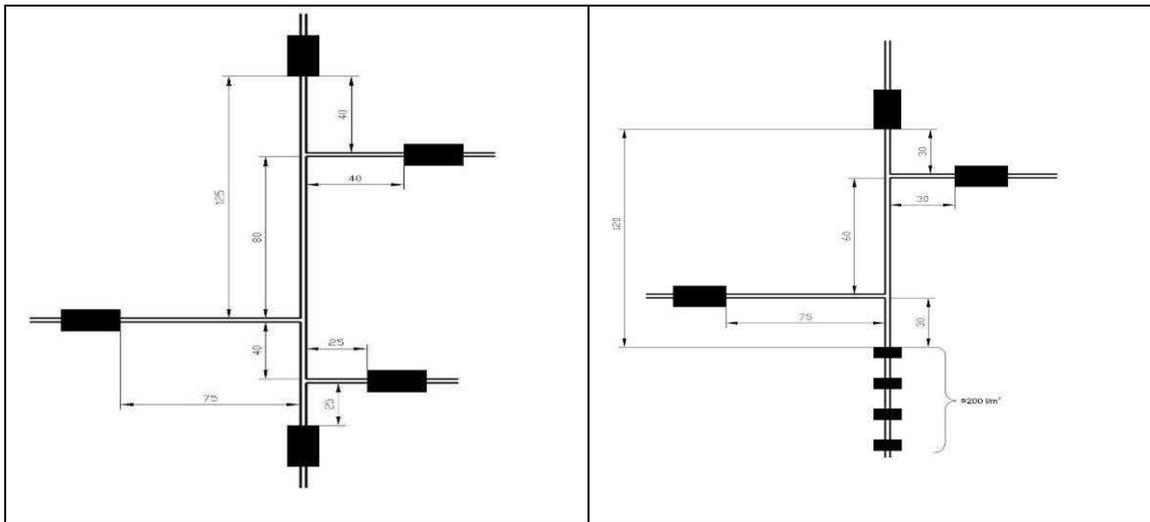


Figura C.14: Cordón de barreras para entronques con poca distancia entre ellos

Estas distancias no se aplican tampoco entre intersecciones y entronques con poca distancia entre ellas, cuando la distancia entre una barrera de cubas de agua repartida y una barrera adyacente concentrada o repartida, utilizada para acordonar la zona de la intersección y el entronque, es inferior a 120 m. En esta zona puede evitarse la instalación de barreras de cubas de agua. Esto significa que los puntos donde se cruzan las galerías con los pozos de acceso, pozos insertados o pozos interiores se considerarán como intersecciones o entronques. Los grupos de cubas de estas barreras de cubas de agua distribuidas deben contener al menos 200 l de agua por metro cuadrado de la sección transversal de la galería.

Las barreras de cubas de agua concentradas deben estar dispuestas en las galerías de tal manera que la distancia entre las barreras no debe superar a 400 m.

Las barreras de cubas de agua distribuidas deben estar dispuestas en las galerías de tal manera que la distancia entre las barreras no debe superar a 30 m.

Dentro de una galería, la distancia entre una barrera de cubas de agua concentrada y el primer grupo de cubas de una barrera de cubas de agua distribuidas no debe sobrepasar 30 m. Por el contrario, la distancia entre una barrera de cubas de agua concentrada y el primer grupo de cubas de una barrera distribuida, puede ser como máximo 105 m (30 m + 75 m) cuando se mide a través de entronques entre galerías o entronques individuales. (Figura C.15)

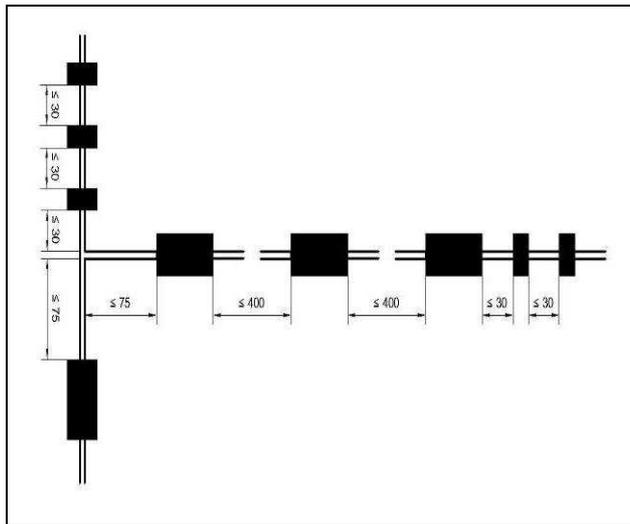
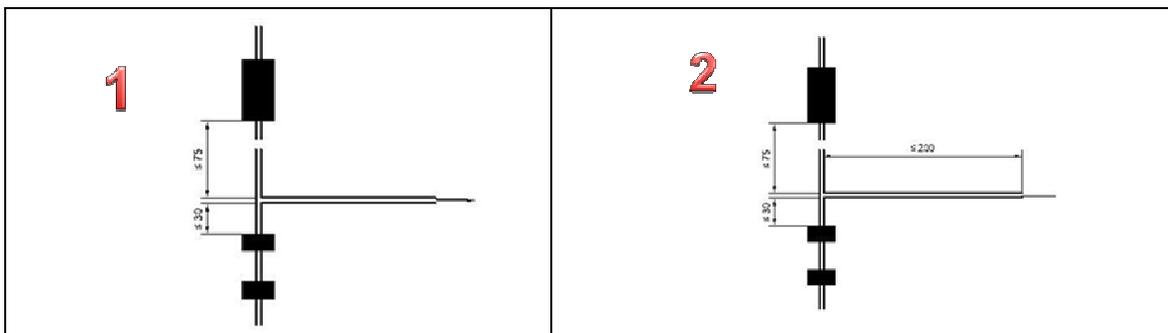


Figura C.15: Distancia para barreras de cubas de agua concentradas y distribuidas

Las barreras de agua se instalan normalmente como barreras distribuidas en las galerías de transporte así como en avances en capa mecanizados.

Cuando se utilizan las barreras de cubas de agua concentradas en operaciones de avance en galería, la distancia desde el frente de avance hasta la barrera de cubas de agua más próxima en la galería debe ser tan pequeña como sea posible. Esta distancia no debe sobrepasar los 320 m, no obstante la primera barrera de cubas de agua se debe instalar para alcanzar la longitud de avance de la galería de 200 m.

Las siguientes figuras muestran las distancias a mantener en la sucesiva instalación de barreras de agua concentrada a medida que se avanza en las labores.



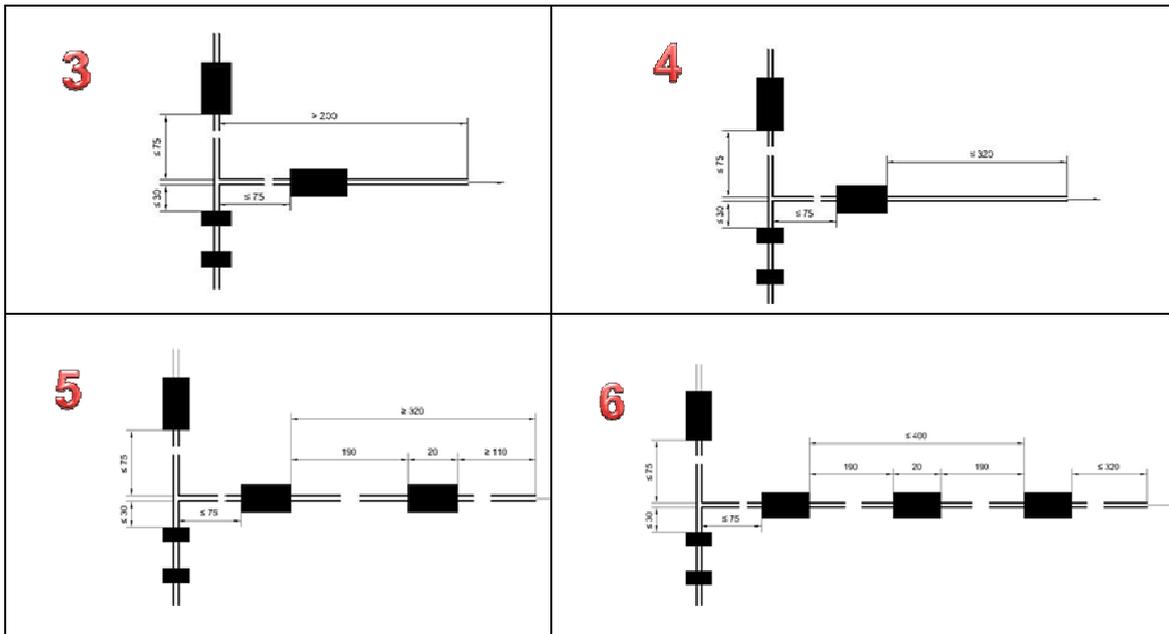


Figura C.16: Distancias entre barreras concentradas en el avance de galerías

Cuando se utilizan las barreras distribuidas en operaciones de avance en galería, la distancia desde el frente de avance hasta el grupo de cubas más próximo en la galería debe ser tan pequeña como sea posible.

Esta distancia no debe sobrepasar 120 m, no obstante el primer grupo de cubas se debe instalar para alcanzar la longitud de avance de la galería de 120 m.

En el caso de barreras de agua distribuidas las distancias a mantener durante la secuencia de avance se muestran en la figura C.17.

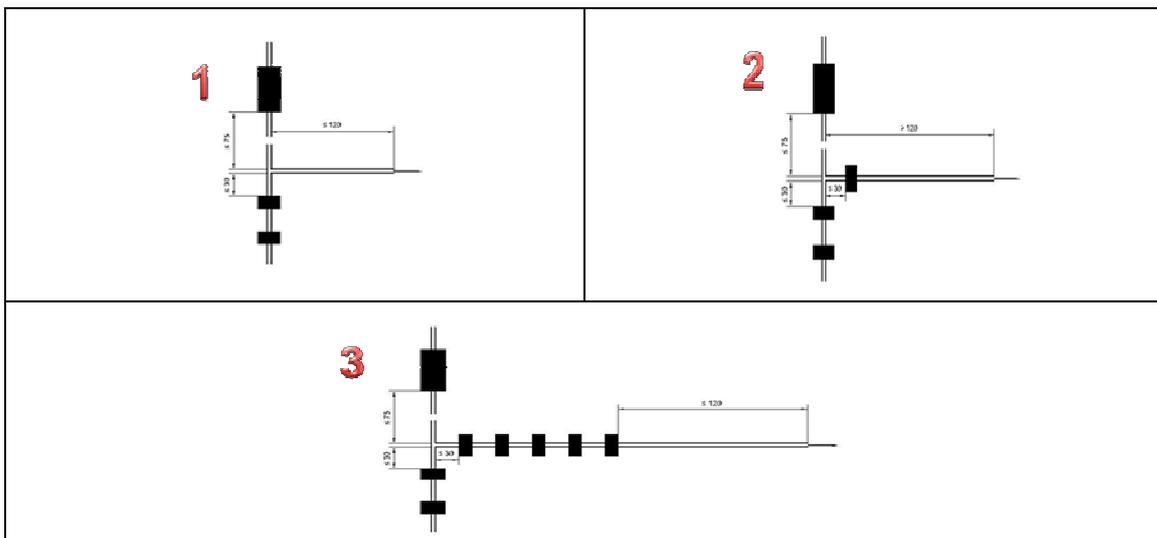


Figura C.17: Distancias entre barreras distribuidas en el avance de galerías

Como una variación de lo anterior, la longitud de avance en la galería de transporte puede alcanzar 200 m antes de instalar la primera barrera de cubas de agua, con la condición de que esta última se diseñe como una barrera concentrada (Figura C.18).

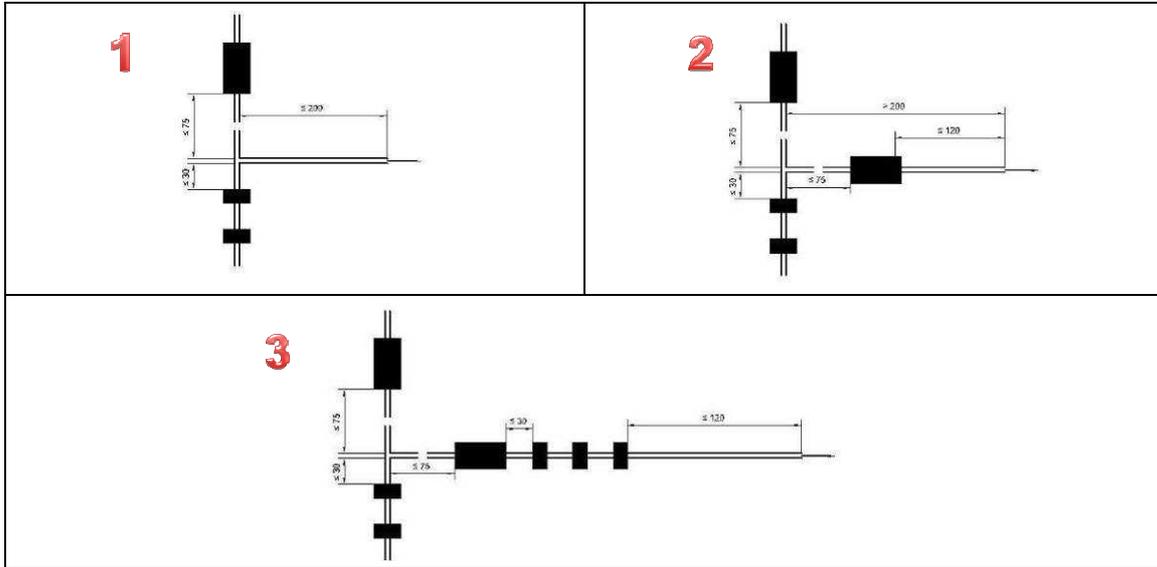


Figura C.18: Distancias entre barreras distribuidas en el avance de galerías con primera barrera concentrada

C.1.2.2 Condiciones de instalación según la regulación polaca vigente

De acuerdo con la regulación polaca [2] tanto las barreras de polvo de caliza como las de agua pueden utilizarse para prevenir la propagación de explosión de polvo de carbón. Normalmente, se protegen zonas como los frentes de arranque de carbón y las zonas con desprendimiento de grisú. Las barreras se instalan a una distancia de entre 60 y 200 m desde la situación estimada de la fuente de ignición.

En las figuras C.19 y C.20 se muestran dos posibles disposiciones de cubas en una sección perpendicular de una galería.

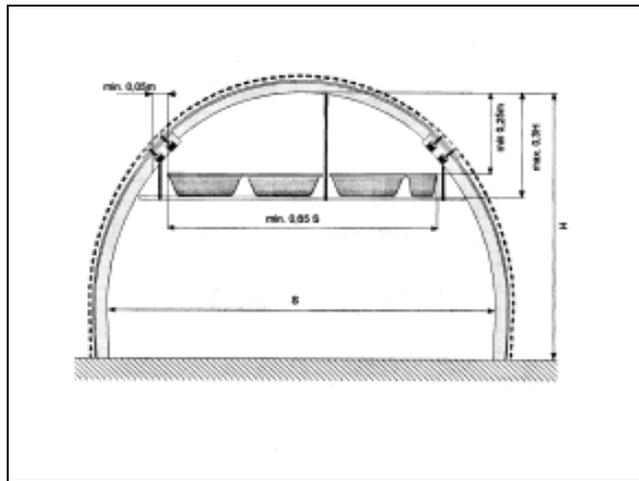


Figura C.19 Disposición de cubas de agua en una sección perpendicular de la galería de avance según la regulación polaca

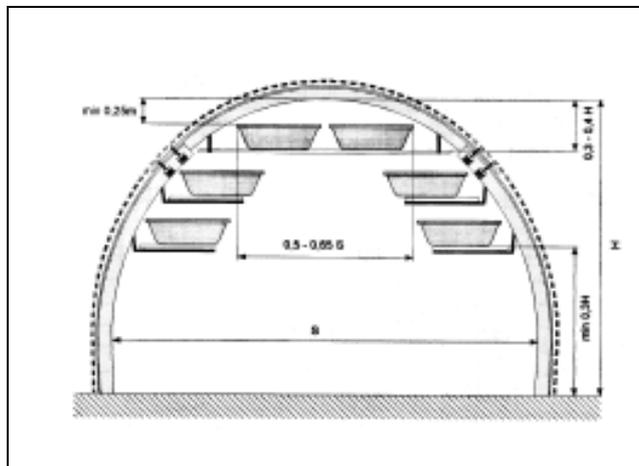


Figura C.20 Disposición lateral de cubas de agua en la sección perpendicular en la galería de avance según la regulación polaca

De acuerdo con la regulación polaca la longitud total de cubas en las filas debe ser mínimo $0,65 S$ (donde S es la anchura inferior de la galería de avance). La distancia entre las partes inferiores de las cubas y la parte superior de techo, H debe ser máximo de $0,3 H$.

En cuanto a los requisitos para las cubas de agua que se definen en la Norma UNE-EN 14591-2, en Polonia se utilizan las cubas de 40 litros. Todas las cubas deben cumplir con los requisitos y el marcado de acuerdo con la Norma UNE-EN 14591-2.

C.1.2.3 Las minas de carbón españolas y la implementación de las barreras pasivas de agua

Las minas de carbón españolas se caracterizan por las siguientes particularidades:

- La sección perpendicular relativamente pequeña (comparando con Alemania por ejemplo), raramente mayor de 12 m².
- El principal método de extracción de carbón es el de subniveles por sutiraje con utilización de explosivos.
- En cuanto a las propiedades del polvo de carbón: el contenido en volátiles es enormemente variable (el contenido en volátiles es el factor decisivo en la explosividad de polvos de tipo orgánico, incluido el polvo de carbón).
- La emisión de grisú de la capa principal no es muy grande.

Estos factores disminuyen el riesgo de explosión de polvo de carbón, pero la reducción del riesgo no es completa porque permanecen los emplazamientos peligrosos tales como el frente de arranque donde se realiza el disparo.

Teniendo todo esto en cuenta, puede decirse que la necesidad de instalar las barreras de agua en minas españolas es limitada siguiendo la filosofía de la norma UNE-EN 14591-2. Dicha filosofía supone cubrir la mina entera con barreras de agua concentradas y distribuidas y eso parece no tener mucho sentido en las minas de carbón españolas.

En general, y siempre previa evaluación del riesgo, se propone la instalación de las barreras en emplazamientos concretos, en los que si podrá existir el riesgo tales como:

- frente de arranque donde se realiza voladura,
- emplazamiento con frecuentes acumulaciones de grisú o polvo de carbón sin inertizar
- otros emplazamientos donde se está realizando la extracción del carbón

Las barreras pasivas, de tipo vuelco, son las de más sencillo diseño, siendo el mecanismo de activación muy simple. Esto presenta 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 del llama se convierte en un parámetro esencial, ya que la dispersión del polvo o del agua debe producir la extinción del frente de llama.

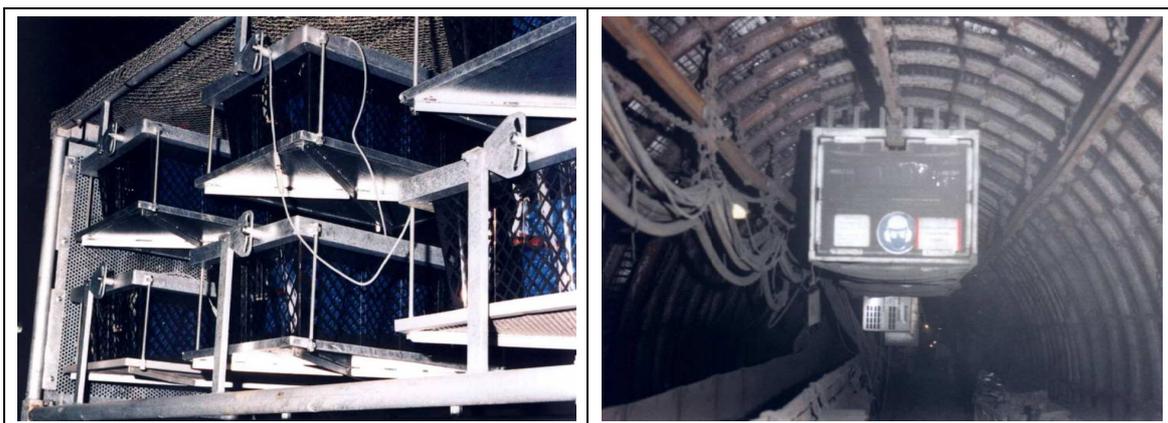
Las velocidades del frente de llama y del frente de presión pueden ser muy diferentes entre sí, además de variar considerablemente de unas explosiones a otras; se ha comprobado experimentalmente en galerías de ensayo que esas velocidades dependen, fundamentalmente de la composición del carbón, de su 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 [4].

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 agua [5].

C.1.3 Barreras activas

Para evitar los problemas de adecuada dispersión del agua en los casos de explosiones débiles se diseñaron las barreras activas o automáticas. Estas barreras 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, a la temperatura o a la luminosidad del frente de llama; de modo que se diseñan para que solo se produzca la activación cuando se supere un cierto umbral, evitando así disparos accidentales intempestivos [4].



Fotografía C.2 Barrera activa de cubas de agua SaarEx 2000

Existen diferentes barreras activas de disparo. El Órgano Permanente de la Comunidad Europea para la Seguridad y la Salud en las Minas [6] recomienda

cuatro modalidades diferentes.

C.1.3.1 Barrera de cilindro con agua (SMRE)

Una de ellas, diseñada en Gran Bretaña por el Safety in Mines Research (SMRE) consiste de 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 dispositivo, produciéndose la rotura de la válvula de retención del gas comprimido, de manera que este empuja violentamente al agua produciendo su dispersión en forma de cortina o pantalla, capaz de extinguir el frente de llama.

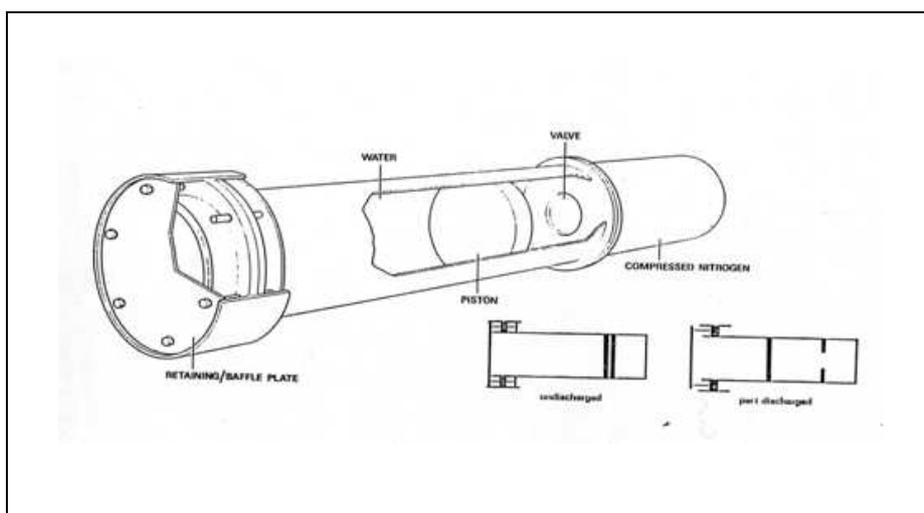


Figura C.21 Barrera de cilindro diseñada por el SMRE

C.1.3.2 Barrera activa de cubas de agua (Sistema Tremonia)

Estas barreras están diseñadas en Alemania. Están formadas por cubas de agua de PVC convencionales, dotadas de una pequeña carga explosiva con un sistema de ignición que se activa al recibir la señal procedente del elemento sensor. Existen sistemas altamente automatizadas 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.

C.1.3.3 Barrera de cilindros de plástico con agua (Sistema Belga)

Las denominadas barreras activas belgas conjugan automatismo con sencillez. Consisten en cilindros de PVC, con capacidad para unos 100 l 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.

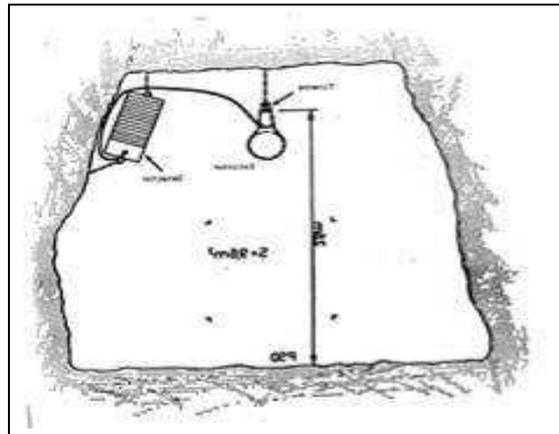


Figura C.22 Croquis de la barrera activa del sistema belga

Una de las grandes limitaciones de las barreras activas anteriormente descritas 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 y el punto donde la propagación resulta extinguida.

Se ha comprobado que en el frente de arranque es la zona donde, con mayor frecuencia, suelen iniciarse las explosiones. Y es precisamente en este punto, donde suelen estar permanentemente los operarios. Para evitar este inconveniente se ha diseñado el siguiente sistema.

C.1.3.4 Barrera de botellas de fosfato amónico (BVS))

Estas barreras fueron diseñadas en el Bergbau-Versuchsstrecke (BVS) organismo notificado alemán en la Directiva ATEX. Se trata de 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.

En la actualidad esta sistema ha sido ampliamente desarrollado lo que ha conducido a la publicación de la norma europea EN 14591-4 “Automatic extinguishing systems for road headers”.



Fotografía C.3 Sistema de extinción automática instalado en un minador

C.2 ESTRUCTURAS Y MEDIDAS CONSTRUCTIVAS DE PROTECCIÓN.

Para evitar los efectos de las explosiones otra de las medidas de protección lo constituyen las estructuras anti explosión como son las puertas resistentes a la presión de explosión.

En el caso de producirse una explosión, la llama puede resultar extinguida, en el mejor de los casos, en la zona donde está instalada la barrera. Esto ocasiona una reducción de la presión, pero la eliminación de la sobrepresión tiene lugar después de haber recorrido distancias que pueden llegar a ser varios kilómetros desde el punto donde se inicio la explosión.

Para evitar de forma definitiva los efectos de una explosión se pueden emplear compuertas, barreras de cierre activas o estructuras resistentes a la explosión consistentes en elementos de cierre robustos, tales como compuertas de tipo guillotina, puertas abatibles, etc., que permanecen abiertos durante las operación normales en las galerías de la mina, pero que se cierran automáticamente en caso de producirse una explosión. De esta forma, una parte de la mina queda herméticamente sellada, se proporciona un obstáculo insalvable a la onda de presión, que resulta amortiguada o extinguida, y se evita la propagación de explosión, ya que estas barreras están diseñadas para

soportar elevadas presiones dinámicas.

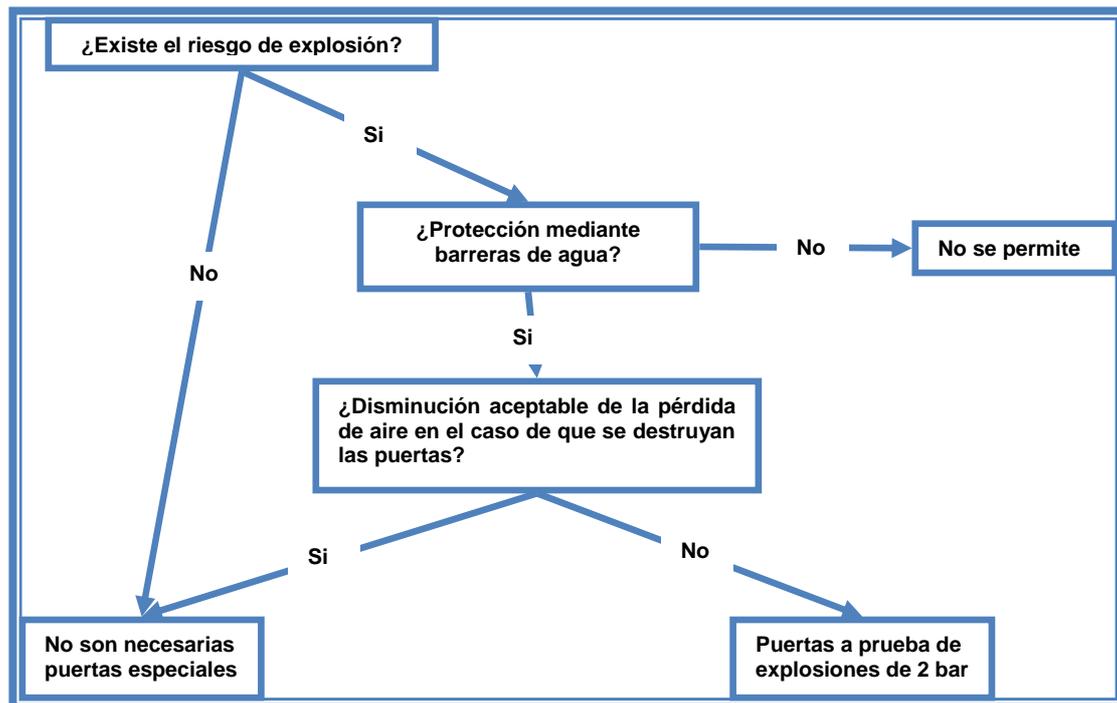


Figura C.23 Diagrama de decisión para la instalación de barreras de protección contra explosiones

La norma EN 14591-1 [7] define las características de las estructuras de ventilación (cuadros de cierre de aire y puertas de ventilación) que deben proporcionar el flujo adecuado de ventilación en el caso de que ocurra una explosión, de forma que se limiten los efectos de una explosión en el sistema de ventilación y se conserven las posibilidades de escape y de rescate.

Una estructura de ventilación para sobrepresiones de hasta 2 bar implica al menos un cuadro de cierre de aire, que corta la sección de la galería dejando aberturas para transporte, paso del personal, cintas transportadoras, cables y tuberías, así como aberturas necesarias para asegurara el flujo de aire requerido para la ventilación.

Los materiales y componentes empleados para los cuadros de cierre de aire deben ser incombustibles y estar aprobados para su uso en minería de interior, según las dimensiones definidas en la norma, de manera que se establecen los valores de la tabla C.1 para el espesor de las nervaduras entre la puerta de transporte y la puerta de paso de personal y otras fijaciones (figura C.24). Deben incrustarse en los hastiales con una profundidad mínima de 250 mm en todo su perímetro.

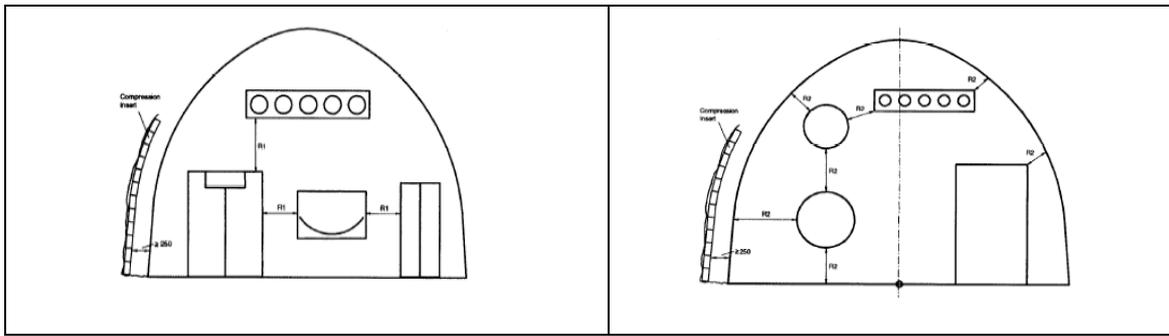


Figura C.24. Representación esquemática del espesor de las nervaduras R1 y R2 entre la puerta de transporte y la puerta de paso de personal y otras fijaciones.

Sección transversal de la galería m ²	Espesor de la nervadura	
	R ₁ mm	R ₂ mm
≤ 20	≥ 600	≥ 300
>20	≥ 600	≥ 500

Tabla C.1 Dimensiones del espesor de la nervadura en una estructura de ventilación a prueba de explosiones

Las puertas de ventilación pueden ser para paso de personal o para transporte, y deben resistir una sobrepresión de 2 bar. Se distingue entre las puertas de ventilación de alivio de presión (aquellas cuyas hojas se abren y cierran en direcciones contrarias) y las de no alivio de presión (abren normalmente contra la dirección del flujo de aire con dispositivos mecánicos para la apertura y el cierre). La figura C.25 representa puertas de ventilación para personal y para transporte.

Las líneas de control y las conexiones deben protegerse de los posibles efectos de una explosión. Los contactos de actuación deben diseñarse e instalarse de tal forma que no pueden ser accionados mediante la onda de presión de una explosión.

Cuando no sea posible determinar claramente la dirección de la explosión, deben instalarse puertas de ventilación a ambos lados del cuadro de cierre de aire (figura C.26).

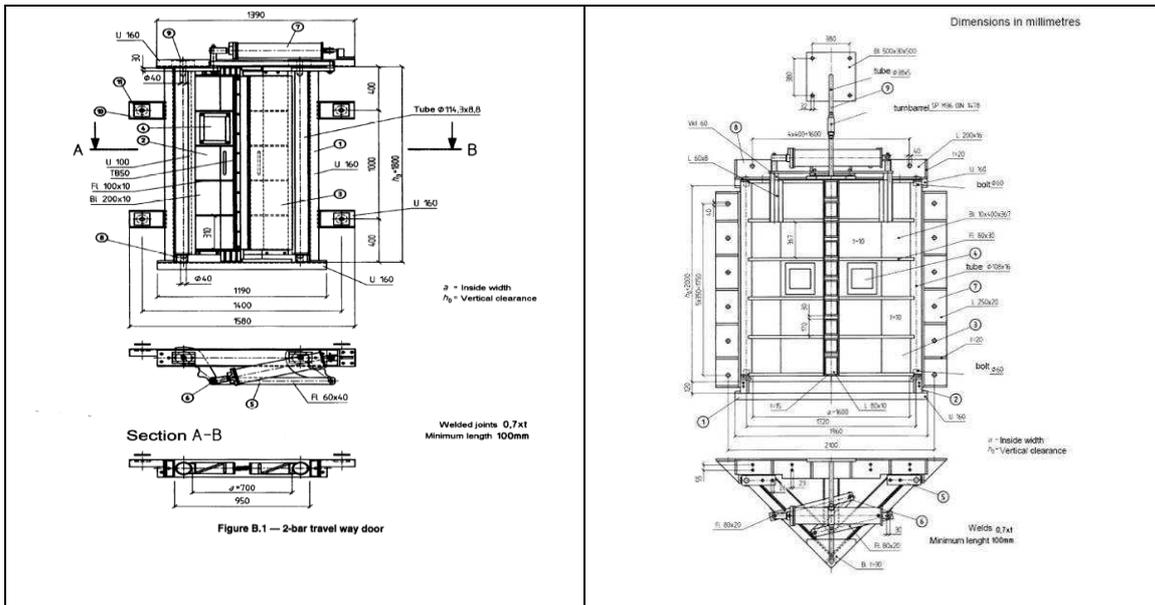


Figura C.25. Puertas de ventilación a prueba de explosión

Las puertas de ventilación, como sistemas de protección, deben marcarse de conformidad a la Directiva 94/9 CE, previo certificado CE de tipo y del control de la fabricación.

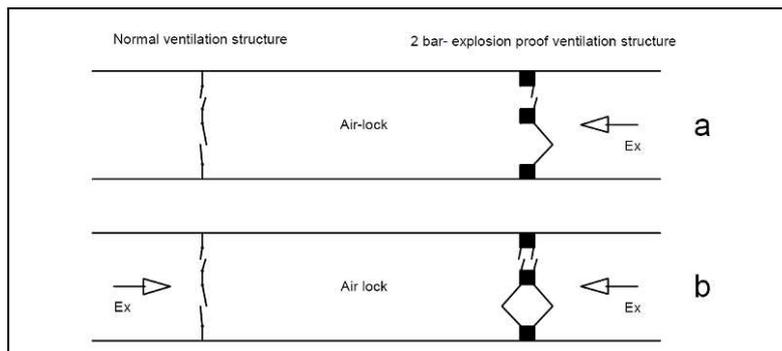


Figura C.26 Esquema de una estructura de ventilación a prueba de explosiones

BIBLIOGRAFÍA DEL BLOQUE C

- [1] Kazimierz Lebecki, *“Informe de aplicación de las barreras de cubas de agua a la minería española”* Jornada sobre aplicación de las barreras pasivas de agua a la minería española, Madrid, diciembre del 2008.
- [2] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w zakładach górniczych wydobywających kopaliny otworami wiertniczymi*
- [3] UNE-EN 14591-2, *“Prevención y protección contra las explosiones en minas subterráneas. Sistemas de protección. Parte 2: Barreras pasivas de cubas de agua”*
- [4] Javier Garcia Torrent, *“Revisión de medidas de protección contra explosiones en la minería subterránea de carbón”*, Canteras y explotaciones- Junio 1992.
- [5] Ensayos Mina Bárbara, Polonia, noviembre 2008
- [6] Commission de communautés Europeennes. Organe Permanent pour la sécurité et la salubrité dans les mines de houille et les autres industries extractives. *“Medidas relativas a reducir los riesgos de explosión y de incendio en las labores mineras con ventilación secundaria”*. 1989
- [7] UNE-EN 14591-1 *“Prevención y protección contra las explosiones en minas subterráneas. Sistemas de protección. Parte 1”*:
- [8] Garcia Torrent, J; Querol Aragón, E; Fernández Ramón *“Nuevas soluciones para atmosferas explosivas en minería”* Canteras y explotaciones, Nº 478, pp 30-47 (2007)

BLOQUE D: EJEMPLO DE APLICACIÓN

A continuación se propone un ejemplo de cómo podría desarrollarse la planificación para la Prevención contra la Propagación de Explosiones por Polvo de Carbón en una explotación de minería subterránea.

El proceso de explotación minero es continuamente cambiante y esto supone que las condiciones son variables y por tanto la evaluación de las condiciones de peligrosidad debe ser actualizada de forma periódica.

El ejemplo que se expone a continuación se aplicará a una determinada labor desarrollada mediante subniveles por sutiraje, por lo que la evaluación de riesgos se aplicará a esta zona de la explotación.

Las fases generales que debería comprender una correcta planificación deberían ser las siguientes:

- 1) Descripción de procedimiento de explotación
- 2) Evaluación del riesgo de propagación por polvo de carbón.
- 3) Diseño e implantación de las Medidas a adoptar.
- 4) Verificación y Control periódico.

1) Descripción del procedimiento de explotación: Explotación por sutiraje con subniveles

El método consiste en el trazado de galerías o subniveles en capa, prácticamente horizontales, distanciados en altura según las características del carbón y buzamiento de la capa, para posteriormente realizar el sutiraje en retirada. El carbón de la corona se disgrega mediante disparo con explosivo de seguridad, y después se recupera por sutiraje sobre un transportador blindado a través de aberturas practicadas en la guarnición del sostenimiento. En esta fase, el frente se desplaza hacia la entrada del nivel; los huecos de la explotación se hunden. El acceso a los niveles se hace mediante recortes a la capa, a una distancia de unos 20 metros. El avance de los niveles, se inicia a partir de los recortes en dos sentidos (dos ramas en fondo de saco). El plano tiene ventilación primaria y está situado entre dos plantas.

➤ Construcción del plano

Para la explotación de la capa por el método de sutiraje con subniveles es necesaria la construcción de un plano en roca al muro de la capa, entre las dos plantas. Su construcción comprende la ejecución ascendente del plano mediante explosivos hasta la sección correspondiente a cuadro metálico 2UA

(9 m²), fortificada con perfil tipo THN. Su longitud es de 120 metros con 40° de pendiente. Además se realizarán cinco recortes horizontales desde este plano a la capa, de la misma sección y tipo de fortificación. Al tiempo que se realiza la excavación ascendente, y unos metros por detrás se procede al equipado del pozo, consistente en la división del mismo en tres zonas:

- La primera de 1,00 metro de ancho hasta el hastial más cercano a la capa, sirve para el transporte, del carbón por gravedad. Está cubierta por chapas en el suelo y en el lateral.
- Otra zona de 1,00 metro en el hastial opuesto, para circulación de personal, equipada con peldaños y pasamanos de madera.
- La zona central para transporte de materiales y colocación de tuberías de ventilación.

Estas tres zonas se dividen por perfiles rectos THN, arriostrados con dos tresillones por perfil. Desde el plano se realizarán recortes a la capa, empleando para su ejecución pala neumática o escrapper. En el hastial del plano opuesto a los recortes de acceso a capa se ejecutarán otros dos recortes de 5 metros de longitud que servirán como lugar para ubicar cofres y equipos eléctricos (nichos).

➤ **Explotación**

Los paneles de explotación están definidos por la altura total, la altura entre subniveles (llave de carbón) y la longitud de los mismos. La altura del panel en esta zona es de unos 93 metros, y el buzamiento medio de la capa es de aproximadamente 61°. Este panel se explota con cinco subniveles a intervalos aproximadamente iguales, la altura de llave será de unos 18 metros. La longitud de los niveles sobre la capa es de unos 225 metros entre ambos sentidos, este y oeste. El avance del nivel se realizará con minador guiando la capa a nivel con pendiente ligeramente ascendente, a una distancia de posteo de 1,10 metros, y en sección normalizada 2UA (9 m²). El avance de los recortes se realizará mediante voladura y escrapper. Se determinará al menos una concentración de gas en capa para cada subnivel.

El deshulle se realizará por el método normal de subniveles, disparando una corona de tiros dispuestos en abanico y abriendo la guarnición del sostenimiento. La perforación de los barrenos se realizará con máquinas perforadoras neumáticas con o sin columnas de sujeción, y barrenas helicoidales empalmables. El explosivo a utilizar será de seguridad N° 20 S.R. con una densidad lineal de carga de hasta 1 kg/m de barreno, en cartuchos de 0,032 metros de diámetro, empleo de cordón detonante antigrisú a lo largo de

todo el barreno, excepto en la zona de retacado, tubos omega para facilitar la carga, espaciado del explosivo y empleo de dos detonadores instantáneos, uno al principio y otro al final del cordón detonante, dentro de cada barreno.

➤ **Transporte de carbón y de material**

En los subniveles y recortes, el transporte de carbón se hace mediante transportador blindado. En los niveles, los páncer de nivel vierten el carbón a otro páncer de 0,5 metros de ancho situado en el recorte, que a su vez vierte el carbón sobre el chapeo instalado en el plano en roca, que lo conduce por gravedad a la planta base, la cual forma parte del circuito general de extracción de carbón en plantas nuevas.

El transporte de material se realiza mediante un contenedor (canoas) movido por un cable y cabrestante de accionamiento neumático, para poder desplazar por el plano los equipos (reductores, motores, cofres, etc.).

2) Evaluación del riesgo de propagación por polvo de carbón

Toma de muestras de polvo

Para una correcta evaluación del riesgo se toman muestras tanto de roza como de tipo natural en distintos puntos en la zona de estudio según la siguiente planificación:

PUNTO DE MUESTREO	MUESTRA DE ROZA	MUESTRA NATURAL
GALERIA DE AVANCE 10 m DEL FRENTE	SI (HASTIAL) - R1	SI (DEPOSITO SUELO) – N1
GALERIA DE AVANCE 10 m ANTES DEL RECORTE	SI (HASTIAL) - R2	SI (DEPOSITO SUELO) – N2
PUNTO INTERMEDIO DEL RECORTE	SI (HASTIAL) -R3	SI (DEPOSITO SUELO) – N3

Para cada una de las muestras se realiza la caracterización granulométrica para obtener una serie de granulometrías características que son las que serán clasificadas y ensayadas, tanto en las “muestras de roza” como en las “muestras naturales”.

Los ensayos que se realizan para determinar los parámetros necesarios para la evaluación del riesgo de propagación son los siguientes:

- Análisis elemental e inmediato
- Temperatura mínima de inflamación en capa

- Temperatura mínima de inflamación en nube
- Límite inferior de explosividad
- Energía mínima de inflamación
- Presión máxima de explosión
- Constante característica del producto

(La evaluación debería efectuarse para la granulometría característica cada una de las muestras tomadas, a continuación se expone un ejemplo de la evaluación para una muestra)

Cálculo del Índice Químico (IQ)

Los resultados del análisis químico elemental e inmediato de la muestra N1 son los siguientes:

PARAMETRO	%
HUMEDAD	1,39
CENIZAS	46,90
VOLÁTILES	21,09
AZUFRE	0,66
CARBONO	40,39
HIDRÓGENO	3,26
NITRÓGENO	1,03

Por tanto la cantidad en volátiles en base seca exenta de cenizas (VSSC) es de 21,09%.

Por tanto y según la tabla A.5 tenemos un Índice Químico $IQ = 2$.

Tabla A.5 Determinación del Índice Químico a partir de la volatilidad del carbón

ÍNDICE QUÍMICO (IQ)	Contenido en Materias Volátiles en base seca exenta de cenizas (VSSC)
IQ = 0	$VSSC < 9 \%$
IQ = 1	$9 \% \leq VSSC \leq 14 \%$
IQ = 2	$14 \% \geq VSSC$

Cálculo del Índice Físico (IF)

El análisis de los parámetros de explosión de la muestra N1 ofrece los siguientes resultados:

PARÁMETRO	RESULTADO
TMI_c	>400 °C
TMI_n	630 °C
LIE	30 g/m ³
EMI	>1000 mJ
P_{max}	6,2 bar g
K_{max}	90 bar.m/s

El índice físico tiene en cuenta las características de la sensibilidad a la inflamación del carbón (SI) y su severidad de explosión (SE).

La sensibilidad a la inflamación se evalúa en función de los valores obtenidos en la determinación de los parámetros temperatura mínima de ignición en nube (TMI_n), límite inferior de explosividad (LIE) y energía mínima de ignición (EMI), conforme al siguiente criterio (tabla A.6).

Tabla A.6 Determinación de la Sensibilidad a la Inflamación

SENSIBILIDAD A LA INFLAMACIÓN (SI = T + C + E)	
TMI_n > 500 °C	T = 0
TMI_n ≤ 500 °C	T = 1
LIE > 150 g/m³	C = 0
LIE ≤ 150 g/m³	C = 1
EMI > 100 mJ	E = 0
EMI ≤ 100 mJ	E = 1

Por tanto la muestra N1 tiene una **Sensibilidad a la Inflamación SI = 1**.

La severidad de explosión (SE) se evalúa en función de la constante característica $K_{m\acute{a}x}$, según el siguiente criterio (tabla A.7).

Tabla A.7 Determinación de la Severidad de explosión

SEVERIDAD DE EXPLOSIÓN (SE)	
$K_{m\acute{a}x} < 20 \text{ bar m/s}$	SE = 0
$20 \text{ bar m/s} \leq K_{m\acute{a}x} < 100 \text{ bar m/s}$	SE = 1
$100 \text{ bar m/s} \leq K_{m\acute{a}x} < 200 \text{ bar m/s}$	SE = 2
$200 \text{ bar m/s} \leq K_{m\acute{a}x}$	SE = 3

Por tanto la muestra N1 tiene una **Severidad de Explosión SE = 1**.

En función de SI y SE se valora el índice físico (IF) (tabla A.8).

Tabla A.8 Determinación del Índice Físico

ÍNDICE FÍSICO (IF)	Función de la suma entre la Sensibilidad a la inflamación y la Severidad de Explosión (SI + SE)
IF = 0	$(SI + SE) = 0$
IF = 1	$0 < (SI + SE) \leq 3$
IF = 2	$3 < (SI + SE) \leq 6$

Por tanto para la muestra N1: $SI + SE = 2$.

Por lo que la muestra N1 tiene un **Índice Físico IF = 1**.

Nivel de explosividad

El nivel de explosividad de la muestra N1 se corresponde según lo indicado en el apartado A.3.1.1 de esta guía con una **explosividad media**, ya que el índice químico (IQ) es igual a 2 y además el índice físico (IF) es menor o igual que 1.

Probabilidad de presencia de atmósferas explosivas de polvo

Según lo expuesto en el apartado A.3.1.2 de esta guía y en función de los datos de partida expuestos en este ejemplo sobre las condiciones de explotación en el lugar en el que se realiza la evaluación del riesgo se obtienen los siguientes resultados:

a) Tipo y clase de emplazamiento

Por tratarse de una labor de avance en carbón mediante arranque con explosivos se asigna 2 puntos.

b) Acumulaciones de polvo

Solamente en los lugares de trabajo donde se emplea la limpieza y mantenimiento, las acumulaciones de polvo no superan los 5 mm. En nuestro caso práctico se aplica un plan de limpieza y mantenimiento por lo que se asignan 0 puntos.

c) Condiciones del polvo de carbón

La humedad condiciona la dispersabilidad del polvo, la muestra N1 tiene un porcentaje de humedad del 1,39% por lo que se asignan 2 puntos.

d) Presencia de grisú

Adicionalmente existe presencia de grisú por lo que se asigna 1 punto.

La suma de los cuatro parámetros anteriores es de 5 puntos por lo que según lo expuesto en el apartado A.3.1.2 de esta guía la **probabilidad** de presencia de atmósferas explosivas de polvo de carbón es **media**.

Probabilidad de propagación de explosiones de polvo de carbón

La probabilidad de propagación se obtendrá finalmente aplicando la tabla A.9, una vez se ha calculado la explosividad del carbón y evaluado la probabilidad de presencia de atmósferas explosivas de polvo de carbón para la muestra N1.

Por tanto, la probabilidad resultante es OCASIONAL.

PROBABILIDAD DE PRESENCIA DE ATMÓSFERA EXPOSIVA DE POLVO DE CARBÓN	EXPLOSIVIDAD DEL CARBÓN		
	BAJA	MEDIA	ALTA
BAJA	IMPROBABLE	REMOTA	OCASIONAL
MEDIA	REMOTA	OCASIONAL	PROBABLE
ALTA	OCASIONAL	PROBABLE	FRECUENTE

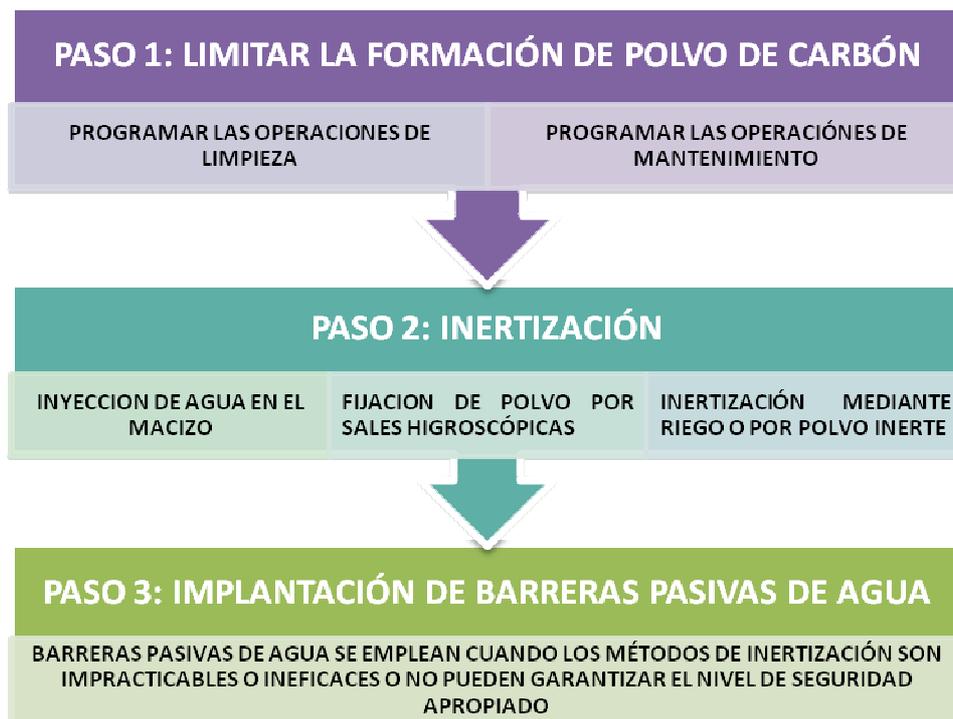
Tabla A.9. Determinación de la probabilidad de propagación para la muestra N1

Medidas de actuación

En función del riesgo deben establecerse y priorizarse las medidas de actuación a implantar. Igualmente deberán establecerse los periodos de revisión y control de las medidas implantadas.

A continuación se desarrollará el diseño de las medias que comprenden

inertización o implantación de barreras pasivas de agua o ambas medidas a la vez.



Pasos sucesivos en la implantación de medidas de prevención y protección

La metodología para la implantación de estas medidas así como los procedimientos para su mantenimiento y control se han descrito en los capítulos anteriores.

La lucha contra una posible propagación de explosiones de polvo de carbón consiste en eliminar uno, y a ser posible, varios de los factores que permiten que esta propagación se produzca.

Antes de describir algunas particularidades de las medidas de prevención y protección contra las explosiones de polvo en minas de carbón, es muy importante destacar las fases lógicas que deben seguirse a la hora de adoptar una serie de medidas de seguridad.

Se establecen una serie de sucesivos pasos de defensa contra la propagación de explosión al polvo de carbón encaminados para impedir que se cumpla el escenario favorable de desarrollo de una explosión de polvo de carbón.

Se recomiendan los siguientes pasos:

- En el primer paso se limita la formación de polvo de carbón, empleando medidas para reducir las acumulaciones de polvos inflamables y proceder a su eliminación. Esto implica mantenimiento continuo

especialmente en planos inclinados, puntos de carga y transporte.

- En el segundo paso se puede prevenir la dispersabilidad de polvo de carbón y formación de una nube de polvo en suspensión mediante diferentes técnicas tales como: inyección en capa, fijación por sales higroscópicas, inertización mediante riego o por polvos inertes.
- En el tercer paso se protegen y aíslan las zonas de producción del resto de la mina de la propagación de una explosión primaria al polvo de carbón. Esto se puede conseguir mediante instalación de barreras pasivas de agua inertización de material incombustible que al mezclarse con el polvo de carbón inflamable reduce su riesgo de ignición

PLANIFICACIÓN DE LAS MEDIDAS DE ACTUACIÓN

INERTIZACIÓN

Calculo de la cantidad de agente inertizante necesario

Por tratarse de frentes de avance con explosivos el grado teórico de inertización se calculara de acuerdo con las expresiones (3) y (4) (véase el apartado B.3 del Anexo I). Con una periodicidad de inertización de al menos una vez al mes.

A continuación se muestra el cálculo de la masa de polvo inerte necesaria para mantener un grado de índice necesario en la muestra N1 evaluada en el presente ejemplo, con un contenido de humedad de 1,39% y un contenido en cenizas del 46,90 %, y en volátiles de 21,09%.

$$VC12 = - 3,05 + 0,052C - 0,039H + 0,041S - 0,012W + 0,064A - 0,057V \quad (3)$$

$$VC12 = - 3,05 + 0,052 \times 40,39 - 0,039 \times 3,26 + 0,041 \times 0,66 - 0,012 \times 1,39 + 0,064 \times 46,90 - 0,057 \times 21,09$$

$$VC12 = 0,73$$

$$Z = (100 VC12 - 170) / (VC12 - 3,35) \quad (4)$$

$$(100 \times 0,73 - 170) / (0,73 - 3,35) = 37,0\%$$

$$Z = 37\%$$

Mediante la fórmula desarrollada por Michelis, et al. 1987 [1] se puede calcular la cantidad de polvo inerte (kg) necesario para inertizar por ejemplo, 10 kg de polvo de carbón acumulado. Inicialmente se calcula la masa total en kilogramos, necesaria para alcanzar el porcentaje de 37% de polvo inerte calculado (la muestra N1), mediante la siguiente expresión:

$$\text{masa total de mezcla (kg)} = \frac{\text{masa de polvo de carbón}}{\left[1 - \frac{\% \text{ polvo inerte}}{100}\right]} \quad (6)$$

$$\text{masa total de mezcla} = \frac{10 \text{ kg}}{\left[1 - \frac{37}{100}\right]} = 15,9 \text{ kg}$$

por tanto, la cantidad de polvo inerte que se requiere para inertizar 10 kg de polvo de carbón es:

$$\begin{aligned} \text{Masa de polvo inerte} &= \text{masa total de mezcla} - \text{masa de polvo de carbón} \\ &= 15,9 - 10 \text{ kg} = 5,9 \text{ kg} \end{aligned}$$

Requisitos relativos a la instalación de las barreras pasiva de cubas de agua.

En la minería española cuyas galerías son de secciones reducidas pueden surgir importantes dificultades a la hora de aplicar los requisitos de la norma UNE-EN 14591-2 debido que la configuración de las barreras puede ser afectada por falta de espacio o por una longitud insuficiente, llevando la instalación de barreras en contradicción con los principios establecidos en la mencionada norma. En estas condiciones, puede reducirse la cantidad de agua por metro cuadrado de sección siempre y cuando se aplican las medidas preventivas de captación o fijación de polvo de carbón. La reducción de la cantidad de agua no debe ser inferior a la cantidad de agua empleada en los ensayos de Polonia [4] que han demostrado la eficacia de barreras de cubas de agua con una concentración de 112 litros de agua por m² de sección en vez de 200 l/ m², el valor establecido en la norma UNE-EN 15491-2.

Vigilancia y verificación

El plan de vigilancia de las barreras pasivas de cubas de agua debe asegurar la conformidad con el conjunto de los requisitos y los principios expuestos en la Norma UNE-EN 14591 de todos los componentes de barreras pasivas. También, debe apreciar cuantitativamente el cumplimiento mediante comprobaciones periódicas.

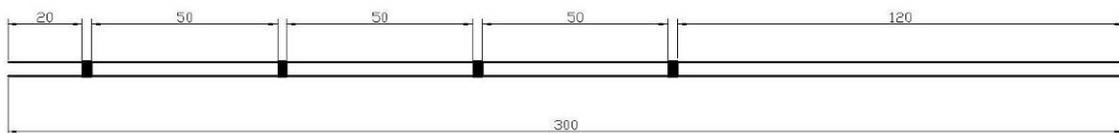
Además, la frecuencia de las verificaciones debe ser fija de manera que se garanticen los intervalos de verificación periódica que no deben exceder:

- un mes en las áreas que engloban las labores de arranque;
- tres meses en otras galerías.

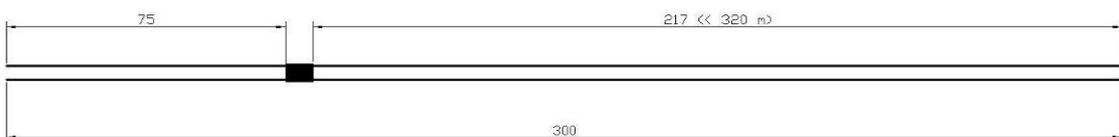
INSTALACIÓN DE BARRERAS DE CUBAS DE AGUA

Distancia hasta intersecciones

- La distancia entre Barrera Distribuida (*BD*) e intersección es:
 - $d < 30$ m, en el caso de galería de sección mayor de 10 m^2 ,
 - $d < 50$ m en el caso de galería de sección menor de 10 m^2 .



- La distancia entre una Barrera Concentrada (*BC*) e intersección es:
 - $d < 75$ m



Distancias en galería según actividad

Avances (Distancia del Frente a la Barrera)

- *BC*: $d \leq 320$ m pero cuando avance $d = 200$ m se instala la primera a la distancia adecuada según el entronque o intersección.
- *BD*: $d \leq 120$ m pero cuando avance $= 120$ m se instala el primer grupo a la distancia adecuada según el entronque o intersección.
- Galería en producción de avance $d < 120$ m → *BC* en el entronque (lo normal) o protección del frente mediante *BC* o *BD*

Galerías de transporte

- *BC*: $d = 200$ m → se instala la primera barrera (Tras la interpretación de los ejemplos, se aplica también a la distancia máxima entre *BC* cuando la distancia de la *BC* al frente ≥ 320 m)
- *BD*: $d \leq 120$ m → se instala el primer grupo de barreras con al menos 200 l/m^2 por grupo.

Dimensionamiento de las barreras necesarias

La siguiente tabla muestra los cálculos de dimensionamiento de las barreras de cubas de agua necesarias en función de la sección de la galería en la que van a ser instaladas.

Los cálculos han sido realizados en función de las dos condiciones básicas impuestas en la norma EN 14591-2:

- Barreras concentradas: 200 l/m^2 de sección transversal
- Grupo de barreras distribuidas: 1 l/m^3 de volumen de galería abarcado por el grupo.

A Sección (m ²)	BARRERAS CONCENTRADAS			BARRERAS DISTRIBUIDAS			
	Q Cantidad de agua (l)	Nº cubas 40 l	Nº cubas 90 l	Distancia grupos (m)	Cantidad de agua (l)	Nº cubas 40 l	Nº cubas 90 l
4	800	20	8,9	50	200	5	2,2
5	1000	25	11,1	50	250	6,25	2,8
6	1200	30	13,3	50	300	7,5	3,3
7	1400	35	15,6	50	350	8,75	3,9
8	1600	40	17,8	50	400	10	4,4
9	1800	45	20,0	50	450	11,25	5,0
10	2000	50	22,2	50	500	12,5	5,6
11	2200	55	24,4	30	330	8,25	3,7
12	2400	60	26,7	30	360	9	4,0
13	2600	65	28,9	30	390	9,75	4,3
14	2800	70	31,1	30	420	10,5	4,7
15	3000	75	33,3	30	450	11,25	5,0

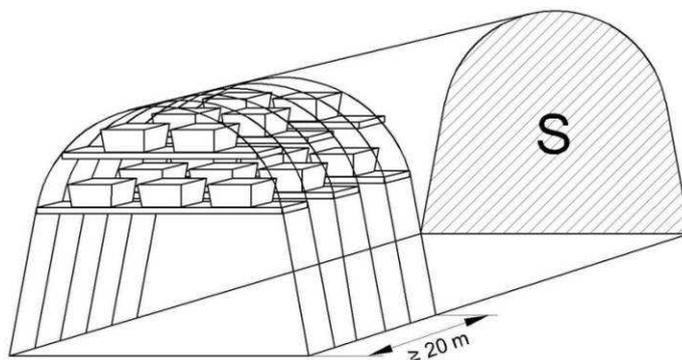
Por tanto, para secciones de 9 m² tendremos:

- En el caso de implantación de BC para aislar la zona de producción:

$A \times Q_{\text{agua}} \text{ (l)} = 9 \times 200 \text{ l} = 1800 \text{ l}$ de agua que podrá distribuirse en:

$1800 : 40 = 45$ cubas de 40l o,

$1800 : 90 = 20$ cubas de 90l.

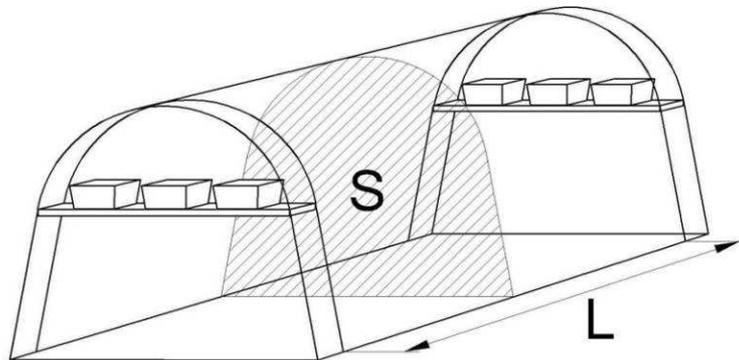


Possible disposición de una barrera concentrada

- En caso de implantación de BD para mitigar la propagación de una

explosión al polvo de carbón:

Distancia entre grupos de cubas es 50 m de longitud (véase el apartado 3.10 de la norma UNE EN 14591-2) con 450 l de agua, lo que supone 12 cubas de 40 l o 5 cubas de 90 l.

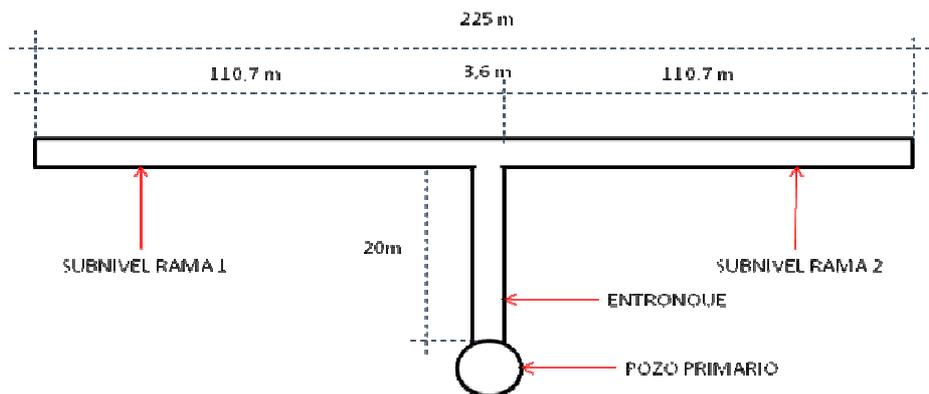


Possible disposición de una barrera distribuida ($L \leq 30$ m)

Disposición de las barreras según la secuencia de explotación

A continuación se propone una posibilidad de posicionamiento de los grupos de cubas de agua en función del esquema de explotación.

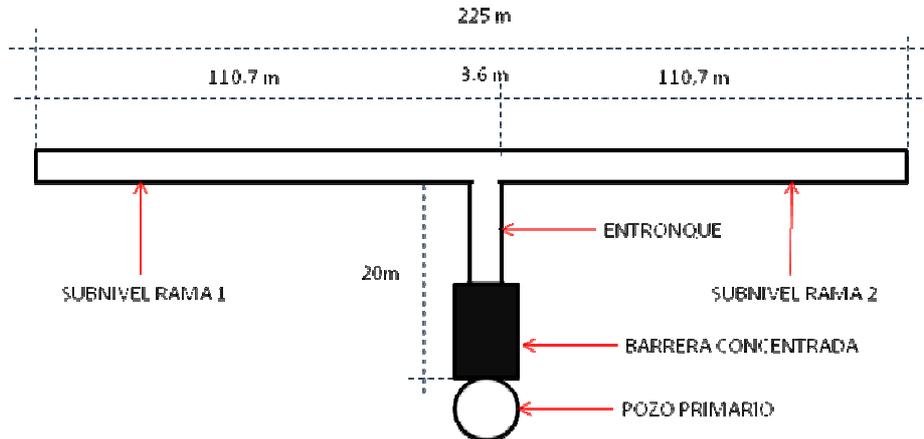
Puesto que el esquema de explotación es repetitivo para cada uno de los subniveles que se explotan en el tajo, se efectúa el análisis para un único subnivel.



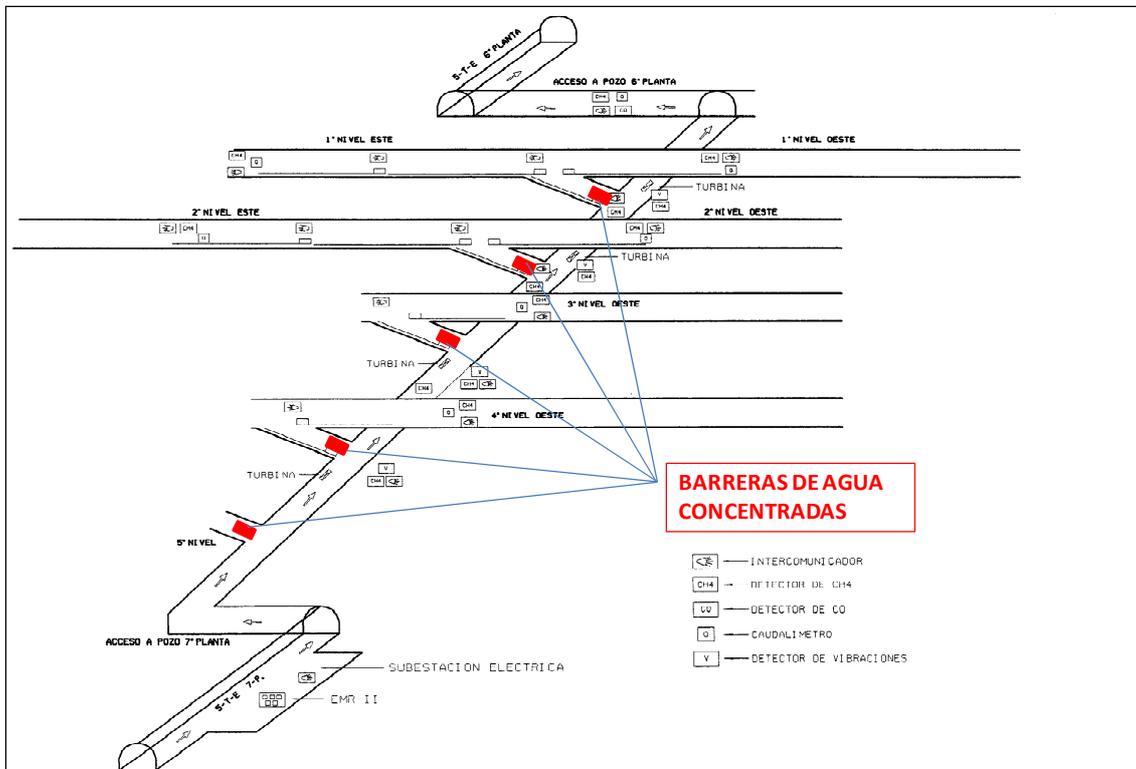
Según el diagrama general de posicionamiento de barreras expuesto en la norma EN 14591-2 (véase la Figura C.2)), puesto que ninguna de las dos ramas de avance que se abren desde el entronque supera los 120 metros, sería suficiente con situar una barrera concentrada en el entronque.

No sería necesario instalar barreras a lo largo del propio subnivel de avance puesto que el primer grupo de cubas debería instalarse al llegar a los 120 metros avanzados.

Según la norma si la barrera a instalar en el entronque fuera distribuida, ésta debería estar instalada a 30 metros del entronque, y si fuera concentrada a 75 metros. Puesto que la longitud del entronque, en el ejemplo actual es de 20 metros, no existe espacio físico para instalar una barrera de cubas de agua distribuida, ya que para estas secciones la distancia de los grupos es de 50 m. Por tanto, se situará una barrera de agua concentrada en el tramo del entronque más próximo al pozo primario.



Según se inicie el avance de cada uno de los subniveles se situará una barrera de agua concentrada en el tramo de cada entronque más cercano al plano.



Dimensionamiento de las barreras concentradas en la sección de la galería

Para una sección de 9 m^2 deben instalarse 45 cubas de 40 litros o 20 de 90 litros. Debido a la corta longitud del entronque, 20 metros aproximadamente, se hace necesario reducir el número de unidades de cubas para poder minimizar el número de grupos.

Según la norma EN 14591-2, la máxima distancia entre grupos de una misma barrera será de 3 metros. Por tanto, en los 20 metros de longitud del entronque podemos situar como máximo 6 grupos de cubas.

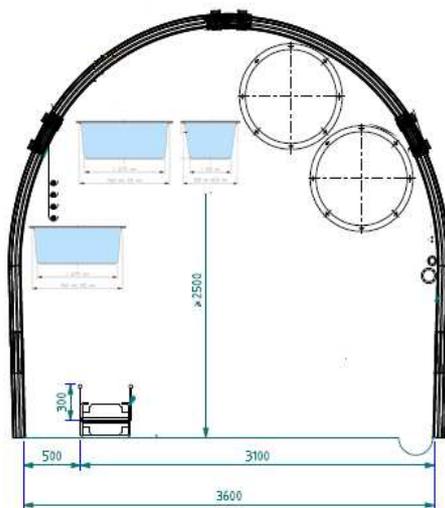
En caso de utilizar cubas de 40 litros, los grupos constarían de 7 cubas. En caso de utilizar cubas de 90 litros, los grupos constarían de 3 cubas. Por este motivo se seleccionan las cubas de 90 litros para implementar la barrera concentrada.

A continuación se muestra una posible distribución de las tres cubas de un grupo en la sección del entronque, que cumpliría con todos los condicionantes de la norma EN 14591-2.

Caso 1.: Instalación de grupos de barreras concentradas

La sección de galería es 9 m^2 :

- Cantidad de agua por grupo de barreras 1800 l
- Número mínimo de cubas: 45 de 40 l o 20 de 90 l



- Porcentaje del ancho de galería ocupado $\geq 35 \%$

- Distancia de las barreras más cercanas a los hastiales $\leq 1,20$ m
- Distancias entre barreras $\leq 1,50$ m
- Suma de los huecos entre barreras (sus proyecciones sobre la horizontal) $\leq 1,80$ m
- Alejamiento máximo al suelo (de la más cercana al suelo) $\leq 2,60$ m
- Alejamiento máximo al techo (de la más cercana al techo) $\leq 2,00$ m
- Ninguna queda oculta por obstáculo superior en más del 50% de su superficie.
- Las cubas en disposición longitudinal son $\leq 50\%$ de las cubas del grupo

La norma EN14591-2 permite que la máxima distancia entre grupos (3 m) se reduzca, pero en caso de que esta distancia llegue a ser inferior a los 1,2 metros no podrán existir superposiciones en sentido longitudinal entre las barras.

Por tanto, y a fin de ocupar el mínimo espacio de entronque posible, la distancia entre grupo se reducirá hasta el mínimo que permite la superposición 1,2 m. Por tanto, la longitud total ocupada de entronque será:

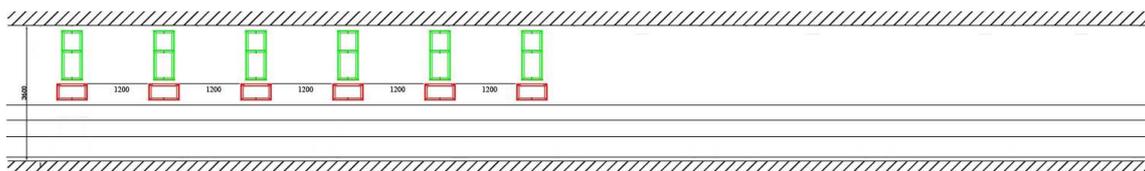
$$L = (5 \times 1,2) + (6 \times 0,76) = 10,56 \text{ m}$$

donde:

6 representa el número de grupos y 5 el número de huecos entre grupos

- 1,2 m la distancia entre grupos
- 0,76 m la medida de una cuba de 90 litros dispuesta longitudinalmente y por tanto la anchura de un grupo

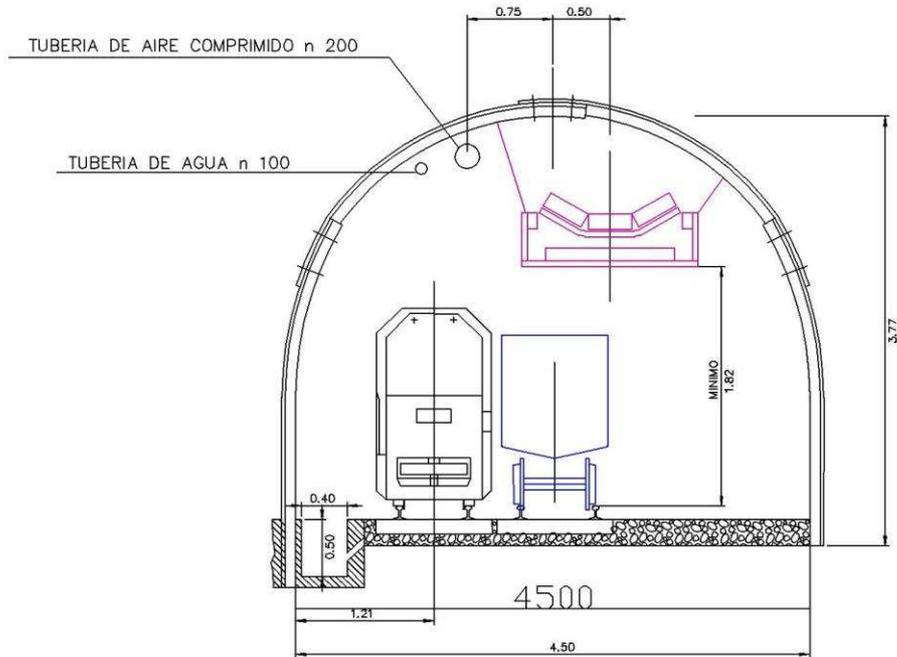
A continuación se esquematiza la disposición del grupo de barreras concentrado sobre el croquis del entronque en planta.



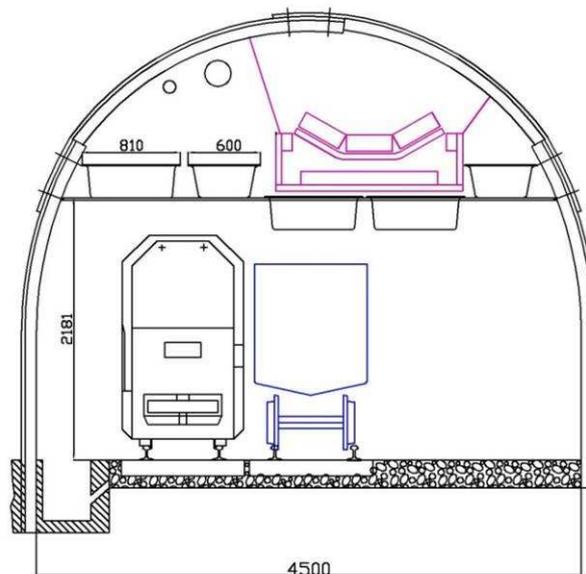
Caso 2: Instalación de grupos de barreras distribuidas

La sección de galería es 14 m²:

- Cantidad de agua por grupo de barreras 420 l
- Número mínimo de cubas: 11 de 40 l o 5 de 90 l

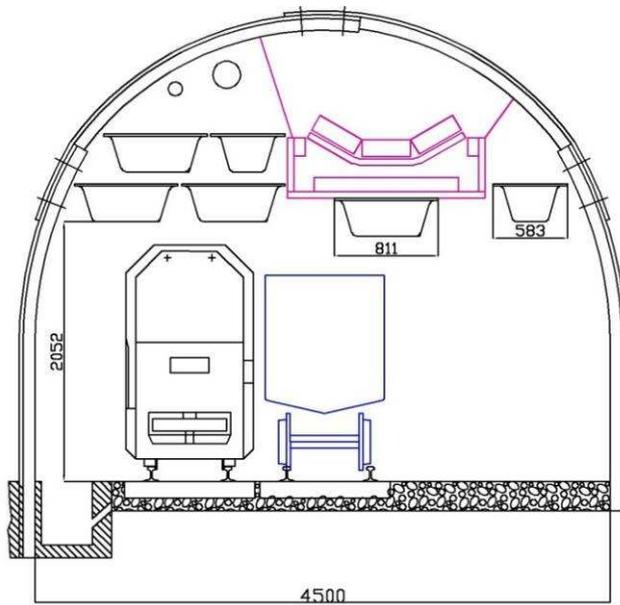


Caso 2.1. Barrera distribuida utilizando cubas de tipo A de 90 l

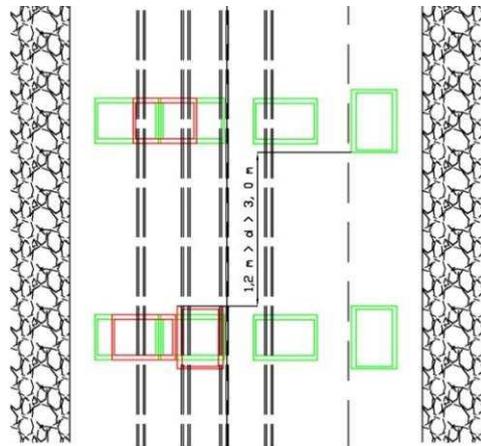
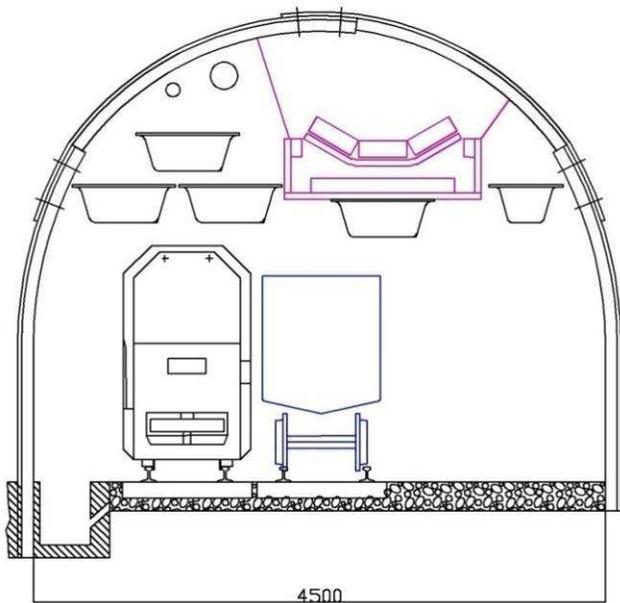


- Se cumple la condición de fracción de anchura de la galería cubierta (>50 %): 80 %.
- El grupo de cubas más elevado de la fila dista 2,2 m del suelo (< 2,6 m).
- La distancia entre filas verticales es inferior a 2 m.

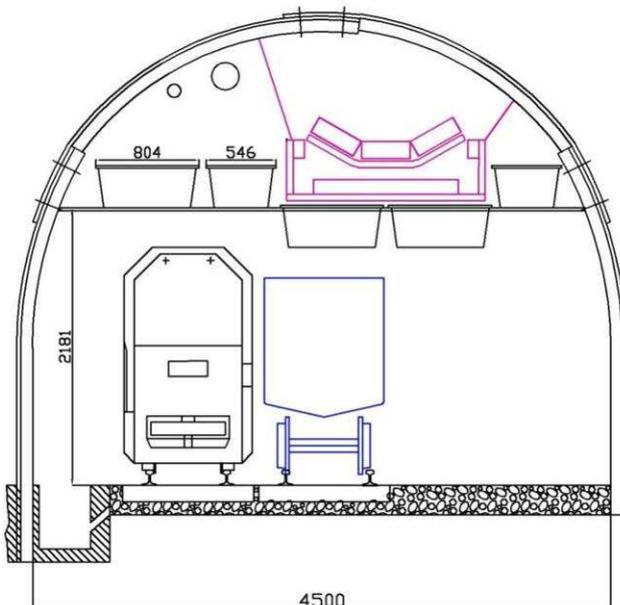
Caso 2.2. Barrera distribuida utilizando cubas de tipo A de 40 l.



- Se cumple la condición de fracción de anchura de la galería cubierta (>50 %): 67 %.
- El grupo de cubas más elevado de la fila inferior dista 2 m del suelo (< 2,6 m).
- La distancia entre filas verticales es inferior a 2 m.
- El número de cubas necesario no cabe en una única sección. Se realiza en dos cumpliendo los requisitos de distancia entre filas de cubas.

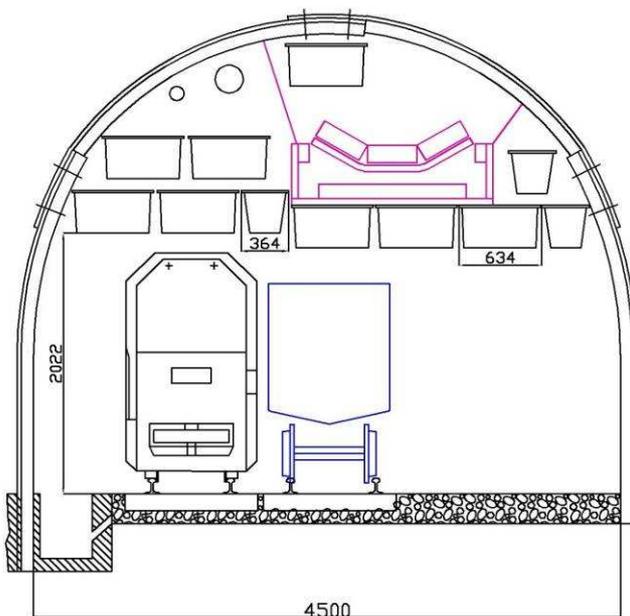


Caso 2.3. Barrera distribuida utilizando cubas de tipo B de 90 l



- Deben instalarse 5 cubas de 90l
- Se cumple la condición de fracción de anchura de la galería cubierta (>50 %): 78 %.
- El grupo de cubas más elevado de la fila dista 2,2 m del suelo (< 2,6 m).
- La distancia entre filas verticales es inferior a 2 m.

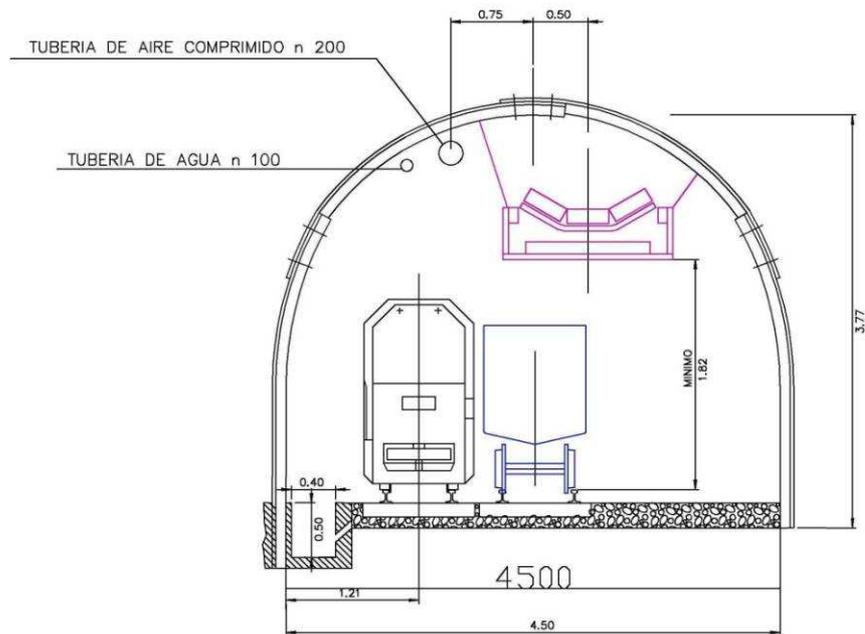
Caso 3.4. Barrera distribuida utilizando cubas de tipo B de 90 l



- Deben instalarse 11 cubas de 40l
- Se cumple la condición de fracción de anchura de la galería cubierta (>50 %): 78 %.
- El grupo de cubas más elevado de la fila dista 2,2 m del suelo (< 2,6 m).
- La distancia entre filas verticales es inferior a 2 m.

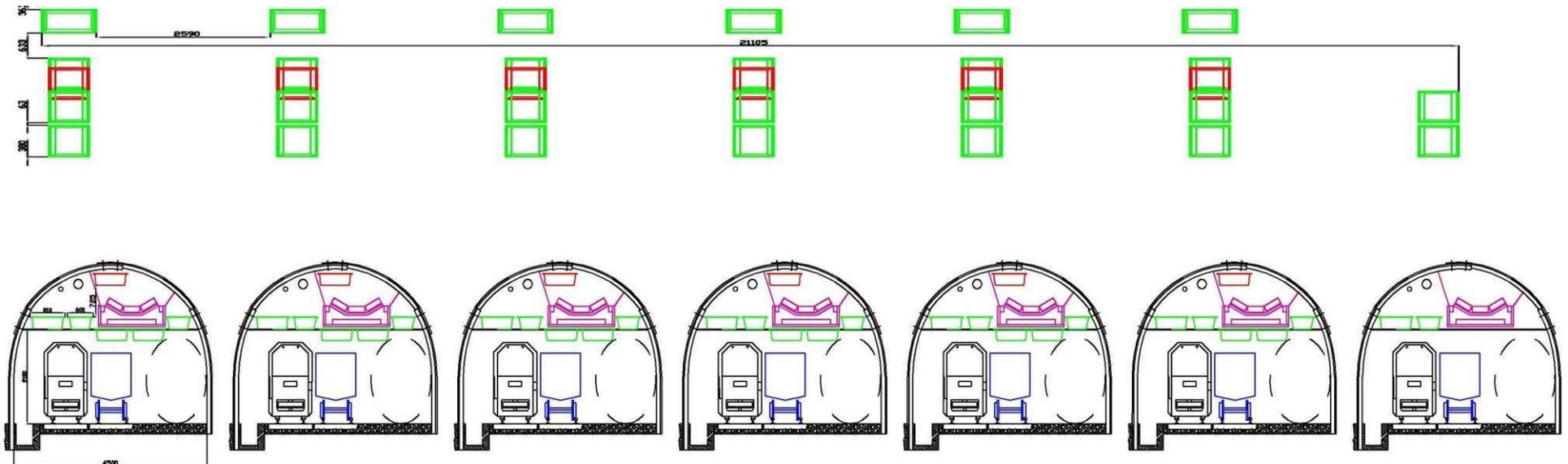
Caso 3: Instalación de grupos de barreras concentradas

- La sección perpendicular de la galería es 14 m^2
- Contenido de agua 2800 l
- N° de cubas de 90 l es 32
- 7 filas de cubas cuya longitud es 21 m



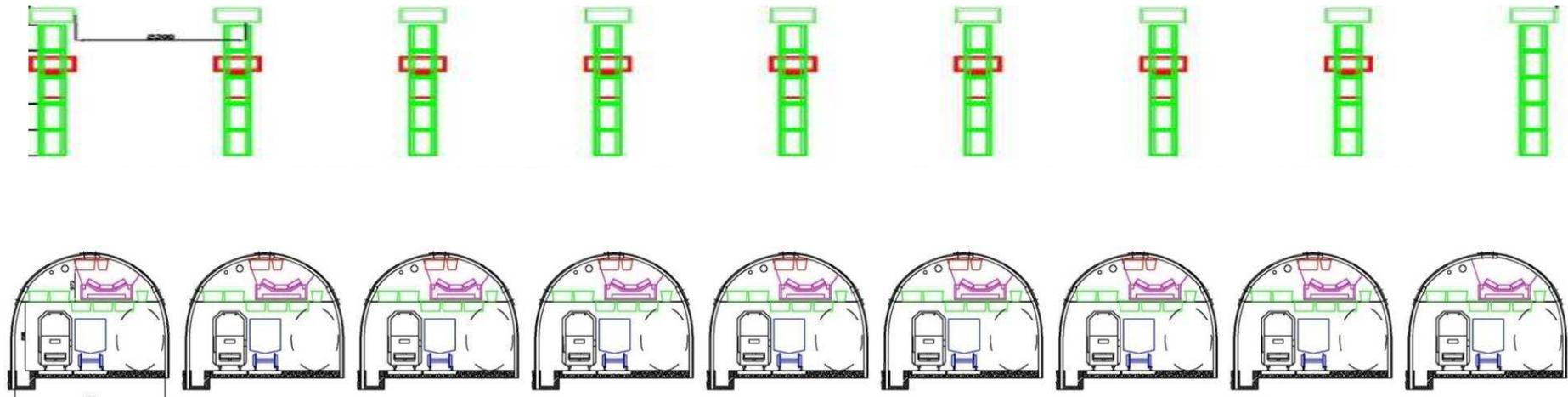
Caso 3.1: Instalación de grupos de barreras concentradas

- La sección perpendicular de la galería es 14 m^2
- Contenido de agua 2800 l
- N° de cubas de 90 l es 32
- 7 filas de cubas cuya longitud es 21 m
- La cobertura de los grupos de cubas alcanzada debe cubrir la máxima anchura de la sección perpendicular de la galería (al menos 50%) es de 68%



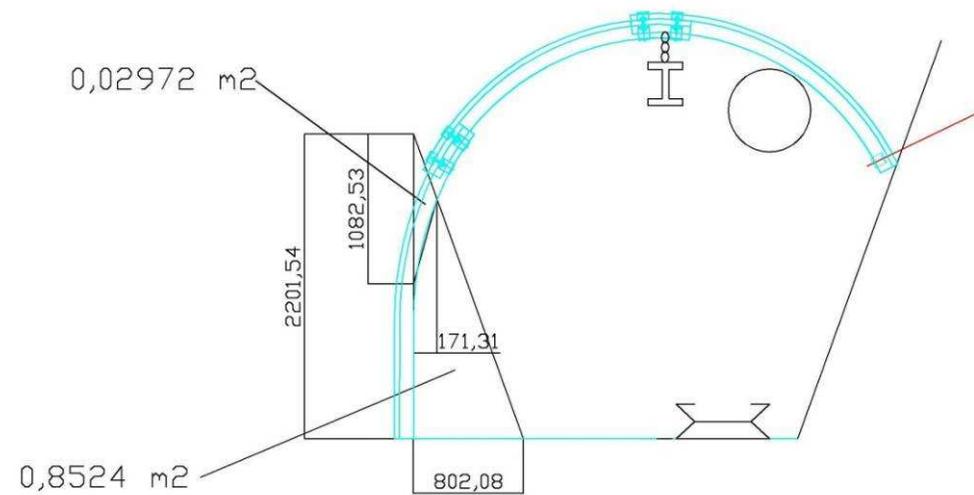
Caso 3.2: Instalación de grupos de barreras concentradas

- La sección perpendicular de la galería es 14 m^2
- Contenido de agua 2800 l
- Nº de cubas de 40 l es 70
- 9 filas de cubas cuya longitud es 27 m
- La cobertura de los grupos de cubas alcanzada debe cubrir la máxima anchura de la sección perpendicular de la galería (al menos 50 %) es de 78%

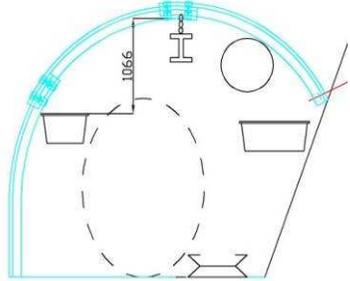
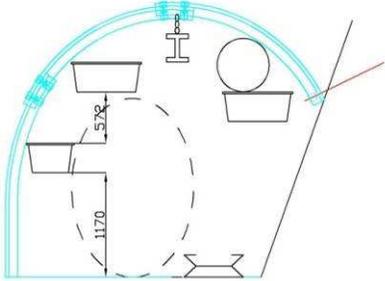
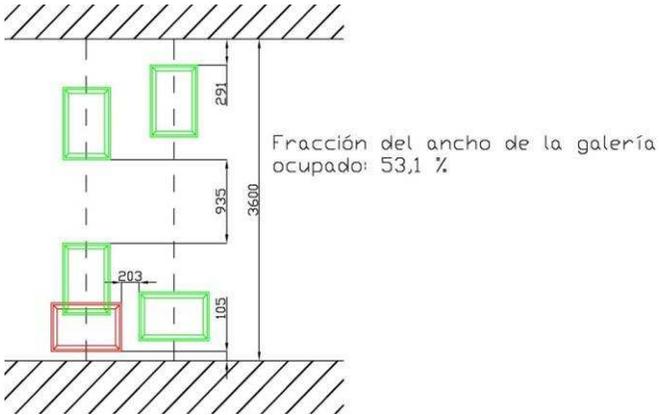
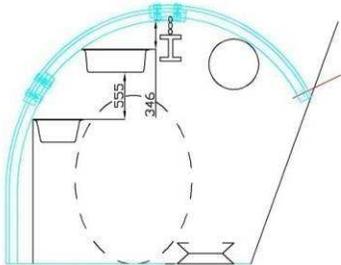
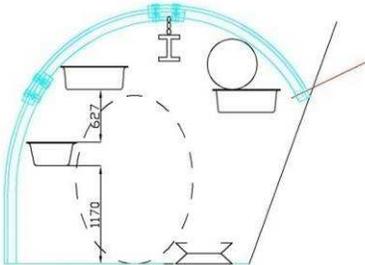


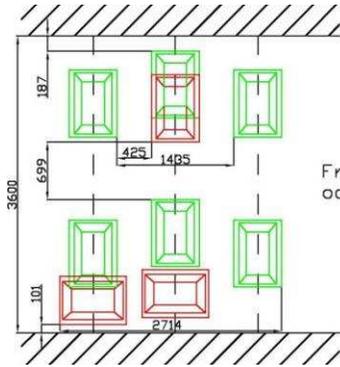
Caso 4: Instalación de grupos de barreras concentradas

- Estimación de la pérdida de sección del perfil: sección resultante aproximadamente $8,15 \text{ m}^2$
- Contenido de agua 1600 l
- N° de cubas de 40 l es 40 y 18 cubas de 90 l

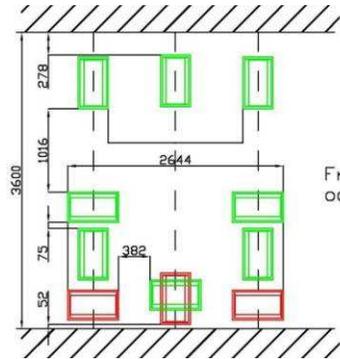
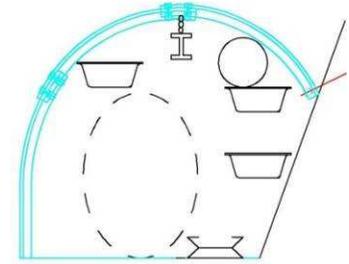
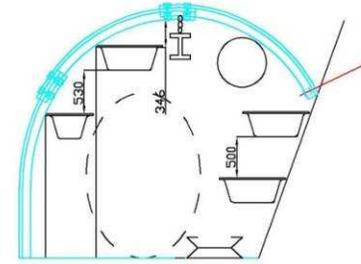
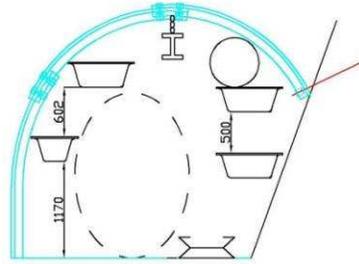


Caso 4.1: Instalación de grupos de barreras concentradas

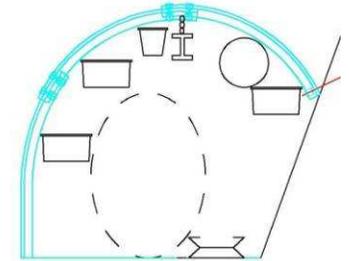
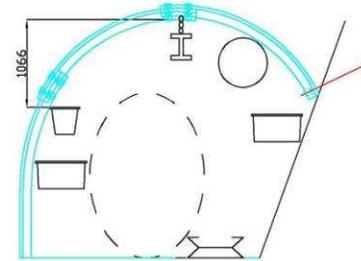
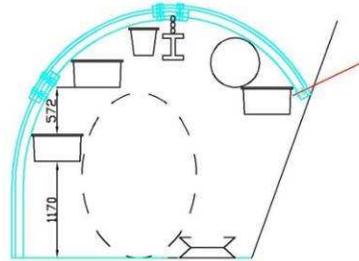




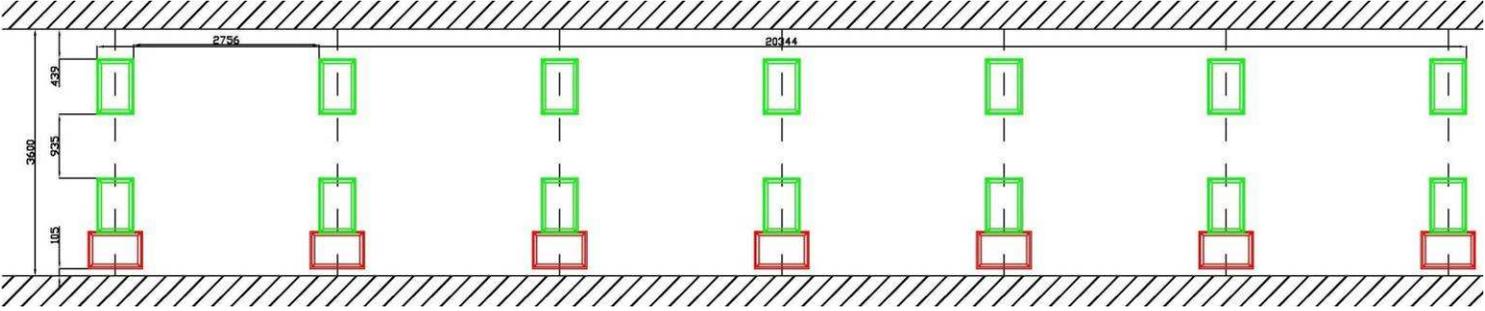
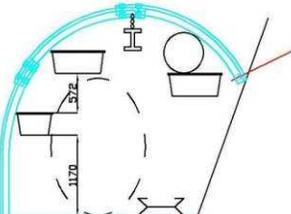
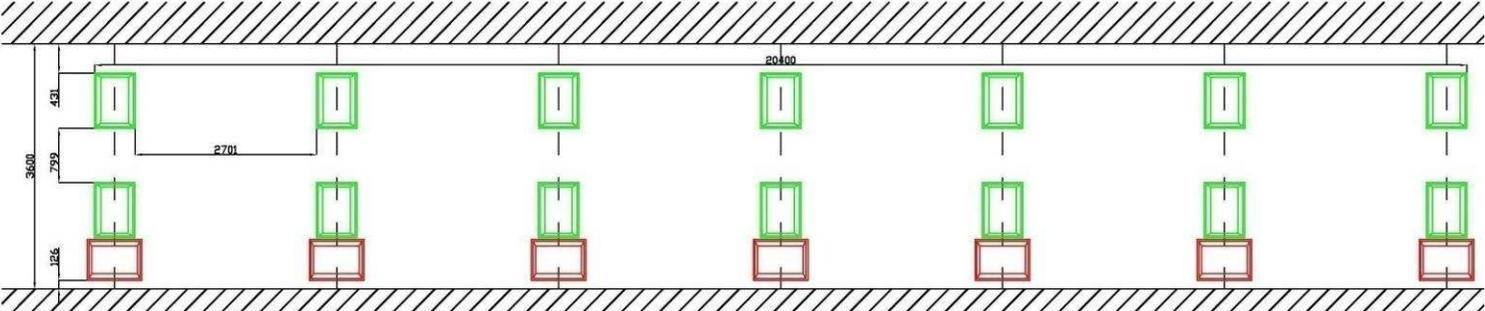
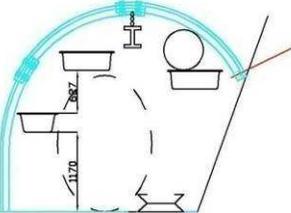
Fracción del ancho de la galería ocupado: 62.9 %



Fracción del ancho de la galería ocupado: 53.1 %



Caso 4.2: Instalación de grupos de barreras distribuidas



CONCLUSIONES GENERALES SOBRE LA VIABILIDAD DE LAS BARRERAS PASIVAS DE AGUA EN GALERÍAS DE SECCIÓN REDUCIDA

En el año 2008 se han llevado a cabo una serie de ensayos a escala real en las instalaciones de la Mina Bárbara (Polonia). Los objetivos de éstos ensayos han sido verificar si es posible la instalación de barreras pasivas de agua en galerías de sección reducida y comprobar su eficacia en el detención de la propagación de explosiones con cantidades de agua inferiores de las prescritas en la norma UNE-EN 15491-2.

Las principales conclusiones obtenidas son las siguientes:

- Es necesario realizar una evaluación de los riesgos de explosión por polvo de carbón antes de acometer cualquier medida de prevención o protección.
- Deben anteponerse las medidas de prevención frente a las de protección, por lo que antes de estudiar la posibilidad de instalación de barreras pasivas de agua siempre debe estudiarse la viabilidad de realizar la inertización del polvo de carbón mediante riego o mediante polvo inerte.
- Las barreras pasivas de agua o de polvo inerte detienen eficazmente las explosiones de polvo de carbón en galerías de sección reducida.
- Las barreras de polvo inerte con el paso de tiempo pierden sus propiedades, especialmente pierden dispersabilidad en ambientes de mina húmedos. En cuanto el intervalo de tiempo entre la activación de una barrera de agua y la llegada del frente de llama es relativamente largo (supera 3 s) en comparación con las barreras de polvo inerte. Para activar las barreras de agua se requiere la velocidad de propagación de la llama de 76 m/s mientras las barreras de polvo inerte requieren la velocidad de 35 m/s. Por tanto, en el caso de explosiones débiles las barreras de polvo inerte funcionan mejor.[3]
- En los ensayos a escala real realizados en la Mina Barbará se ha comprobado la eficacia de barreras pasivas de cubas de agua con las cantidades inferiores de las prescritas en la norma UNE-EN 15491-2.
- El primer grupo de cubas, es decir, el más próximo de una posible fuente de ignición, no debe instalarse más cerca de 60 m pero tampoco más

lejos de 120 m. Esta limitación es resultado de los ensayos de explosión primaria de grisú sin barreras pasivas y sin polvo de carbón llevados a cabo por Cybulski [2]. Él ha comparado el recorrido de la llama en el caso de explosiones fuertes y débiles y ha llegado a la conclusión que en el caso de explosiones débiles el recorrido de la llama es aproximadamente 15 m y en el caso de explosiones fuertes es de 30 a 40m.

- En las galerías de sección reducida cabe la posibilidad de reducir la concentración de agua por sección perpendicular. Los ensayos de Polonia [4] han demostrado la eficacia de barreras de cubas de agua con una concentración de 112 litros de agua por m² de sección en vez de 200 l/ m², el valor establecido en la norma UNE-EN 15491-2.
- La eficacia de las barreras pasivas de agua depende de la configuración de las barreras. El ensayo realizado en Polonia con la configuración mixta de barreras de cubas de agua de 40 y 80 litros ha dado los mejores resultados.
- Para galerías de sección reducida con la sección libre de obstáculos si es posible la instalación de sistemas de barreras pasivas de agua según la norma UNE EN 14591-2 pero en las galerías con obstáculos, amontonamiento de cubas de agua o cubas de agua demasiado próximas unas a otras, posiblemente reducirán la eficacia de las barreras.

Es difícil imponer unas pautas estrictas y generales para la colocación de las barreras de agua o para la disposición de cubas de agua en las galerías, a causa de ventilación, de la circulación del personal, del transporte del material, etc. Pero en la medida de lo posible se recomienda respetar todas las reglas de colocación para que la onda explosiva realice una presión máxima sobre las cubas, sin ser desviada o amortiguada por obstáculos o por cubas vecinas demasiado próximas; y para la dispersión eficaz del agua por toda la sección de la galería.

En la minería española, cuyas galerías son de secciones reducidas, pueden surgir importantes dificultades a la hora de aplicar los requisitos de la norma

UNE-EN 14591-2 debido a que la configuración de las barreras puede ser afectada por falta de espacio o de una longitud insuficiente, llevando la instalación de barreras en contradicción con los principios establecidos con la norma mencionada. En estas condiciones, puede reducirse la cantidad de agua por metro cuadrado de sección siempre y cuando se apliquen las medidas preventivas de captación o fijación de polvo de carbón.

BIBLIOGRAFÍA DEL BLOQUE D

- [1] Michelis, et al. "*Large scale tests with coal explosions in a 700m long underground gallery*". Archivum Combustions, Vol. 7. 1987
- [2] Cybulski, W., "*Coal Dust Explosions and Their Suppression*", National Center for Scientific, Technical and Economic Information, Warsaw, Poland, 1975.
- [3] D.H. Zou, "*Passive and Triggered Explosion Barriers in Underground Coal Mines*", Report to CANMET Natural Resources Canada, September , 2001.
- [4] Kazimierz Lebecki, "*Informe de aplicación de las barreras de cubas de agua a la minería española*" Jornada sobre aplicación de las barreras pasivas de agua a la minería española, Madrid, diciembre del 2008.