

Parte III: Obtención de sulfato de hierro heptahidratado a partir de hierro chanco del Mutún

Grand view reserch (2023). Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) Battery Size, Share & Trends Analysis Report By End-use, By Application, By Region And Segment Forecasts 2024-2030.

<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lithium-iron-phosphate-lifepo4-material-battery-market>

Grupo Pytes. (2025). Aplicaciones de as baterías de fosfato de hierro y litio. <https://es.pytesusa.com/industry-news/The-Applications-of-Lithium-Iron-Phosphate-Batteries.html>

International iron metallics association (2025). Pig Iron. <https://www.metallics.org/pig-iron.html>

<https://www.marketresearchfuture.com/reports/ferrous-sulfate-market-22721>

Sharipov, M. (2024).

<https://doi.org/10.1051/bioconf/202413006013>

Verified market research. (2024). Global Ferrous Sulfate Market Size By Product, By Form, By End-User Industry, By Geographic Scope And Forecast.

<https://www.verifiedmarketresearch.com/product/ferrous-sulfate-market/>

Artículo recibido en: 02.04.2025

Artículo aceptado: 08.05.2025

PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN MINAS SUBTERRÁNEAS

Dr. Felipe Calizaya

Profesor Emérito, Universidad de Utah

Salt Lake City, Utah USA

Felipe.calizaya@utah.edu

RESUMEN

Los incendios y explosiones son los peligros de mayor riesgo en minas subterráneas. Ambos, si ocurren, tienen costos elevados en daños al personal, gastos incurridos durante la mitigación, y finalmente, pérdidas de producción y equipos. Los incendios consumen el oxígeno del aire y producen gases tóxicos, calor y humo. Durante un incendio, los productos de combustión pueden ser esparcidos con la misma rapidez de distribución del oxígeno que nos sustenta la vida. La prevención de incendios es la herramienta más practica para controlar incendios. Un programa de prevención requiere de la participación del de todos los trabajadores, supervisores y empleados. Es responsabilidad del gerente proveer a los trabajadores un manual completo de prevención y control de incendios especificando las normas y regulaciones, deberes y obligaciones de los trabajadores, y los procedimientos para facilitar una evacuación ordenada del personal de la mina. Es responsabilidad de cada trabajador entender los procedimientos de operación de equipos, realizar inspecciones por condiciones y practicas inseguras, reportar los defectos a los supervisores, y cuidar por la salud y seguridad de otros.

El presente artículo presenta un resumen de los requerimientos básicos para identificar los peligros asociados con incendios y explosiones, determinar y evaluar los riesgos, y establecer medidas correctivas necesarias para reducir o controlar los riesgos.

Palabras clave: Incendios y explosiones, prevención, entrenamiento, y control de riesgos.

ABSTRACT

Fires and explosions are the riskiest hazards in underground mines. Both, if they occur, have high costs in personnel damage, expenses incurred during mitigation, and finally, production and equipment losses. Fires consume oxygen from the air and produce toxic gases, heat and smoke. During a fire, the products of combustion can be spread with the same rapidity of distribution of the oxygen that sustains our lives. Fire prevention is the most practical tool for controlling fires. A fire prevention program requires the participation of all workers, supervisors, and employees. It is the manager's responsibility to provide workers with a comprehensive fire prevention and control manual specifying the rules and regulations, duties and obligations of workers, and procedures to facilitate an orderly evacuation of mine personnel. It is the responsibility of each worker to understand safe operating procedures, perform inspections for unsafe conditions and practices, report defects to supervisors, and take care of the health and safety of others.

This article presents a summary of the basic requirements for identifying hazards associated with fires and explosions, determining and assessing risks, and establishing corrective measures to reduce or control risks.

Keywords: Fires and explosions, prevention, training, and risk control.

1. INTRODUCCIÓN

Una revisión de los accidentes/ incidentes de seguridad de minas subterráneas muestra que casi todos los desastres catastróficos están de alguna manera relacionados a ventilación. Los incendios y explosiones son los peligros de mayor riesgo. Ambos, cuando ocurren, tienen un costo elevado en términos de fatalidades y lesiones, gastos incurridos durante la evacuación y rescate, y finalmente, pérdidas de materiales y equipos, y causar el cierre de la mina.

Los incendios consumen el oxígeno del aire y producen gases tóxicos, calor y humos que alteran el sistema de ventilación de la mina. Durante un incendio, las corrientes de aire pueden esparcir los productos de combustión con la misma rapidez de distribución del oxígeno que nos sustenta la vida. El tiempo es el peor enemigo de cualquier programa de control de incendios y explosiones. En muchas minas subterráneas, se han observado situaciones desastrosas con múltiples fatalidades causados por corrientes de aire contaminados por gases tóxicos generados por incendios y explosiones, particularmente por el monóxido de carbón.

La prevención de incendios es la parte más importante de cualquier programa de seguridad minera. Un programa de prevención requiere de la participación de todos los trabajadores, supervisores y empleados. Es responsabilidad del operador de la mina (gerente) de proveer a los trabajadores un manual completo de prevención y control de incendios especificando los deberes y obligaciones de todos los trabajadores, la jerarquía de control de riesgos y, finalmente, los procedimientos para facilitar una evacuación ordenada del personal a la superficie. Es responsabilidad de cada trabajador entender los procedimientos de operación de equipos, realizar inspecciones por condiciones y prácticas inseguras, reportar los defectos a los supervisores, controlar la emisión de sustancias peligrosas y cuidar por la salud y seguridad de otros.

2. INCENDIOS

En una mina subterránea, un incendio cambia la composición química del aire, reduce el contenido de oxígeno y aumenta la cantidad de gases como el monóxido y dióxido de carbono. El incendio cambia también la presión del aire en la zona afectada. Si el incidente ocurriera en la

superficie, por ejemplo, en un edificio, las personas afectadas tienen varias rutas de escape; pero en un incendio ocurre dentro de una mina, el número de salidas es muy reducido. El incendio podría ocurrir en una de las rutas de escape y contaminar el aire fresco con productos de combustión. Por estas razones, es de vital importancia preparar la mina para estas contingencias y capacitar al personal para minimizar los riesgos.

En una mina subterránea, los lugares más vulnerables a un incendio son (Bossard, 1982):

- Pilas de mineral fragmentado en los tajos
- Equipos eléctricos y a diésel
- Depósitos de materiales combustibles
- Talleres de reparación y mantenimiento
- Subestaciones eléctricas, y
- Bandas o correas transportadoras.

Todos estos materiales, equipos y lugares de trabajo representan fuentes de combustión e ignición. Bajo ciertas condiciones, estos también pueden representar fuente de ignición. El tercer elemento para iniciar un incendio es el oxígeno del aire. Un aspecto básico para reducir el riesgo de iniciar un incendio dentro de una mina es mantener las fuentes de combustión e ignición separadas entre sí por una distancia mínima de 50 m. Además, todos los talleres subterráneos deben ser ubicados en ambientes bien ventilados, todos los equipos utilizados provistos de extintores o algún sistema de supresión de incendios, y los trabajadores capacitados en la utilización de estos equipos (McPherson, 1993).

Estudios realizados por el Instituto de Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos (NIOSH) sobre fuentes de ignición en minas subterráneas metálicas, no metálicas y de carbón, mostraron los siguientes resultados (De Rosa, 2004a y 2004b):

Minas metálicas y no metálicas (1990-2001, 65 incidentes)

- Fallas eléctricas y del motor: 26%
- Fluido hidráulico y equipos a diésel: 25%
- Corte al oxiacetileno y soldadura: 20%

• Fricción en bandas de transporte: 8%
Minas de carbón (1990-1999, 87 incidentes)

- Fallas eléctricas: 32%
- Corte al oxiacetileno y soldadura: 20%
- Fricción en bandas de transporte: 17%
- Combustión espontánea: 15%.

Para reducir los riesgos, todos los trabajadores deben ser entrenados (instruidos y evaluados) en temas de seguridad contra incendios, incluyendo los sistemas de comunicación y alarma, equipos de protección personal, rutas de escape, refugios, y procedimientos de evacuación. Es responsabilidad del gerente dotar a los trabajadores de los equipos, insumos y otros medios de protección contra incendios, y es responsabilidad de todos los trabajadores cumplir con las normas y hacer todo lo que es razonablemente posible para proteger la salud y la seguridad de todos en el lugar de trabajo (Brake, 2008).

Para ilustrar las principales causas y consecuencias de incendios en minas subterráneas, un resumen de dos casos es presentado a continuación.

2.1 Mina “Sunshine”, ID, EE.UU. 1972

La mina “Sunshine” es una mina de plata, cobre y antimonio ubicada en el Estado de Idaho, al oeste Estados Unidos. La mina tenía una historia de 100 años de trabajo continuo con pocos incidentes de seguridad. El incendio en la mina ocurrió en mayo, 1972 y cobro la vida de 91 trabajadores. El incendio fue provocado por la combustión espontánea de madera, viruta y otros materiales acumulados en rajos antiguos (zonas explotadas, Figura. 1). Por entonces, en EE.UU., no era obligatorio aislar las zonas explotadas de las zonas activas por medio de muros herméticos. En esta mina, muchos rajos antiguos, especialmente aquellos ubicados cerca de la superficie, solo eran aislados por medio de muros temporales, muchos de ellos construidos de madera. Estos muros, dañados por falta de mantenimiento, permitieron filtrar el aire fresco de la superficie a los rajos antiguos, oxidar los marcos y tabiques de madera, y crear las

condiciones propicias para iniciar una combustión espontánea. Una vez iniciada la combustión, el aire fresco de la mina fue contaminado con monóxido de carbono y dirigido a los frentes de trabajo por galerías y chimeneas, para luego ser devuelto a la superficie por dos galerías de salida. Por entonces, era común ventilar varios frentes de trabajo utilizando ventilación en serie, donde el aire de salida de una sección es utilizado para ventilar otros. Dos ventiladores secundarios operados en dos niveles separados, permitieron recircular parte del aire contaminado por los frentes de trabajo.

El incendio fue descubierto por dos electricistas por el intenso humo que procedía de las zonas antiguas, pero ellos no tenían los medios para reportar el incidente a sus supervisores, ni para alertar a los trabajadores de otros niveles. Además, ese día, ningún supervisor con autoridad de mando, gerente o superintendente, estuvo presente en la mina. Se perdieron más de 20 minutos tratando de ubicar el incendio antes de empezar con la evacuación, otro tiempo se perdió en determinar las rutas de escape. El Pozo 10, equipado con un winche de tres compartimentos (dos para extracción del mineral y uno para transporte de personal y materiales),

era la única ruta de escape de los niveles inferiores. La jaula del winche solo tenía una capacidad de nueve personas. Una vez empezada la evacuación, la operación del rescate solo duro 52 minutos, fue interrumpida después de hacer nueve viajes por la muerte del operador del winche por el intenso humo. Como resultado, muchos trabajadores quedaron atrapados en los niveles inferiores. De un total de 173 trabajadores que trabajan durante el turno, 91 murieron por intoxicación por el monóxido de carbono, 80 fueron evacuados el día del accidente, y dos rescatados nueve días después del incendio (Jarrett, 1975).

Por sus características, el incendio de la mina “Sunshine” mostro todas las debilidades del programa de protección de salud y seguridad de los trabajadores en minas metálicas, y sirvió como un catalizador para la promulgación de una nueva ley conocida como la Ley de Seguridad y Salud Minera de los Estados Unidos (Ley de Mina, MSHA, 1977), que, una vez actualizada, es hoy utilizada para todas las actividades mineras, metálicas y no metálicas. Con esta ley, hoy, los inspectores de MSHA tienen la facultad de hacer inspecciones sorpresa, sancionar a los responsables por incumplimiento de normas y hasta ordenar el cierre parcial o total de una mina.

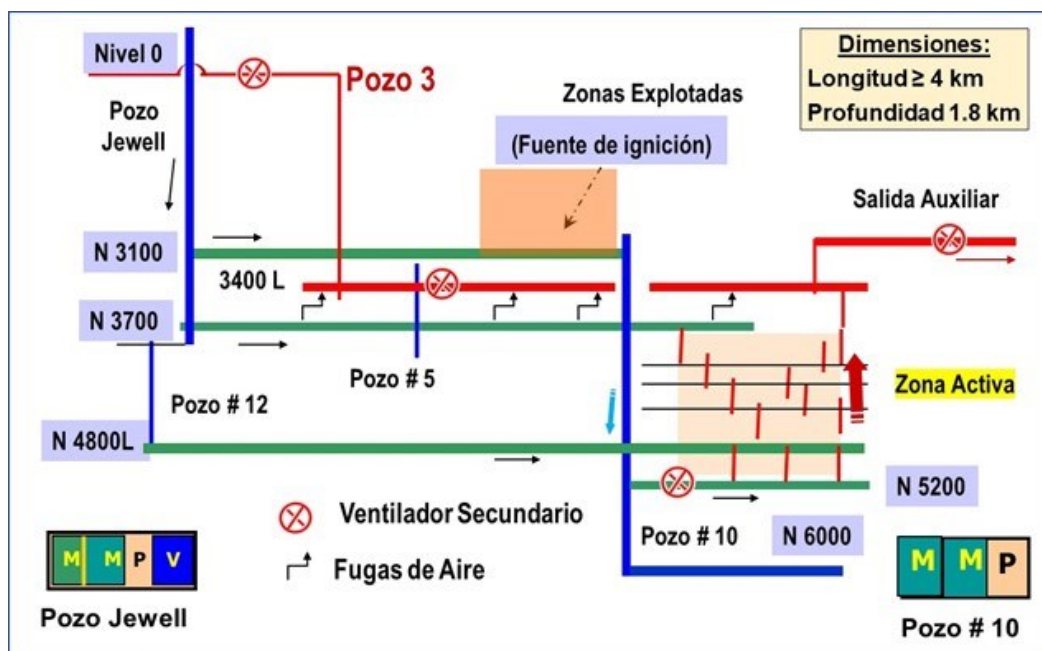


Figura 1. Esquema de ventilación de la Mina “Sunshine”, ID, US – Sección vertical.

2.2 Mina “Westray”, Nueva Escocia, CAN, 1992

La mina “Westray” era una mina de carbón ubicada en la provincia de Nueva Escocia, Canadá. La compañía explotaba un manto inclinado de carbón de 2.5 y 8 metros de espesor. El manto era bituminoso con alto contenido del gas metano (2.5 a 5.0 m³/ton). La mina era relativamente nueva. Las labores de desarrollo empezaron en 1989, y las de producción en septiembre de 1991. El acceso a la mina era por medio de dos rampas paralelas (1 y 2), conectadas entre sí por medios de recortes y aisladas por muros y puertas. La rampa 1 servía como acceso principal para el personal y conducto de aire fresco. La rampa 2 servía como el principal medio de extracción del mineral y salida del aire viciado. Con este objeto, la rampa estaba equipada con una banda transportadora y un ventilador primario. Entre otros equipos, la mina contaba con un escariador de carbón (minero continuo), un carro de transporte, y dos perforadores para la instalación de pernos de anclaje. Las operaciones estaban concentradas en dos secciones: SW-1 y SW-2. El yacimiento era explotado por el método de cámaras y pilares (Figura 2).

A principios de 1992, las operaciones mineras estaban concentradas en la sección SW-1, pero debido a caídas frecuentes de roca y problemas de control del gas metano por medio de ventilación, la sección fue aislada por muro temporales y el personal y equipos de trajo relocalizados a la sección SW-2. Pero esta sección no estaba totalmente aislada de sección

SW-1, y los frentes tampoco tenía un sistema propio de ventilación. Las labores de rehabilitación duraron hasta mediados de abril, 1992. Los nuevos frentes de trabajo fueron ventilados por un sistema de ventilación auxiliar en serie. Por la capacidad reducida del ventilador y la resistencia de los ductos, los frentes estaban ventilados con caudales reducidos (menores a 2.5 m³/s) donde las velocidades del aire oscilaban entre 0.12 y 0.4 m/s, muy por debajo de la velocidad mínima requerida de 0.4 m/s. Estas condiciones permitieron la estratificación del metano en las galerías. Otro factor que contribuyó al desastre fue la cantidad excesiva de polvo de carbón acumulado en el piso y las paredes de las galerías. La cantidad de polvo variaba entre 0.2 m de espesor el centro de las galerías hasta más de 1m cerca de las paredes. De acuerdo a los reportes, la práctica de neutralizar el polvo de carbón con polvo de roca inerte no fue utilizada en esta mina regularmente. Además de estos factores, en esta mina, casi todas las actividades mineras fueron planificadas en base a producción y costos, relegando los aspectos de seguridad y ventilación a un segundo plano.

De acuerdo al reporte final de investigación, la explosión de la mina “Westray” fue iniciada por una chispa producida por fricción entre los dientes del minero continuo y la roca encajonante. La chispa provocó la ignición y explosión del metano estratificado en la galería, seguida por una segunda explosión del polvo de carbón. Todos los trabajadores (26) que trabajaban en la mina durante el turno perecieron durante la explosión (McPherson, 2002).

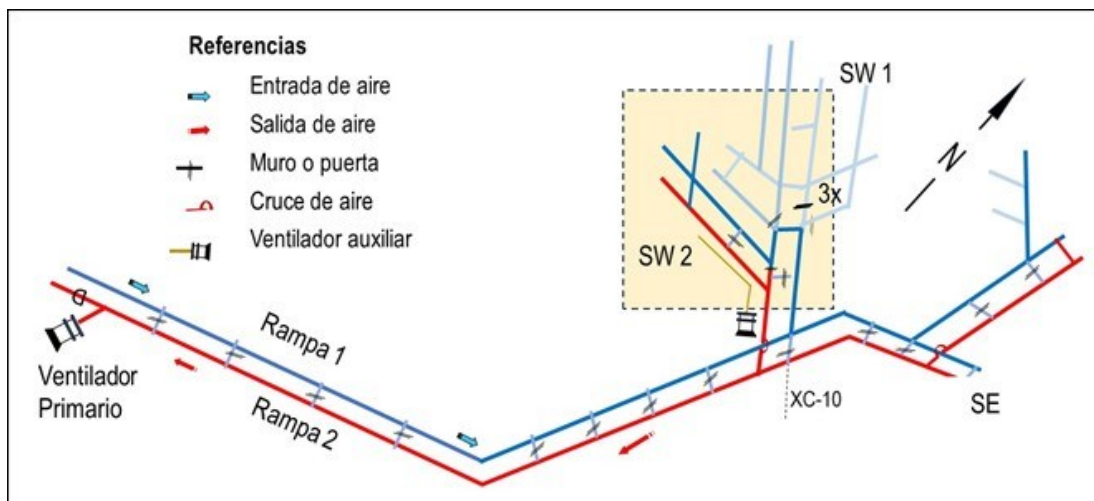


Figura 2. Esquema de ventilación de la Mina “Westray”, Nueva Escocia, Canadá – Planta.

3. FUENTES DE COMBUSTIBLES E IGNICIÓN

En minas subterráneas, los trabajadores están expuestos a varios materiales combustibles y fuentes de ignición. Muchos de estos están asociados con la operación de equipos, el método de explotación minero, y el tipo de mineral extraído. Pero muchos otros están asociados con el entrenamiento de los trabajadores. Desde el punto de vista del manejo de riesgos, rara vez es posible eliminar todos los incendios y explosiones. Para un control efectivo de estos peligros es importante identificar las fuentes de combustión, revisar las normas y regulaciones, y establecer barreras para minimizar riesgos. Un resumen de las principales fuentes de combustión e ignición y maneras de mitigar incendios en minas subterráneas es presentado a continuación.

3.1 Equipos eléctricos

Los cables eléctricos, si están mal instalados o mal mantenidos, pueden causar cortocircuitos y provocar incendios, y si están cubiertos con PVC, pueden producir gases tóxicos como el ácido clorhídrico. Para reducir el riesgo, los cables deben ser suspendidos de cable mensajeros o de pernos de anclaje y otros accesorios de seguridad. Si es inevitable tener cables expuestos a fricción, entonces, estos deben ser protegidos. En áreas de producción, los cables deben ser examinados regularmente por daños físicos y sobretensión.

En áreas abandonadas, los cables usados deben ser retirados. En muchos países, las normas exigen el uso de cables que no generen humos tóxicos por calentamiento, lo que contribuye a reducir incidentes en minas subterráneas.

Por norma, todas las subestaciones eléctricas, talleres y estaciones de servicio deben ser instalados en lugares accesibles, bien ventilados, y siguiendo las normas de seguridad. Todos los talleres eléctricos deben ser provistos con extintores de fuego ubicados cerca de una entrada de aire. Además, estos deben ser inspeccionados por daños físicos, fuga de productos líquidos y gaseosos y mantenidos regularmente. Los interruptores deben ser siempre apagados después de una operación, especialmente durante una voladura o cuando las actividades son suspendidas en un lugar por mucho tiempo (Sottle, y Noak, 2001).

3.2 Equipos a diésel

Los equipos a diésel son peligrosos en ambientes confinados porque queman combustible, consumen oxígeno, y utilizan motores que representan fuentes de combustión e ignición. Además, en minas subterráneas, estos equipos requieren de depósitos especiales para almacenar el combustible y cámaras para talleres de reparación y mantenimiento. Para reducir los riesgos, estos lugares deben ser construidos y operados siguiendo las normas de seguridad. Además, todos estos lugares deben ser equipados

con detectores de gases, puertas de seguridad y sistemas de extinción de incendios. Cada estación de servicio debe tener su propio circuito de ventilación conectado a una salida principal de aire.

Los talleres subterráneos, además de ser construidos siguiendo las normas y equipados con sistemas de supresión de incendios, deben ser operados por trabajadores entrenados para este fin. Todos los equipos a diésel, especialmente aquellos con motores mayores a 125 kW de potencia, deben ser inspeccionados y mantenidos regularmente. Durante cada inspección, los humos de los ductos del escape deben ser evaluados contra los límites permisibles establecidos para este fin (ver Tabla 1 por una muestra de resultados en un taller). Dependiendo de la utilización de los equipos y las condiciones del trabajo, la frecuencia del mantenimiento varía de un lugar a otro. Empero, una práctica común es evaluar los gases de escape y mantener los equipos a diésel cada 250 horas de trabajo (MEA, 2006).

En minas subterráneas donde se generan gases inflamables, como el metano (CH_4), el riesgo de iniciar un incendio es mayor. Para evitar contingencias, las normas prescriben utilizar solo equipos a diésel rotulados como intrínsecamente seguros. Aun así, estos equipos no pueden ser utilizados en ambientes donde la concentración del metano es mayor al 1% CH_4 .

Otro factor importante a considerar en minas subterráneas es la emisión de partículas de diésel por estos equipos. Muchas agencias de seguridad han clasificado estas partículas como cancerígenas de alto riesgo, y como tal, la exposición a estas es regulada. En EE.UU., por norma, ningún trabajador puede estar expuesto a partículas de diésel en concentraciones mayores a 160 microgramos por metro cúbico del carbón total (MSHA, 2024). El control de estas partículas es también por medio de ventilación, aunque la tendencia es utilizar equipos que generen una menor cantidad de productos de combustión (Quiroz et al., 1998).

Tabla 1. Muestreo de gases en ducto de escape de un equipo a diésel

Productos de diésel	TLV	Vehículo 1	Vehículo 2
CO, ppm	1000	2435 ppm	190 ppm
NO + NO ₂ , ppm	500	746 ppm	354 ppm
Humo (opacidad), %	50	a alta velocidad	Sin humo
Comentarios		Rumbo a reparación	De vuelta al trabajo

3.3 Corte al oxiacetileno y soldadura

Cualquier trabajo de corte al oxiacetileno y soldadura puede iniciar un incendio en ambientes confinados. Para reducir los riesgos, estas actividades solo deben ser realizadas en lugares especiales, alejados de cualquier combustible y por un personal calificado. Cuando se realiza una actividad de corte o soldadura, el operador debe asegurarse que en su alrededor existe algún método de control de incendios y evitar el contacto de chispas con materiales combustibles. Todos los trabajadores deben estar certificados (entrenados y evaluados) en reconocer los

peligros de los materiales utilizados, reguladores y válvulas de control, y depósitos de gas comprimido. Además, deben ser entrenados en técnicas de prevención de incendios. Estas técnicas requieren de equipos de extinción de incendios, insumos y procedimientos de operación. Si es necesario realizar un trabajo dentro de una mina, por ejemplo, en un frente de trabajo o una galería ciega, entonces, el lugar debe ser preparado para este fin, provisto de equipos de protección personal, detector de gases, extintores de fuego y un recipiente de arena para capturar fragmentos del material

incandescente. Además, el lugar debe ser evaluado por productos que pueden iniciar un incendio. Una buena práctica es extender el monitoreo de productos de combustión por lo menos por una hora después de concluir el trabajo (Eschenburg, 1982).

3.4 Igniciones por fricción

La ignición por fricción es definida como una ignición de una mezcla de gases inflamables causada por una chispa incendiaria. En las minas subterráneas donde se utilizan bandas transportadoras, las igniciones por fricción ocurren por varias razones, incluyendo el material de la banda y partes, un mal contacto de la banda con las poleas y rodamientos, una mala alineación y por falta de mantenimiento (Figura 3). En minas mecanizadas donde se utilizan máquinas a percusión, las chispas generadas por impacto de la broca con la roca pueden iniciar un

incendio. El riesgo puede ser reducido evitando la formación de mezclas explosivas en los lugares de trabajo, limpiando las partículas del mineral asentado en el piso y las paredes de la excavación y sobre todo utilizando materiales resistentes al fuego en la instalación del sistema de transporte (Leeming, 2009).

En las minas de carbón, las chispas incandescentes son producidas por el impacto de los dientes de un excavador con la roca encajonante con contenido de cuarzo. Estas, en presencia de gases explosivos, pueden iniciar un incendio. Las prácticas más comunes para reducir el riesgo son: (1) drenar el metano con anterioridad a la extracción del carbón, (2) utilizar excavadores con dientes afilados que producen pocas chispas y (3) utilizar agua atomizada a bordo del excavador.



Figura 3. Banda transportadora en una rampa de extracción

3.5 Combustión espontánea

La combustión espontánea es otro peligro de gran riesgo en minas subterráneas. Los incidentes generalmente ocurren en zonas explotas que contienen volúmenes significativos de material oxidable. Los lugares más vulnerables son las zonas de hundimiento (paneles explotados) en las minas de carbón y los rajos explotados de

minerales sulfurados en minas metálicas. En estos lugares, el mineral fragmentado remanente es oxidado en presencia del oxígeno y la reacción es exotérmica. Si el calor de oxidación no es removido a tiempo, entonces, el mineral se calentará espontáneamente hasta alcanzar una temperatura sostenida conocido como el punto sobrecalentamiento. Específicamente, la

combustión espontánea de un material oxidable ocurre cuando la cantidad de calor generada por la oxidación del combustible es mayor que la cantidad de calor removido por ventilación. Bajo estas condiciones, la temperatura del combustible (carbón o mineral sulfurado) aumenta hasta alcanzar su punto de ignición. Esta temperatura depende de muchas variables incluyendo la cantidad y rango del material oxidable. En las minas de carbón, esta temperatura puede ser tan baja como de 45 °C. El proceso, además de producir una fuente de ignición, permite la liberación de varios productos químicos como el monóxido de carbono e hidrógeno, aumentando la magnitud del riesgo (Smith et al., 1988).

El riesgo puede ser controlado aislando las zonas explotadas por medio de muros de alta presión y neutralizando la mezcla explosiva por medio de un gas inerte, como el nitrógeno o dióxido de carbono. Alternativamente, el riesgo puede ser controlado utilizando un sistema de ventilación que permite remover la mayor cantidad del calor producido y minimiza las diferencias de presión a través de los muros de aislamiento.

4. DETECCIÓN DE INCENDIOS

Los incendios son generalmente detectados por medio de detectores electrónicos. Estos requieren

de un sistema de monitoreo ambiental. Dos tipos de variables son medidos con estos detectores: (a) productos de combustión y (b) variaciones de temperatura. Estos detectores son preferidos por las siguientes razones:

- Detectan un incendio en su estado inicial
- Ayudan a seleccionar las rutas de escape
- Permiten visualizar los esfuerzos de rescate
- Permiten operar los ventiladores y reguladores por control remoto, y
- Ayudan a establecer el tiempo de reingreso.

Los detectores más utilizados en minas subterráneas son aquellos que detectan los productos de combustión, principalmente el monóxido de carbono, gases nitrosos y humos. La Figura 4 muestra la manera como un detector de CO es instalado en una galería de transporte. En EE.UU., por ley, todas las minas subterráneas que utilizan bandas transportadoras para la extracción del mineral fragmentado a la superficie requieren de un sistema de monitoreo de gases (CO en particular) y un sistema de supresión de incendios.



(a)



(b)

Figura 4. Detector de monóxido de carbono: (a) Instalación del detector en una galería de transporte y (b) Muestra de un detector de CO manufacturado por la Compañía Conspec.

Los detectores, una vez instalados y calibrados, pueden ser utilizados para determinar la calidad del aire en la mina casi instantáneamente. Estos

detectores, además de determinar la calidad del aire en una sección o distrito, pueden ser configurados para generar tendencias de

concentraciones y para activar sistemas de alerta y alarma. Una explosión genera un diagrama de concentraciones de CO que aumenta rápidamente hasta alcanzar un valor máximo para luego disminuir paulatinamente. Por otro lado, un incendio genera tendencias de CO que aumenta con el tiempo continuamente.

Los siguientes factores deben ser considerados durante la selección y operación de un sistema de monitoreo ambiental (Marks, 1989):

- a) *Numero de detectores.* La selección del tipo y la ubicación de los detectores son dos aspectos críticos en el diseño de un sistema de monitoreo ambiental. El número varia con el tamaño de la mina y la ubicación de los frentes de trabajo. Si no se cuenta con el número adecuado, entonces será difícil cubrir toda la mina, por otro lado, si se cuenta con muchos detectores, los costos de operación y mantenimiento aumentan rápidamente. Para tener un sistema confiable, se recomienda tener por lo menos un detector de CO o humo en cada entrada y salida de la mina, dos sensores en cada taller subterráneo y frente de trabajo. Para minas profundas y extensas, se recomienda aumentar el número de detectores en función de la distancia de las labores y velocidad del aire.
- b) *Ubicación de detectores.* La ubicación de los sensores depende en gran medida de la cantidad del combustible almacenado y el sistema de ventilación. En áreas de alto riesgo, por ejemplo, en un taller de equipos a diésel, los detectores deben ser ubicados cerca de los puntos de ignición. Por otra parte, en los talleres eléctricos, donde no es posible detectar cantidades significativas de gases antes del incendio, entonces, los detectores deben ser ubicadas cerca de los puntos de ignición. Además, los sensores deben protegidos de fuertes corrientes de aire.
- c) *Falsas alarmas.* Las falsas alarmas ocurren por muchas razones. Las más comunes son

causadas por interferencia de otros gases. Cada sensor tiene una vida útil de más o menos un año. Para obtener resultados confiables, los sensores deben ser calibrados y mantenidos cada tres meses. La presencia de otros gases, como aquellos de los equipos a diésel, pueden afectar los resultados. Estos pueden ser identificados utilizando detectores múltiples, que permiten discriminar los gases del escape de los productos de combustión. Otra alternativa para reducir falsas alarmas es añadir en el software del sistema un retraso en la activación de las señales de alarma (Laage, 1999 y MEA, 2006).

5. PREVENCIÓN DE INCENDIOS

Prevención de incendios y planificación previa contra incendios son dos conceptos diferentes, pero complementarios. *Prevención* significa ejecutar una o varias acciones para reducir el riesgo con anterioridad a un incidente. El objetivo principal es reducir el riesgo de iniciar un incendio y evitar su propagación. Reducir el riesgo implica minimizar el uso de materiales combustibles e inflamables en la mina y mantenerlos lejos de los puntos de ignición. Evitar la propagación significa evitar que un incendio pequeño se convierta en un evento catastrófico. Los principios básicos de prevención de incendios están resumidos en los códigos de seguridad y regulaciones de cada empresa. Las normas prescriben los requerimientos mínimos para tener condiciones aceptables de trabajo y establecen responsabilidades tanto para el personal técnico como para los trabajadores. Por otra parte, las regulaciones, son reglamentos internos establecidos por el operador de la mina para alcanzar metas específicas siguiendo las normas con un cierto margen de seguridad. *Planificación previa* significa tener en la mina todas las construcciones, equipos, materiales, procedimientos de operación y personal especializado para responder a situaciones de emergencia. En realidad, implica tener un plan de

trabajo elaborado por los responsables de cada departamento o sección para controlar situaciones de emergencia desde el principio de las operaciones.

5.1 Responsabilidad del gerente y supervisores

Es responsabilidad del gerente proveer a la mina con un manual sobre prevención de incendios y protección de los trabajadores especificando las normas y regulaciones, jerarquía de control de riesgos (ingeniería, cumplimiento de normas y capacitación), deberes del personal, equipos y procedimientos para controlar incendios. Además, el manual debe incluir un resumen del programa de entrenamiento del personal en técnicas de prevención de incendios, inspecciones de los lugares de trabajo, rutas de escape, ubicación de cámaras de refugio y simulacros de evacuación. El programa debe ser elaborado por un equipo técnico, revisado por auditores externos, y compartido con los trabajadores.

En sus partes salientes, las inspecciones de seguridad deben incluir los siguientes tópicos: limpieza del lugar de trabajo, fuentes de combustión e ignición, detectores y mecanismos de alarma, primeros auxilios, rutas de evacuación y mantenimiento de extintores. Las inspecciones, una vez concluidas, permitirán a los responsables identificar y corregir las condiciones y actitudes inseguras en la mina (MSHA, 2003). Por otra parte, los simulacros de evacuación permiten a los trabajadores a familiarizarse con los procedimientos de evacuación, incluyendo los sistemas de comunicación disponible, lugares de almacenamiento de combustibles, fuentes de ignición y finalmente conocer las rutas de escape a la superficie o una cámara de refugio. Por su importancia, estas prácticas deben ser repetidas cada seis meses (Conti, 2001).

5.2 Responsabilidades del ingeniero de ventilación

El ingeniero de ventilación juega un papel importante en la preparación de incendios por las siguientes razones (Marks, 1989 y Brake, 2008):

- Conoce la ubicación y el estado de las principales entradas y salidas de la mina
- Conoce las características de los ventiladores primarios y secundarios
- Conoce la ubicación y las características de los controles de ventilación
- Conoce la calidad del aire en los diferentes lugares de trabajo y
- Puede pronosticar los efectos de cambios en el sistema de ventilación.

Para alcanzar los objetivos anteriores es necesario tener: (1) un plan completo del sistema de ventilación y (2) un ingeniero de ventilación residente en la mina. El plan debe incluir todos los aspectos relacionados a ventilación desde el diseño preliminar de las operaciones de desarrollo, hasta sistemas más detallados de la fase de producción. La mina profundiza o se hace más extensa con el tiempo. El sistema de ventilación debe ser suficientemente flexible para satisfacer los requerimientos con un cierto margen de seguridad. El ingeniero de ventilación es generalmente un especialista capacitado no solo para hacer cumplir las normas y regulaciones sino también para identificar peligros y evaluar riesgos. Como tal, él debe tener la suficiente experiencia en diseñar e implementar sistemas de ventilación, conducir mediciones de cantidad y calidad del aire, determinar los riesgos y participar en la toma de decisiones en la ejecución de proyectos.

En muchos casos, los ingenieros de ventilación no son reconocidos por la gerencia como “parte de equipo” durante la planificación. Esta práctica es muy peligrosa que puede terminar con el cierre temporal o total de la mina. La explosión de la mina de carbón de Westray, de Nueva Escocia, Canadá (1992), es un ejemplo de incidentes de esta clase. En esta mina, casi todas las actividades mineras fueron planificadas e implementadas solo en base a producción y costos, relegando los aspectos de seguridad y ventilación a un segundo plano. En esta mina, debido a una mala planificación, una chispa producida por fricción de los dientes de un minero continuo contra la

roca causo una explosión que termino con la vida de todos los trabajadores que trabajaban durante el turno (McPherson, 2002).

5.3 Obligaciones de los trabajadores

Todos los trabajadores, supervisores, empleados y contratistas tienen la obligación de mantener sus lugares de trabajo limpios, libres de combustibles y puntos de ignición, y utilizar las buenas prácticas de la industria. Es responsabilidad del gerente proveer los equipos y materiales de prevención de incendios, desarrollar los procedimientos de operación, entrenar a los trabajadores en temas de salud y seguridad, identificar los peligros y controlar los riesgos. Es responsabilidad de cada trabajador conocer los procedimientos de operación, realizar inspecciones por condiciones y practicas inseguras, reportar los defectos a los supervisores, controlar la emisión de sustancias peligrosas y cuidar por la salud y seguridad de otros. Esta tarea no es simplemente seguir las normas y regulaciones sino ir más allá para tener un cierto margen de seguridad (Brake, 2008). En una mina subterránea, el trabajador puede contribuir efectivamente a prevenir incendios “pensando dos veces antes de arrojar los restos de su cigarrillo al suelo, el soldador verificando tres veces su área de trabajo por combustibles y materiales inflamables y el ingeniero de ventilación teniendo una visión perfecta al diseñar su sistema de ventilación” (Marks, 1989).

6. ENTRENAMIENTO DEL PERSONAL

En todos los países industrializados, las normas obligan a los operadores de una mina a capacitar a los trabajadores en prevención y control de incendios. Estas son generalmente impartidas dos veces por año. El objetivo es proporcionar a todos los trabajadores los medios y procedimientos para controlar un incendio antes de que este se convierta en un incidente catastrófico. Con este objetivo, los trabajadores deben ser capacitados en los siguientes tópicos:

- Combustibles y fuentes de ignición
- Detección de incendios

- Protocolo de comunicación
- Extintores y métodos de supresión de incendios
- Planes de evacuación y rescate.

Varios tipos de combustibles son utilizados en una mina. Los más comunes son: diésel, lubricantes, madera y plástico. La utilización de estos materiales cambia con el tiempo. En el pasado, la madera era utilizada como medio de soporte. Hoy, con la mecanización, la madera ha sido reemplazada por otros medios mucho más resistentes al fuego. La mecanización, muy a pesar de sus grandes ventajas, trajo consigo muchos peligros y nuevos factores por controlar. Hoy, casi todas las minas dependen de motores a diésel y equipos eléctricos. Estos equipos tienen sus propios peligros. Los equipos a diésel son fuentes de combustión e ignición y los equipos eléctricos, definitivamente son fuentes de ignición. Los trabajadores deben ser entrenados en identificar los combustibles utilizados, las posibles fuentes de ignición y los controles disponibles en la mina.

Los incendios son usualmente detectados por los trabajadores ya sea observando sus efectos como la presencia de humos o sintiendo el olor de algún gas. Si estos efectos provienen de algún lugar específico, entonces el origen del fuego puede ser identificado fácilmente. Sin embargo, si los humos provienen de un lugar desconocido, por ejemplo, de una zona abandonada, entonces estos pueden causar una confusión y demorar una respuesta oportuna. Pero hoy, en casi todas las minas, los incendios son detectados por medio de detectores del monóxido de carbono. La utilización efectiva de estos detectores depende de tres factores: (1) tamaño de incendio, (2) el tiempo de transporte del humo o CO al detector y (3) sensibilidad del sensor. El tamaño del incendio depende de la cantidad y tipo de combustible. El tiempo de transporte del gas o humo depende de la velocidad del aire y la ubicación del sensor en relación al lugar de ignición. La sensibilidad del sensor es otro factor

de importancia. A pesar de que los detectores están equipados con sensores de respuesta casi instantánea, estos pueden ser programados para mostrar los resultados cada cierto tiempo, por ejemplo, cada 2 min. Este tiempo puede ser suficiente como para aumentar la intensidad del incendio. De entre todos los factores, una detección oportuna es la clave para controlar un incendio. Una vez detectado el incendio, el siguiente paso es saber transmitir la información (quién, dónde y qué) a los supervisores. Si los trabajadores están bien entrenados en control de incendios, entonces ellos pueden iniciar la lucha contra el incendio cuando este está en su estado inicial, alargando el tiempo de propagación. Sin embargo, si los trabajadores no están bien entrenados, entonces, es más seguro que ellos solo podrán reportar el incidente y retirarse del lugar. El tiempo es un factor crítico bajo estas circunstancias y unos segundos ahorrados en extinguir el fuego pueden hacer la diferencia entre una evacuación y un desastre (Conti et al., 2005).

Muchos incendios incipientes (pequeños) han sido controlados por los trabajadores usando extintores portátiles. Hay varios tipos de extintores, pero los más comunes son aquellos de polvo químico y el de dióxido de carbono. Utilizando estos extintores, el fuego puede ser controlado ya sea reduciendo el volumen del oxígeno dirigido hacia el fuego o bajando la temperatura del material incandescente. Por norma, todos los equipos móviles y los talleres deben estar equipados con el número adecuado de extintores adecuados y estos deben ser mantenidos cada seis meses.

Cuando un incendio no es controlado en los primeros 15 minutos, la única alternativa segura es evacuar el personal a la superficie o a una cámara de refugio. De acuerdo a las normas, todas las minas deben tener dos rutas independientes de escape a la superficie. De no ser posible tener una segunda ruta, entonces, esta puede ser reemplazada por una o varias cámaras

de refugio. Por su importancia, los trabajadores deben recorrer sus rutas de escape durante los simulacros de evacuación (Conti et al., 2005). En muchas minas el entrenamiento del personal es reducido a leer mapas o escuchar a alguien describir sobre una evacuación. Para tener una visión completa, es imprescindible conducir simulacros de evacuación periódicamente. Estas prácticas permiten al trabajador navegar en ambientes de reducida visibilidad, conocer las rutas de escape y la ubicación exacta de los controles de ventilación (Marks, 1989).

La evacuación del personal requiere de un plan completo o mapa de evacuación de la mina. En sus partes salientes, el plan debe incluir los siguientes aspectos: (1) sistemas de comunicación, (2) rutas de escape de cada lugar de trabajo a la superficie o a un lugar de refugio, y (3) un procedimiento de evacuación. Las minas utilizan diferentes sistemas de comunicación desde radios y teléfonos, hasta sistemas electrónicos de notificación visual y audible. Los trabajadores deben estar capacitados en utilizar estos equipos, responder las notificaciones y dirigirse a un lugar preestablecido. Las rutas de evacuación son pasajes de aire limpio (como galerías, chimeneas y rampas), mantenidos libre de combustibles, y equipados de dispositivos para facilitar una evacuación ordenada del personal. Un factor importante por considerar en la selección de las rutas es el tiempo de escape que es alargado por muchos factores, incluyendo las dificultades de comunicación, poca visibilidad en las rutas y el agotamiento físico de los trabajadores.

Finalmente, el programa de entrenamiento debe incluir aspectos relacionados al rescate del personal atrapado en la mina. Para este fin, es necesario contar con patrullas/grupos/o brigadas de rescate equipados con respiradores autónomos y accesorios de seguridad. Una patrulla o grupo de rescate consiste de un grupo de trabajadores entrenados en técnicas avanzadas de rescate de trabajadores atrapados, primeros auxilios y en la lucha contra incendios. El grupo, formado por

trabajadores de diferentes especialidades, requiere de equipos especiales de protección personal, sistemas de comunicación, mapas actualizados, etc. Es responsabilidad del gerente adquirir estos equipos e instalarlos en la mina. Es también responsabilidad del gerente tener estos grupos de rescate preparados durante las 24 horas del día o tenerlos bajo una lista de emergencia. Para minas pequeñas, la alternativa es coordinar con el personal de rescate de otras minas o el cuerpo de bomberos de la ciudad próxima (Launhardt, 2001).

7. OTROS ASPECTOS DE SEGURIDAD

En esta sección se reiteran siete aspectos típicos de seguridad relacionados a incendios: cuatro sobre ventiladores y controles de ventilación, uno sobre refugios y dos sobre cambios repentinos en las propiedades del aire. En general, el estatus de operación de los ventiladores y puertas de ventilación nunca deben ser alterados sin antes analizar sus posibles consecuencias. Acelerar un ventilador a su máxima capacidad es muy peligroso. Esta acción puede resultar en la destrucción del ventilador. Asimismo, tratar de abrir una puerta de ventilación sin tomar las precauciones necesarias puede resultar en accidentes serios. Las cámaras de refugio juegan un papel impórtate en la protección del personal durante un incendio, pero estas deben ser mantenidas periódicamente. Finalmente, la deficiencia del oxígeno y las ráfagas del viento son dos casos especiales de ventilación que cuando ocurren, generalmente resultan en eventos catastróficos.

7.1 Cambios en el sistema de ventilación

Cualquier cambio en el sistema de ventilación, por ejemplo, la interrupción de un ventilador primario, implica cambiar la distribución del aire en la mina. Si bien apagando un ventilador primario es posible reducir el caudal de aire dirigido hacia el fuego, esta práctica puede tener muchos efectos negativos. Cuando un ventilador primario es apagado, por cambios de presión, las puertas de ventilación pueden ser abiertas y las fugas de aire por los muros pueden cambiar de

dirección. Estos cambios pueden ser suficientes para revertir la dirección del aire en las rutas de escape y sorprender a los trabajadores con productos de combustión. Los cambios en los ventiladores primarios nunca deben ser realizados sin antes analizar sus posibles consecuencias.

7.2 Ventiladores primarios

Los ventiladores primarios, aspirantes o soplantes, no deben ser apagados o alterados durante un incendio. Una vez detectado el incendio, todos los trabajadores son retirados de las zonas afectadas a otras de menor riesgo. Durante este periodo, todos los conductos de ventilación, galerías, pozos o chimeneas, deben ser mantenidos con sus caudales y direcciones inalteradas, especialmente cuando el incendio ocurre en un turno normal de trabajo. Bajo estas condiciones, los trabajadores saben exactamente las rutas de escape de la zona afectada. Si las corrientes de aire son alteradas, los trabajadores podrían estar expuestos a productos de combustión. Una interrupción del ventilador primario solo es permitida bajo condiciones controladas. Además, dicha decisión, al igual que cualquier cambio de ventilación, debe ser aprobada por gerente de la mina.

7.3 Recirculación descontrolada del aire

Cuando una sección o distrito de una mina es ventilada por dos ventiladores: uno primario y otro secundario, durante un incendio, la interrupción del ventilador primario, cuando el otro sigue funcionando, puede causar una recirculación descontrolada de contaminantes por los frentes de trabajo. Una recirculación descontrolada es un peligro para los trabajadores porque devuelve una parte del aire viciado a una sección. Cuando el aire recirculado contiene gases inflamables, el riesgo de iniciar un incendio es más alto. El riesgo puede ser reducido utilizando un mecanismo de control eléctrico o electrónico para operar estos ventiladores de una manera sincronizada. En su forma simple, este mecanismo permite al operador verificar el status de operación los ventiladores y apagar el ventilador secundario cada vez cuando el

ventilador primario es interrumpido por alguna razón. En muchos países, por norma, los ventiladores secundarios solo pueden utilizarse cuando están equipados con estos mecanismos de control. Además, para reducir otros riesgos de

operación, estos ventiladores deben ser equipados con detectores de gases inflamables y sistemas automáticos de supresión de incendios (Figura 5).

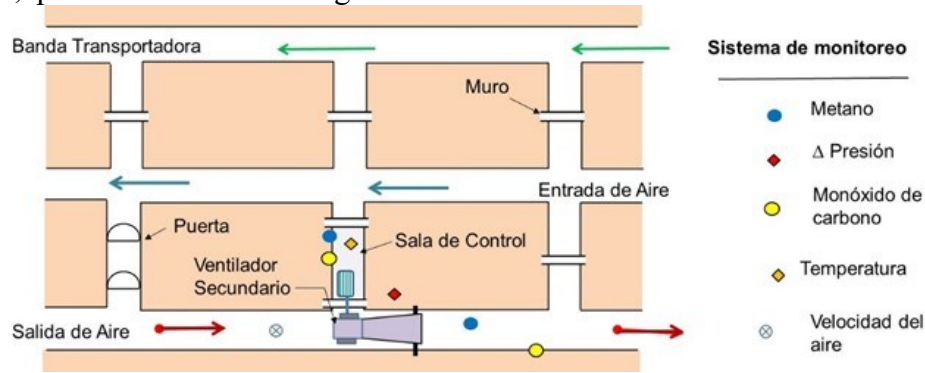


Figure 5. Sistema de monitoreo ambiental de un ventilador secundario

7.4 Puertas de seguridad

Dos tipos de puertas son utilizados en las minas subterráneas: puertas de ventilación y puertas de seguridad. Las puertas de ventilación, simples o múltiples, en series, son utilizados para separar el aire limpio del contaminado o para aislar circuitos de ventilación con diferentes presiones. Por tanto, estas puertas deben ser mantenidas siempre cerradas. Si una puerta de ventilación está abierta o mantenida semicerrada, entonces habrá por lo menos una sección que no está bien ventilada. En general, los trabajadores de las secciones más alejadas sufrirán las consecuencias por no recibir el caudal de aire que les corresponde. En caso de un incendio, una puerta de ventilación abierta puede causar un corto circuito de aire y hacer recircular los productos de combustión. Por estas razones, estas puertas nunca deben ser abiertas sin antes analizar sus posibles consecuencias. Por otro lado, las puertas de seguridad, ubicadas en las entradas principales de una mina y en los accesos a talleres subterráneos, deben ser mantenidas abiertas, excepto cuando ocurre un incendio, en tal caso, estas puertas son cerradas para reducir el flujo de aire hacia la zona afectada y controlar el incendio por agotamiento del oxígeno. Ahora, en EE.UU., por norma todas las entradas principales a la mina y los accesos a pozos de aire fresco y talleres y depósitos subterráneos están protegidos

por puertas de seguridad. Si el incendio ocurriera dentro de un lugar confinado, lejos de las entradas o en un taller, entonces estas puertas deben ser cerradas para reducir el flujo de oxígeno al lugar del incendio.

7.5 Cámaras de Refugio

En muchos países, por ley, las minas subterráneas deben contar por lo menos con dos rutas independientes de evacuación del personal a la superficie. Si por alguna razón no es posible contar con una segunda ruta, entonces la mina debe contar por lo menos con una cámara de refugio. La cámara debe estar situada en una entrada de aire, y tener una capacidad amplia para albergar a todos los trabajadores de una sección. La cámara debe estar situada en un lugar estratégico, próximo a los frentes de trabajo y a una distancia en que un trabajador pueda cubrirla en un tiempo no mayor a 30 minutos, que es el tiempo de supervivencia con un equipo de auto rescate (SCSR). Las dimensiones de la cámara son determinadas en función del número de trabajadores, un caudal mínimo de aire de 13 m³/día por trabajador y un periodo de residencia no menor de dos días (McPherson, 1993). La cámara debe estar equipada con recipientes o ductos de aire comprimido y agua potable, un sistema de comunicación con superficie, detectores de gases y temperatura y equipos de primeros auxilios. Además, la cámara debe estar provisto de un

contenedor de alimentos, un compartimento sanitario y un sistema de purificación del aire o un taladro conectado a la superficie (ver Figura 6). Todos los trabajadores deben ser entrenados en las prácticas de evacuación y mantenimiento de estas cámaras. Estas prácticas, además de los

conocimientos teóricos, requieren de un esfuerzo físico y disciplina, especialmente en estos tiempos cuando los trabajadores ya no caminan por las galerías ni suben escaleras por chimeneas para para realizar un trabajo.

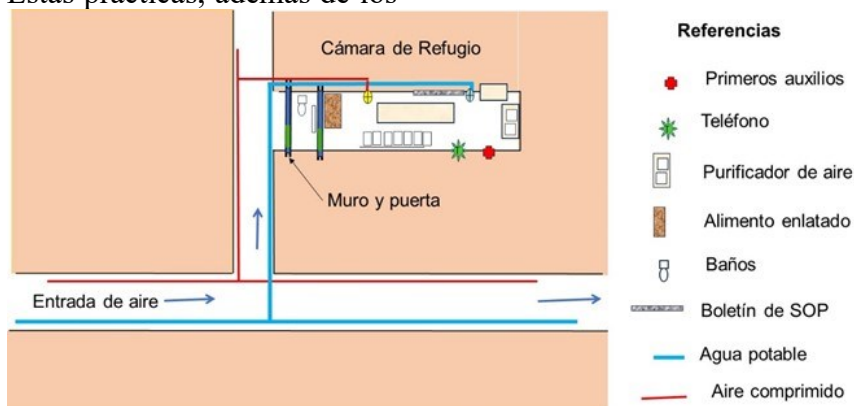


Figura 6. Cámara de refugio equipado para una sección de trabajo (planta).

7.6 Deficiencia del oxígeno

El aire normal contiene 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno por volumen. En una mina subterránea, la concentración del oxígeno disminuye debido a muchos factores, incluyendo el desplazamiento del oxígeno por otros gases, por reacción química con minerales combustibles y por consumo por las máquinas a diésel. Para minas subterráneas, el límite inferior permisible es de 19.5%. Cuando la concentración del oxígeno es menor a este límite, entonces el lugar es conocido como un ambiente con deficiencia de oxígeno. Generalmente, esta deficiencia no es detectada por los trabajadores sino por medio de detectores de oxígeno. Los síntomas más relevantes de esta deficiencia son: dificultades en encender una lámpara al 16%, mareo al 14% y pérdida de conocimiento al 10 % (McPherson, 1993 y Hartman, 1997).

En un ambiente cerrado, el efecto más peligroso ocurre cuando el lugar es mantenido con poco o sin movimiento de aire como en las galerías ciegas sin ventilación auxiliar. Por seguridad, estas labores deben ser mantenidas bien ventiladas o aisladas por muros herméticos. La historia de la minería cuenta muchos incidentes ocasionados por deficiencia de oxígeno, en

particular, cuando los frentes ciegos no fueron evaluados por calidad del aire. Un ejemplo ilustrativo es el caso de un accidente en la mina Homestake de EE.UU. Hace varias décadas, tres trabajadores (dos estudiantes y un obrero) bajaron a un rajo relleno con mineral sulfuroso de baja ley anteriormente. El rajo no estaba bien ventilado. Aparentemente, los minerales sulfuros del relleno se oxidaron y crearon un ambiente con deficiencia de oxígeno. Los tres trabajadores perecieron por falta de oxígeno (Marks, 1989).

7.7 Ráfagas de viento

En una mina subterránea, una ráfaga de viento es inducida por uno de los siguientes factores: (a) detonación de grandes volúmenes de roca y (b) caída masiva de mineral en zonas de hundimiento. Generalmente, las ráfagas ocurren en minas subterráneas donde se forman grandes cavidades que colapsan o cuando el mineral es explotado por un método de hundimiento por bloques (block caving). Utilizando un método de hundimiento, es posible crear grandes cavidades llenas de aire por encima del nivel de producción. Cuando el techo de una de estas cavidades fracasa, el material inestable de la bóveda actúa como un pistón sobre la cavidad,

descargando ráfagas de aire por todas las conexiones posibles. Estas, por sus altas presiones, representan peligros ocupacionales para los trabajadores. Cavidades de hasta 15.000 m² de área y 140 m de altura fueron reportados en la mina de “El Teniente” en Chile. El colapso de una de estas cavidades produjo corrientes de aire de hasta 500 km/h y causó daños materiales de consideración. Estas pueden ser evitadas monitoreando el rajo abierto, visualmente y/o usando detectores sísmicos, estimando el tamaño del vacío creado por la extracción del mineral, manteniendo las tolvas con carga y evitando un colapso repentino del techo (De Nicola & Tapia 2000).

Caídas repentinas del techo en zonas explotadas ocurren también en minas subterráneas de carbón de profundidad moderada, donde los estratos suprayacentes son muy resistentes y no son soportados por pilares. Además de la ráfaga, el hundimiento casi siempre viene acompañado por una liberación masiva del metano y una fuente de ignición (fricción), que eventualmente termina con una explosión. El colapso de la mina “Coalbrook” de Sud África de 1960 es un ejemplo de este tipo de accidentes. La catástrofe fue el resultado de un colapso repentino, en menos de cinco minutos, de más de mil pilares en un área de 2.6 km² y a una profundidad de 143 m. El hundimiento de la roca suprayacente comprimió el aire y generó ondas de presión de hasta 33 atmósferas (33 x 105 kPa). El incidente cobró la vida de 437 trabajadores (McPherson, 1980). Las ráfagas de viento de esta clase pueden ser controladas dimensionando los pilares en función de la máxima carga suprayacente, reduciendo el porcentaje de extracción del mineral y aislando las zonas explotadas por medio de muros herméticos de alta presión.

8. CONCLUSIONES

En una mina subterránea, los incendios y explosiones son los peligros de mayor riesgo. Ambos, si ocurren, tienen costos elevados en términos de fatalidades, lesiones y enfermedades, gastos incurridos durante el rescate, y finalmente, pérdidas económicas en producción y equipos. Para reducir los riesgos,

todos los trabajadores deben ser capacitados en temas de prevención de incendios, y procedimientos de evacuación del personal a la superficie.

Dos casos clásicos son utilizados para ilustrar las principales causas y consecuencias de un incendio: (1) en una mina metálica (Sunshine, EE.UU., 1972) y (2) en una mina de carbón (Westray, Nueva Escocia, Canadá, 1992). Por sus características, estos incidentes mostraron todas las debilidades de programas de prevención de incendios de esa época y sirvieron de base para la promulgación de nuevas leyes para la protección de los trabajadores de incidentes serios como los incendios.

La prevención de incendios es la parte más importante de cualquier programa de seguridad. Un programa de prevención requiere de la participación de todos los trabajadores, supervisores y empleados. Es responsabilidad del gerente de proveer a los trabajadores un manual completo de prevención y control de incendios especificando los deberes y obligaciones de todos los trabajadores, la jerarquía de control de riesgos y procedimientos para facilitar una evacuación ordenada del personal a la superficie. Es responsabilidad de cada trabajador entender los procedimientos de operación, realizar inspecciones por condiciones y prácticas inseguras, reportar los defectos a los supervisores, controlar la emisión de sustancias peligrosas y cuidar por la salud y seguridad de otros.

Un programa de prevención y control de incendios debe incluir las normas y regulaciones vigentes, los requerimientos básicos y los deberes y obligaciones de todos los trabajadores. El objetivo es proporcionar a los trabajadores las herramientas básicas, equipos y procedimientos para controlar los incendios antes de que estos se conviertan en incidentes catastróficos.

Los trabajadores deben ser capacitados (instruidos y evaluados) en los siguientes tópicos:

- Combustibles y fuentes de ignición
- Detección de incendios
- Protocolo de comunicación

- Extintores y otros métodos de supresión de incendios
- Planes de evacuación y rescate.

Además, el programa de prevención de incendios debe incluir inspecciones “sorpresa” de los lugares de trabajo y simulacros de evacuación. Las inspecciones permiten a los supervisores identificar las condiciones y prácticas inseguras. Los simulacros permiten a los trabajadores familiarizarse con los equipos de comunicación, fuentes de combustión e ignición y las rutas de escape. Por su importancia, los simulacros de evacuación deben ser repetidos por lo menos dos veces al año y por turno.

En todos los casos, el tiempo de reacción a un incendio es un factor crítico. Si no es posible controlar un incendio en los primeros 15 minutos, la única alternativa segura es evacuar el personal de la mina a la superficie o a una cámara de refugio.

REFERENCIAS

- Brake D. J., 2008.** Ventilation Emergencies (Egress & Entrapment). Published by Mine Ventilation Australia, Brisbane.
- Conti R. S., 2001.** Responders to Underground Mine Fires. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Pittsburgh Research Laboratory. Conference Paper. 12 p.
- Conti R. S. et al., 2005.** Fire Response Preparedness for Underground Mines. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Pittsburgh Research Laboratory. IC C 9481.
- DeRosa M., 2004a.** Analysis of Mine Fires for All U.S. Metal/Nonmetal Mining Categories, 1990–2001. National Institute for Occupational Safety and Health, IC 9476.
- DeRosa M., 2004b.** Analysis of Mine Fires for All U.S. Underground and Surface Coal Mining Categories: 1990–1999. National Institute for Occupational Safety and Health, IC 9470.
- Eschenburg H. M., 1982.** Underground Fires. Chapter 30. Environmental Engineering in S.A. Mines. The Mine Ventilation of South Africa. Cape Town, South Africa.
- Hartman H., et al., 1997.** Mine ventilation and air conditioning. John Wiley & Sons Inc. 3rd edition.
- Jarrett S. et al., 1975.** Final Report of Major Mine Fire Disaster, Sunshine Mine, Sunshine Mining Company, Kellogg, Idaho. USBM, 1970-1075.
- Laage L., 1999.** Mine Instrumentation and Atmospheric Monitoring Systems. Chapter 21. In Practical Mine Ventilation Engineering by J. Tien. Intertec Publishing Co, Chicago, IL, US.
- Launhardt E., 2001.** Emergency Preparedness and Response. Mine Health and Safety Management. Karmis M., Editor. Chapter 15, SME Inc. Littleton, CO, US.
- Leeming J.R., 2010.** Minimizing the fire hazard from the use of belt conveyors in intake roadways. Proceedings of the 13th US/North American Ventilation symposium. Hardcastle & McKinnon (Eds.). MINARCO – Mining Innovation. Sudbury, Ontario, Canada.
- Marks J., 1989.** Nuts and Bolts Ventilation Planning for hard Rock Mines. Pre-symposium Short-Course Notes, Presented at the 4th U.S. Mine Ventilation Symposium, Berkeley, CA, US.
- McPherson M.J. 1980.** Air Pressure Developed in Collapsing Mine Workings. Proceedings of the 2nd International Mine Ventilation Congress. Mousset-Jones, Editor. SME of AIME, New York, NY, US.
- McPherson M.J., 1993.** Subsurface Ventilation and Environmental Engineering. Chapman & Hall, London SE1 8HN, UK.
- McPherson M.J. 2002.** The Westray mine Disaster. Proceedings of the 9th US Mine Ventilation Symposium. De Souza, Editor. Swets & Zeitlinger, Lisse, The Netherlands.
- MEA (Mine Education Australia), 2006.** Underground Mine Environment Course, Module 8, Metalliferous mine ventilation, The University of New South Wales, Australia.
- MSHA, 2003.** Fire Safety. U.S. Department of Labor. Safety Manual Series, SM13.
- MSHA, 1998.** Historical Summary of Mine Disasters in the United States, Volume II: Coal Mines, 1958–1998. Beckley, West Virginia: US National Mine Health and Safety Academy.

MSHA, 2024.
<https://www.msha.gov/regulations>
Quiroz R., Mejías. R. & Gutiérrez C., 2018.
Normas de emisión exigible a equipos pesados y livianos, motores diésel en Chile. Primer Simposio Internacional en Ventilación de Minas de Sudamérica. Santiago, Chile.
Smith A.C., Yael M. and Lazzara, C.P. 1988.
Inhibiti on of Spontaneous Combustion of Coal. USBM RI 9196.

Sottle J. & Novak T., 2001. Electrical Safety. Mine Health and Safety Management. Karmis M., Editor. Chapter 27, SME Inc. Littleton, CO, US.

Artículo recibido en: 08.04.2025

Artículo aceptado: 10.05.2025

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL DAMAGE CAUSED BY BLAST VIBRATIONS – CASE STUDY ON PORTUGAL'S MARÃO TUNNEL

Navarro Torres Vidal Felix.¹

¹ Vale Institute of Technology, Brazil

Abstract

This paper deals with an innovative assessment approach of environmental damage and effects on nearby communities caused by blast vibrations generated during tunnel excavation. Moreover, a mathematical model that evaluates particle vibrations at a specific point of interest located at a certain distance from the source on the basis of the depth of detonation, tunnel axis position, explosive charge and the number of holes blasted per delay is presented. A new proposal is presented for the assessment of damage levels. A case study in a populated area surrounding the portal of Portugal's Marão tunnel is conducted. The case study presents vibration data recorded during the detonation of explosive charges around land occupied by humans. Data processing was performed using the multiple linear regression method to obtain the propagation law of vibrations for the area under study, and damage assessment was performed based on Portuguese standard NP 2074 and international standard ISO 2631 for human comfort.

Key words: Blasting, tunnel, environment, blast damage, human comfort

Resumen

Este artículo aborda un enfoque innovador para la evaluación del daño ambiental y los efectos en las comunidades cercanas causados por las vibraciones generadas por explosiones durante la excavación de túneles. Además, se presenta un modelo matemático que evalúa las vibraciones de partículas en un punto específico de interés, ubicado a cierta distancia de la fuente, en función de la profundidad de la detonación, la posición del eje del túnel, la carga explosiva y el número de barrenos detonados por retardo. Se propone un nuevo método para la evaluación de los niveles de daño. Se lleva a cabo un estudio de caso en una zona poblada alrededor del portal del túnel de Marão, en Portugal. El estudio de caso presenta datos de vibración registrados durante la detonación de cargas explosivas en terrenos habitados. El procesamiento de los datos se realizó mediante el método de regresión lineal múltiple para obtener la ley de propagación de vibraciones en el área de estudio, y la evaluación del daño se efectuó con base en la norma portuguesa NP 2074 y la norma internacional ISO 2631 para el confort humano.

Palabras clave: Voladuras, túnel, medio ambiente, daño por explosiones, confort humano.

1. INTRODUCTION

Rock tunnelling using explosives must be performed by scientific procedures

fundamentally based dynamics of rock mechanics science, which enables better understanding of blasting actions in surrounding rock masses. For environmental control of