

74

Directores del capítulo
James R. Armstrong y Raji Menon

Sumario

Visión general de la minería <i>Norman S. Jennings</i>	74.2
Prospección <i>William S. Mitchell y Courtney S. Mitchell</i>	74.4
Tipos de minería de carbón <i>Fred W. Hermann</i>	74.8
Técnicas de minería subterránea <i>Hans Hamrin</i>	74.9
Minas subterráneas <i>Simon Walker</i>	74.17
Minas a cielo abierto <i>Thomas A. Hethmon y Kyle B. Dotson</i>	74.20
Control de la minería del carbón a cielo abierto <i>Paul Westcott</i>	74.24
Procesamiento del mineral <i>Sydney Allison</i>	74.25
Preparación del carbón <i>Anthony D. Walters</i>	74.28
Control del terreno en las minas subterráneas <i>Luc Beauchamp</i>	74.32
Ventilación y refrigeración en las minas subterráneas <i>M.J. Howes</i>	74.35
Iluminación en las minas subterráneas <i>Don Trotter</i>	74.41
Equipos de protección individual en las minas <i>Peter W. Pickerill</i>	74.42
Incendios y explosiones en minas <i>Casey C. Grant</i>	74.44
Detección de gases <i>Paul MacKenzie-Wood</i>	74.47
Preparación de emergencias <i>Gary A. Gibson</i>	74.52
Peligros para la salud en la minería y las canteras <i>James L. Weeks</i>	74.58

● VISION GENERAL DE LA MINERIA

Norman S. Jennings

Los minerales constituyen el elemento base de la mayoría de las industrias. En prácticamente todos los países del mundo se realiza algún tipo de explotación minera. Esta actividad tiene importantes repercusiones económicas, ambientales, laborales y sociales, tanto en los países o regiones en que se practica como a escala global. Para muchos países en desarrollo la minería representa una parte significativa del PIB y, en muchos casos, la partida de entrada de divisas y de inversiones extranjeras más importante.

El impacto de la minería sobre el medio ambiente puede ser considerable y tener consecuencias a largo plazo. Hay muchos ejemplos de buenas y malas prácticas en la gestión y rehabilitación de áreas mineras. El efecto ambiental de las prácticas mineras es una cuestión cada vez más importante para la industria y sus trabajadores. Así, por ejemplo, el debate sobre el calentamiento global puede repercutir en el empleo del carbón en determinadas zonas, el reciclaje de productos reduce la cantidad de nuevos materiales necesarios y el uso creciente de materiales no minerales como los plásticos está afectando al consumo de metales y minerales por unidad del PIB.

La competencia, la disminución de la calidad de los minerales, el aumento de los costes de producción, la privatización y la reestructuración del mercado están obligando a las empresas mineras a reducir los costes y aumentar la productividad. Las elevadas inversiones que requiere la industria minera obliga a estas empresas a utilizar al máximo sus equipos y aplicar procesos más flexibles y a menudo más intensos. El empleo está disminuyendo en muchas áreas mineras debido a factores como el aumento de la productividad, la reestructuración radical y la privatización. Estos cambios afectan a los trabajadores despedidos, que se ven obligados a buscar otro empleo, y también a los que permanecen en la industria, que tienen que demostrar mayores habilidades y flexibilidad en el puesto de trabajo. La búsqueda de un equilibrio entre el deseo de las empresas mineras de reducir costes y el de los trabajadores de mantener sus puestos de trabajo es un tema clave en el mundo de la minería. Las comunidades mineras se están enfrentando a nuevas prácticas, a la reducción del empleo e incluso al cierre de las empresas.

La minería se considera una industria especial con comunidades muy interrelacionadas y trabajadores que realizan un trabajo sucio y peligroso. La minería es también un sector en que muchas de las personas que ocupan los niveles más altos de dirección y muchos trabajadores son ingenieros de minas o antiguos mineros con una amplia experiencia directa en las cuestiones que afectan a la empresa y los trabajadores. Además, los mineros han sido a menudo la élite de los trabajadores industriales y con frecuencia han desempeñado un papel decisivo en la sociedad ante los cambios políticos y sociales.

Cada año se producen cerca de 23 billones de toneladas de minerales. En el caso de los minerales preciosos, la cantidad de residuos generada supera ampliamente la de producto final. Así, por ejemplo, para obtener una onza de oro es necesario tratar unas 12 toneladas de mineral. Con los minerales de menos valor (arena, grava, arcilla, etc.), que representan la mayor parte del material extraído de las minas, la cantidad de material residual tolerable es mínima. Sin embargo, hay que partir del principio de que las minas deben producir como mínimo el doble de la cantidad final necesaria (excluyendo el material de recubrimiento superficial que es posteriormente reubicado y, por tanto, tratado dos veces). Así pues, de forma general, puede decirse que cada año se tratan 50 billones de

toneladas de mineral, lo que equivale a perforar cada año un espacio de 1,5 metros de profundidad del tamaño de Suiza.

Empleo

La minería no es un importante generador de empleo, pues sólo absorbe el 1 % de la mano de obra mundial, es decir, unos 30 millones de personas, de los cuales 10 trabajan en minas de carbón. Sin embargo, por cada puesto de trabajo en la minería existe como mínimo otro que depende directamente de ésta. Además, se estima que al menos otros 6 millones de personas trabajan en minas pequeñas. Por lo tanto, y considerando la población total relacionada con la minería, puede decirse que el número de personas que viven de la minería se acerca a los 300 millones.

Seguridad y salud

Los mineros tienen que trabajar en un entorno laboral en constante transformación. Algunos trabajan sin luz natural o ventilación, excavando la tierra, extrayendo material y, al mismo tiempo, tomando medidas para evitar que se produzca una reacción inmediata de los estratos adyacentes. A pesar de los importantes esfuerzos realizados en muchos países, la tasa mundial de víctimas mortales, lesiones y enfermedades entre los mineros demuestra que, en la mayoría de ellos, la minería sigue siendo el trabajo más peligroso en relación con el número total de trabajadores dedicados a esta actividad. En efecto, aunque la minería sólo emplea al 1 % del total de trabajadores, es responsable de cerca del 8 % de los accidentes laborales mortales (15.000 al año aproximadamente). A pesar de no disponer de datos fiables sobre accidentes, sí resulta significativo su número así como el de trabajadores afectados por enfermedades profesionales (pneumociosis, pérdida de audición y lesiones causadas por vibraciones), cuya incapacitación prematura e incluso fallecimiento son directamente atribuibles al trabajo.

La OIT y la minería

La Organización Internacional del Trabajo (OIT) viene estudiando desde su creación los problemas profesionales y sociales de la industria minera y ha realizado considerables esfuerzos para mejorar el trabajo y la vida de los trabajadores de dicha industria desde la adopción del Convenio sobre las horas de trabajo en la minería (No. 31) en 1931 hasta el Convenio sobre salud y seguridad en la minería (No. 176) adoptado por la Conferencia Internacional del Trabajo en 1995. Durante 50 años, en las reuniones tripartitas sobre minería se han estudiado numerosas cuestiones, que van desde el empleo, las condiciones de trabajo y la formación hasta la salud y la seguridad y las relaciones laborales. Los resultados se resumen en más de 140 conclusiones y resoluciones consensuadas, algunas de las cuales han sido aplicadas a escala nacional, mientras que otras han dado lugar a una actuación de la OIT, como programas de formación y asistencia en Estados miembros, o han permitido desarrollar códigos de prácticas de seguridad y, recientemente, el nuevo estándar de trabajo.

En 1996 se acordó un sistema de reuniones tripartitas más breves y específicas que permitirán identificar y debatir temas concretos relacionados con la minería y, al mismo tiempo, desarrollar los temas de forma práctica en los países y regiones afectados, tanto a escala nacional como por la OIT. En la primera de estas reuniones, que se celebrará en 1999, se abordarán los temas sociales y laborales relacionados con las minas pequeñas.

Los aspectos laborales y sociales de la minería no pueden disociarse de otras consideraciones, ya sean económicas, políticas, técnicas o ambientales. Aunque no existe un modelo que permita garantizar un desarrollo de la industria minera beneficioso para todos los interesados, éste debería de ser el ideal. La OIT está haciendo todo lo posible para contribuir al desarrollo

laboral y social de esta importante industria. Pero no puede realizar su trabajo en solitario, sino que debe contar con una participación activa de los agentes sociales para maximizar su repercusión. La OIT trabaja asimismo con otras organizaciones internacionales atrayendo su atención hacia la dimensión social y laboral de la minería y colaborando con ellas del modo más adecuado.

Dada la naturaleza peligrosa de la minería, la OIT siempre ha estado profundamente preocupada por mejorar la salud y la seguridad profesional en la misma. La Clasificación Internacional de Radiografías de Pneumoconiosis de la OIT es una herramienta reconocida internacionalmente para registrar de forma sistemática anomalías radiográficas pulmonares provocadas por la inhalación de polvos. Dos códigos de prácticas de salud y seguridad tratan exclusivamente de las minas subterráneas y a cielo abierto, mientras que otros se refieren a la industria minera en general.

La adopción en 1995 del Convenio sobre salud y seguridad en la minería, que ha sentado las bases para la actuación a escala nacional en materia de mejora de las condiciones laborales en la industria minera, es importante porque:

- los mineros se enfrentan a peligros especiales;
- en muchos países, la industria minera está cobrando cada vez más auge,
- las normas anteriores de la OIT sobre salud y seguridad profesional y la legislación existente en muchos países resultaban inadecuadas para afrontar las necesidades específicas de la minería.

Las dos primeras ratificaciones del Convenio tuvieron lugar a mediados de 1997 y entrarán en vigor a mediados de 1998.

Formación

En los últimos años, la OIT ha llevado a cabo diversos proyectos de formación para mejorar la salud y la seguridad de los mineros a través de una mayor concienciación, una mejor inspección y una formación en primeros auxilios para casos de accidente. Hasta el momento, las actividades de la OIT han contribuido al progreso de muchos países al adaptar las legislaciones nacionales a las normas de trabajo internacionales y aumentar el nivel de salud y seguridad profesional en la industria minera.

Relaciones laborales y empleo

La presión, cada vez más fuerte, para la mejora de la productividad en un entorno competitivo puede poner en peligro los principios básicos de libertad de asociación y negociación colectiva cuando las empresas ven amenazada su rentabilidad o incluso su supervivencia. Pero unas buenas relaciones laborales basadas en la aplicación constructiva de estos principios pueden contribuir de forma considerable a mejorar la productividad. Este tema se examinó con detalle en la reunión de 1995 y se concluyó que un punto importante es la necesidad de consultar a los interlocutores sociales sobre cualquier reestructuración que resulte necesaria para que tenga éxito y sobre la industria minera en su conjunto para obtener beneficios duraderos. Se convino asimismo que el hecho de flexibilizar tanto la organización como los métodos de trabajo no debería poner en peligro los derechos de los trabajadores ni afectar de forma negativa a la salud y la seguridad de los mismos.

Minas pequeñas

Las minas pequeñas pueden dividirse en dos categorías. La primera abarca minas y canteras pequeñas de materiales industriales y de construcción, operaciones que en su mayoría están dirigidas a mercados locales y que existen en casi todos los países (véase la Figura 74.1). A menudo, este tipo de minas están

controladas por una normativa legal, pero, al igual que en las pequeñas plantas de fabricación, la falta de inspección y de un control riguroso favorecen la existencia de operaciones ilegales.

La segunda categoría es la minería de minerales valiosos, especialmente oro y piedras preciosas (véase la Figura 74.2). Los productos se exportan, por lo general, a través de organismos legales o ilegales. Dado su tamaño y carácter, las leyes resultan inadecuadas e imposibles de aplicar en este tipo de minas.

Las minas pequeñas emplean una gran cantidad de mano de obra, especialmente en las áreas rurales. En algunos países, trabajan muchas más personas en minas pequeñas que en el sector minero establecido. Los datos existentes indican que más de seis millones de personas trabajan en minas pequeñas. Sin embargo y por desgracia, muchos de estos trabajos son precarios y no cumplen la normativa internacional y nacional de trabajo. La tasa de accidentes en las minas pequeñas es, por lo general, seis o siete veces más elevada que en las grandes explotaciones, incluso en los países industrializados. Las enfermedades, provocadas muchas veces por unas condiciones de trabajo poco higiénicas, son muy comunes. Aunque esta es la tónica general en las minas pequeñas, existen también algunas seguras y limpias.

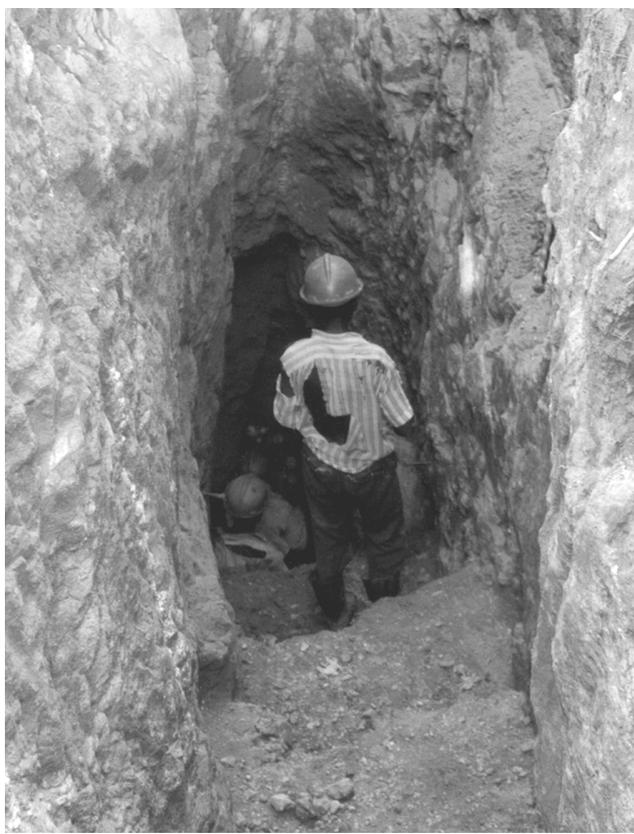
Un problema especial es la utilización de mano de obra infantil. Como parte de su Programa Internacional para la Erradicación del Trabajo Infantil, la OIT está desarrollando proyectos en varios países de África, Asia y América Latina para proporcionar oportunidades educativas y formas alternativas de generación de ingresos y eliminar la mano de obra infantil en las minas de carbón, oro y piedras preciosas en tres regiones de estos países. Estos proyectos están siendo realizados en colaboración con el Sindicato Internacional de Mineros (ICEM) y con organizaciones locales no gubernamentales (ONG) y organismos gubernamentales.

Las ONG también han trabajado con interés y efectividad a escala local para introducir tecnologías adecuadas que mejoren la eficiencia y reduzcan el impacto sobre la salud y el medio ambiente de las minas pequeñas. Algunas organizaciones gubernamentales internacionales (OGI) han realizado estudios y elaborado directrices y programas de acción sobre el trabajo infantil, el papel de la mujer y de los indígenas, la tributación, la reforma catastral y el impacto ambiental, pero hasta el momento

Figura 74.1 • Pequeña cantera en Bengala occidental.



Figura 74.2 • Pequeña mina de oro en Zimbabwe.



parece que su repercusión es reducida. Sin embargo, hay que destacar que, sin el apoyo activo y la participación de los gobiernos, estos esfuerzos difícilmente pueden tener éxito.

Parece que los trabajadores de las minas pequeñas tienen poco interés en utilizar una tecnología barata, disponible y efectiva que mitigue los impactos sobre la salud y el medio ambiente, como los alambiques para recuperar el mercurio. A menudo no existen incentivos para ello, dado que el coste del mercurio no es una restricción. Además, y especialmente en el caso de los mineros itinerantes, no suelen tener interés por rehabilitar la tierra a largo plazo para su uso después de finalizados los trabajos de minería. El reto es demostrar a estos mineros que existen mejores formas de practicar la minería que no limitan sus actividades y que además supondrían un beneficio para su salud y su riqueza y para la tierra, redundando finalmente en beneficio del país. Las "Directrices Harare", desarrolladas en 1993 durante el Seminario Interregional de las Naciones Unidas sobre Directrices para el desarrollo de la minería a pequeña y mediana escala, sirven de guía a los gobiernos y los organismos de desarrollo a la hora de abordar los distintos aspectos de una forma global y coordinada. La falta de participación de las organizaciones de empleadores y de trabajadores en la mayoría de las minas pequeñas confiere una especial responsabilidad a los gobiernos para su incorporación al sector establecido, acción que mejoraría la vida de todos los trabajadores y aumentaría considerablemente los beneficios económicos y sociales de este tipo de minería. Asimismo, en una mesa redonda internacional celebrada en 1995 y organizada por el Banco Mundial, se desarrolló una estrategia para la minería artesanal dirigida a minimizar los efectos secundarios negativos, como las deficientes

condiciones de salud y seguridad de esta actividad y maximizar los beneficios socioeconómicos.

El Convenio sobre salud y seguridad en la minería y su correspondiente Recomendación (núm. 183) fijan con detalle un punto de referencia internacional que sirve de base al elaborar la legislación y las prácticas nacionales. Este punto de referencia, aplicable de forma general a las minas, establece los requisitos mínimos de seguridad que deben presidir cualquier cambio en una operación de minería. Las disposiciones del Convenio ya están siendo incluidas en nuevas legislaciones de minería y en acuerdos colectivos de varios países y las normativas de salud y seguridad promulgadas en muchos otros países superan incluso estas normas mínimas. La futura ratificación del Convenio por parte de todos los países (al conferirle rango de ley) permitirá a las autoridades competentes disponer del personal necesario para supervisar la aplicación de la normativa en todos los sectores de la industria minera. También la OIT supervisará la aplicación del Convenio en los países que lo hayan ratificado.

PROSPECCION

*William S. Mitchell y
Courtney S. Mitchell*

La prospección es la fase anterior a la explotación. La prospección es un negocio de alto coste y riesgo que, en el mejor de los casos, da como resultado el descubrimiento de un filón explotable de forma rentable. En 1992 se invirtieron en todo el mundo 1,2 billones de dólares de EE.UU. en tareas de prospección, cifra que en 1995 casi alcanzó los 2,7 billones. Muchos países promocionan la inversión en prospecciones y existe una gran competencia para sondear áreas de gran potencial. Casi sin excepción, la prospección de minerales es realizada actualmente por equipos interdisciplinarios de prospectores, geólogos, geofísicos y geoquímicos cuya misión es detectar filones en todo el mundo.

La prospección del mineral comienza con un *reconocimiento* o fase *generativa* y continúa con una fase de *evaluación de objetivos* que, en caso favorable, conduce a una *prospección más detallada*. A medida que un proyecto va pasando por las diferentes fases de prospección, va variando también el tipo de trabajo y los aspectos de salud y seguridad.

El trabajo de campo de la fase de reconocimiento suele correr a cargo de pequeños grupos de geocientíficos que disponen de un apoyo limitado en un terreno poco familiar. El reconocimiento puede incluir labores de prospección, sondeo, muestreo geológico, muestreo geoquímico general y preliminar y estudios geofísicos. La prospección más detallada comienza después de la fase de evaluación de objetivos, una vez que se han adquirido los derechos sobre el terreno con los correspondientes permisos, concesiones o alquiler. El trabajo de campo detallado, que comprende operaciones de sondeo geológico, muestreo y estudios geofísicos y geoquímicos, requiere un modelo de control de los estudios. Este trabajo exige con frecuencia la realización de pruebas con utilización de zanjas o perforaciones y equipos pesados como retroexcavadoras, palas eléctricas, aplanadoras, barrenas y, en algunos casos, explosivos. Los equipos de perforación con trépanos de diamantes, giratorios o de percusión pueden estar montados sobre camiones o ser transportados hasta el lugar adecuado sobre plataformas rodantes. En algunas ocasiones se utilizan helicópteros para transportar los equipos de perforación hasta los mismos pozos.

Los resultados de algunos proyectos de prospección son suficientemente alentadores para justificar una prospección más detallada con recogida de grandes muestras o de material a

granel que permitan evaluar las posibilidades económicas del filón. Esta operación puede realizarse mediante perforaciones intensivas, aunque en muchos filones puede ser necesario realizar muestreos subterráneos o con zanjas. A veces, se excavan pozos de prospección, rampas o galerías para acceder al filón. Aunque el trabajo lo realizan los mineros, la mayoría de las empresas encargan a un geólogo el plan previo de muestreo subterráneo.

Salud y seguridad

Antiguamente, las empresas no solían adoptar planes ni métodos para la seguridad en la prospección. Incluso actualmente, los trabajadores de la prospección muestran a menudo una actitud desdenosa hacia los temas de salud y seguridad, por lo que a veces quedan en un segundo plano y no son considerados parte integrante del trabajo del prospector. Afortunadamente, en la actualidad muchas empresas de prospección minera intentan cambiar este aspecto de la cultura de prospección y exigen que trabajadores y contratistas respeten los procedimientos de seguridad establecidos.

Los trabajos de prospección suelen ser de tipo temporal, por lo que son normales las presiones para finalizar el trabajo en un tiempo limitado, a veces a costa de la seguridad. Además, a medida que los trabajos de prospección avanzan hacia fases posteriores, aumentan el número y los tipos de riesgos y peligros. El trabajo de campo de reconocimiento inicial sólo requiere un pequeño equipo de campo y un campamento reducido. Los trabajos de prospección más detallada exigen, por lo general, campamentos más amplios para acomodar a un mayor número de trabajadores y contratistas. Los aspectos de seguridad (en especial, formación en temas de salud personal, riesgos en el campamento y en el lugar de trabajo, uso seguro de los equipos y seguridad de las vías de paso) son muy importantes para los geocientíficos que no tienen experiencia en el trabajo de campo.

Dado que el trabajo de prospección se realiza a menudo en áreas alejadas, la posible evacuación a un centro de atención sanitaria puede ser dificultosa y depender de las condiciones atmosféricas o de la luz. Por lo tanto, antes de comenzar el trabajo de campo es necesario planificar este aspecto cuidadosamente y comprobar los procedimientos y las comunicaciones de emergencia.

Aunque la seguridad al aire libre puede considerarse una cuestión de sentido común, no hay que olvidar que lo que en una cultura se considera de sentido común, en otra puede no serlo. Las empresas mineras deben suministrar a los trabajadores de prospección un manual de seguridad para la región en que trabajan. Un manual detallado de seguridad puede servir de base para reuniones de orientación en el campamento y sesiones de formación y seguridad rutinaria durante todo el período de trabajo de campo.

Prevención de riesgos para la salud personal

Las tareas de prospección imponen a los trabajadores un duro trabajo físico que puede incluir la realización de difíciles travesías, el levantamiento de objetos pesados, el empleo de equipos potencialmente peligrosos y la exposición al calor, el frío, las lluvias y tal vez alturas elevadas (véase la Figura 74.3). Resulta fundamental que, al comenzar el trabajo de campo, los trabajadores se encuentren en buenas condiciones físicas y gocen de buena salud. Deben haber sido vacunados recientemente y no sufrir enfermedades infecciosas (hepatitis, tuberculosis, etc.) que puedan propagarse rápidamente por el campamento. De forma ideal, todos los trabajadores de prospección deberían estar formados y disponer de un certificado de primeros auxilios y de técnicas de supervivencia. Los campamentos o lugares de trabajo más

Figura 74.3 • Perforación en las montañas de la Columbia Británica (Canadá) con un equipo ligero Winkie.



Willen S. Michell

grandes deberían disponer como mínimo de un trabajador con formación y certificado de primeros auxilios de nivel avanzado o industrial.

Los trabajadores al aire libre deben llevar ropa adecuada que les proteja de los rigores atmosféricos como calor, frío, lluvia y nieve. En las regiones con un alto índice de rayos UV, deberían cubrirse con un sombrero de seguridad de ala ancha y utilizar cremas protectoras para la piel de factor de protección alto (SPF). Cuando sea necesario el uso de repelentes contra los insectos, se utilizará un producto que contenga DEET (N,N-dietilmetatoluamida) que es el compuesto más eficaz para evitar las picaduras de mosquitos. Asimismo, la ropa tratada con permectrin protege contra las garrapatas.

Formación. Todos los trabajadores de campo deben recibir formación en temas como manipulación de grandes pesos, uso adecuado de equipos de seguridad homologados (gafas y botas de seguridad, respiradores, guantes protectores, etc.) y medidas para evitar accidentes por insolación, congelación, deshidratación, exposición a rayos UV, protección contra picaduras de insectos o exposiciones a cualquier enfermedad endémica. Cuando trabajen en países en desarrollo, deberían informarse sobre los problemas locales de salud y seguridad, incluida la posibilidad de secuestros, robos y asaltos.

Medidas preventivas en el campamento

Los aspectos de salud y seguridad varían en función del lugar y el tipo de trabajo que se realiza en el campamento. En la instalación de un campamento debe tenerse en cuenta la normativa local sobre incendios, salud y seguridad. Un campamento limpio y ordenado ayuda a reducir el número de accidentes.

Localización. El campamento se montará lo más cerca posible del lugar de trabajo y respetando las normas de seguridad, con el fin de minimizar los desplazamientos y la exposición a los peligros derivados del transporte. Un campamento debe estar situado lejos de cualquier peligro natural, teniendo en cuenta asimismo las costumbres y el hábitat de los animales salvajes próximos al campamento (insectos, osos, reptiles, etc.). Siempre que sea posible, debería situarse cerca de una fuente

de agua potable (véase la Figura 74.4). Cuando se trabaje a gran altura, el campamento debe estar situado a un nivel inferior con el fin de evitar el mal de altura.

Control de incendios y manipulación de combustibles. Los campamentos deberían situarse de forma que las tiendas o estructuras estén relativamente alejadas entre sí para evitar o reducir el peligro de propagación de incendios. El equipo contra incendios debe conservarse en un depósito central, aunque han de existir extintores en las cocinas y edificios de oficinas. La normativa para fumadores contribuye a evitar incendios tanto en el campamento como en el lugar de trabajo. Todos los trabajadores deben participar en los simulacros de incendios y conocer los planes de evacuación en caso de un incendio real. Los combustibles deben estar etiquetados de forma clara para garantizar que se utiliza el correcto para las linternas, estufas, generadores, etc. Los depósitos de combustible deben estar situados como mínimo a 100 m del campamento y a una altura superior al nivel potencial de inundación o marea alta.

Medidas sanitarias. El campamento debe contar con un suministro de agua potable segura. En caso necesario, se comprobará la pureza de la fuente. Si fuera asimismo necesario se almacenará el agua potable en recipientes limpios y etiquetados separados del agua no potable. Los suministros de alimentos deben examinarse a su llegada para comprobar su calidad e introducirse inmediatamente en un refrigerador o almacenarse en depósitos para evitar que puedan acceder a ellos insectos, roedores u otro tipo de animales. Los lavabos deben estar situados cerca de las zonas de comedores y de las letrinas. Estas últimas deben cumplir las normas de salud pública y

Figura 74.4 • Campamento de verano en los Territorios del Noroeste (Canadá).



estar situadas como mínimo a 100 m de cualquier corriente de agua o costa.

Equipo de campamento, equipo de campo y maquinaria. Todos los equipos (sierras de cadena, hachas, martillos neumáticos, machetes, radios, estufas, linternas, equipos geofísicos y geoquímicos) deben mantenerse en buenas condiciones. Cuando, a efectos de seguridad personal, sea necesario utilizar armas de

Figura 74.5 • Perforadora montada sobre un camión en Australia.



Figura 74.6 • Perforación de circulación inversa en un lago helado de Canadá.



William S. Mitchell

fuego contra animales (osos, etc.), su uso estará estrictamente controlado y supervisado.

Comunicación. Es importante establecer planes de comunicación. Una buena comunicación aumenta la moral y la seguridad y es la base de un plan de acción de emergencia.

Formación. Los trabajadores deben estar formados en el uso seguro de todo el equipo. Todos los geofísicos y auxiliares deben recibir formación sobre el uso de los equipos geofísicos de tierra que funcionen con alto voltaje. Otros temas de formación podrían ser la prevención de incendios, los simulacros de incendios y la manipulación de combustibles o de armas de fuego.

Medidas preventivas en el lugar de trabajo

La fase de evaluación de objetivos y la de prospección más detallada requieren la instalación de campamentos de mayor tamaño y el empleo de equipos pesados en el lugar de trabajo. Cuando se utilice maquinaria pesada sólo se permitirá el acceso al lugar de trabajo a los trabajadores con experiencia o a los visitantes autorizados.

Equipos pesados. Únicamente podrá manejar equipos pesados el personal debidamente autorizado y formado. Los trabajadores deben estar siempre alerta y no acercarse nunca a los equipos pesados salvo que estén seguros de que el conductor sabe dónde están, qué quieren hacer y a dónde pretenden dirigirse.

Perforadoras montadas sobre soporte. El personal que maneja este tipo de máquinas debe tener una formación adecuada para este trabajo, llevar el equipo de protección personal adecuado (casco, botas con puntera de acero, protección para los oídos, guantes, gafas ajustadas y mascarillas contra el polvo) y evitar llevar ropa suelta que pueda engancharse en la máquina. Las perforadoras montadas sobre carrillo deben cumplir todos los requisitos de

seguridad (protecciones que cubran todas las partes móviles de la máquina y mangueras de aire de alta presión con fijaciones y cadenas de seguridad) (véase la Figura 74.5). Los trabajadores deben ser conscientes de las condiciones del suelo (escurridizo, húmedo, grasiento o helado) y el área de perforación debe mantenerse lo más ordenada posible (véase la Figura 74.6).

Excavaciones. Los pozos y zanjas se construirán de acuerdo con las normas de seguridad, utilizando sistemas de soporte o con los laterales cortados hacia atrás en un ángulo de 45° para evitar un posible hundimiento. Los trabajadores no deben trabajar o permanecer nunca solos en un pozo o zanja, ni siquiera durante un corto período de tiempo, dado que estas obras se derrumban fácilmente y pueden enterrar a los trabajadores.

Explosivos. Los explosivos sólo deben ser manejados por personal formado y autorizado. Se observará cuidadosamente la normativa sobre manejo, almacenamiento y transporte de explosivos y detonantes.

Medidas preventivas para la estancia sobre el terreno

Los trabajadores de prospección deben estar preparados para trabajar en las condiciones de terreno y clima de su zona de trabajo. El terreno puede ser un desierto, una zona pantanosa, una selva, un terreno montañoso, un glaciar o un campo de nieve. El clima puede ser cálido, frío, seco o húmedo. Entre los peligros naturales pueden encontrarse rayos, incendios forestales, avalanchas, deslizamientos de lodos, inundaciones por riadas, etc. Los insectos, reptiles y/o animales de mayor tamaño pueden representar un peligro para los trabajadores, que no deben arriesgarse o poner en peligro sus vidas por obtener una muestra. Los trabajadores deben recibir formación sobre métodos seguros de afrontar las condiciones del terreno y atmosféricas en que trabajan, así como sobre prácticas de supervivencia para reconocer y combatir la hipotermia, la hipertermia y la deshidratación. Deben trabajar por parejas y llevar suficiente equipo, alimentos y agua (o poder acceder a un depósito de emergencia) que les permita pasar una o dos noches en el campo en caso de necesidad. Los trabajadores de campo deben aplicar un plan de comunicación de rutina con el campamento base. Todos los campamentos móviles deben adoptar y comprobar planes de emergencia por si hubiese que rescatar a trabajadores.

Medidas preventivas de transporte

Muchos accidentes tienen lugar durante los desplazamientos entre el campamento y el lugar de prospección. La conducción de vehículos o barcos a excesiva velocidad y/o después de haber consumido alcohol son aspectos importantes de seguridad.

Vehículos. Entre las causas más habituales de accidentes de vehículos se encuentran las condiciones atmosféricas extremas, unas carreteras peligrosas, la sobrecarga o carga incorrecta del vehículo, unas prácticas no seguras de remolque, la fatiga del conductor, la inexperiencia del conductor, y el cruce de la carretera por animales o personas, especialmente durante la noche. Entre las medidas preventivas para todos los tipos de vehículos se encuentran la utilización de los cinturones de seguridad por parte del conductor y los ocupantes de coches y camiones y la utilización de métodos de carga y remolque seguros; sólo deben utilizarse vehículos adaptados a las condiciones atmosféricas y de terreno de la zona, p. ej., vehículos con tracción a las cuatro ruedas, motos de dos ruedas, vehículos todoterreno o motos de nieve (véase la Figura 74.7). Se procederá a un mantenimiento adecuado y periódico y se les dotará de las correspondientes piezas de repuesto. Para conducir vehículos todoterreno o motos de dos ruedas se utilizará ropa de protección y casco.

Aviones. Para acceder a lugares remotos a menudo es necesario utilizar aviones o helicópteros (véase la Figura 74.8). En este caso, sólo deben contratarse compañías de vuelos chárter que

Figura 74.7 • Transporte de campo en pleno invierno en Canadá.



William S. Mitchell

dispongan de equipos bien mantenidos y un buen nivel de seguridad. Se recomiendan los aviones con motores de turbina. Los pilotos nunca deben rebasar el número legal de horas de vuelo autorizadas ni volar si están cansados o las condiciones atmosféricas no son las adecuadas. Los pilotos deben supervisar la estiba de la carga y cumplir las limitaciones de la carga de pago. Para evitar accidentes, los trabajadores de prospección estarán formados en las técnicas de seguridad en el trabajo en las proximidades del avión y en las operaciones de carga y embarque, evitando situarse en las proximidades de las hélices o de las palas de los rotores, que resultan invisibles cuando están en movimiento. Las zonas de aterrizaje para helicópteros deben mantenerse despejadas, sin objetos que puedan salir proyectados por efecto de las palas de los rotores.

Eslingaje. Los helicópteros se utilizan a menudo para transportar suministros, combustible, perforadoras o equipos del campamento. Entre los principales peligros de esta operación se encuentran la sobrecarga, el uso incorrecto y el mantenimiento deficiente de las eslingas de a bordo y la suciedad de las zonas de trabajo, con restos o equipos que puedan ser lanzados al aire por efecto de las palas, una vegetación excesiva u objetos en los que pueda quedar enganchada la carga. Además, la fatiga de los pilotos, la falta de formación del personal, la deficiente comunicación entre las partes (especialmente entre pilotos y personal de tierra) y las condiciones atmosféricas extremas aumentan los riesgos de la operación de eslingaje. Para un eslingaje seguro y con el fin de evitar accidentes, todas las partes deben aplicar unos métodos de operación seguros y estar totalmente alerta, siendo conscientes de las responsabilidades mutuas. El peso de la carga eslingada no debe exceder de la capacidad de izada del helicóptero. Las cargas deben situarse de tal forma que estén seguras y no puedan deslizarse fuera de la red de carga.

Cuando se realiza una operación de eslingaje con un cable demasiado largo (p. ej., en la jungla o en lugares montañosos

con árboles muy altos), deberían utilizarse maderos o piedras grandes para lastrar el cable durante el viaje de vuelta y no volar nunca con redes vacías ni con cables colgando del gancho de eslingaje. Se han producido accidentes fatales al engancharse en las palas o en el rotor de cola cables colgantes durante el vuelo.

Embarcaciones. Los trabajadores que utilizan embarcaciones para transportar equipos en aguas costeras, lagos de montaña, corrientes o ríos pueden enfrentarse a peligros derivados del viento, la niebla y la existencia de rápidos, bajíos u objetos sumergidos o semisumergidos. Para evitar este tipo de accidentes, los técnicos deben conocer y cumplir los requisitos de la embarcación y el motor y respetar su capacidad de navegación. Debería utilizarse la embarcación mayor y más segura disponible. Los trabajadores deben ir provistos de un sistema de flotación personal (PFD) de calidad siempre que viajen y/o trabajen en embarcaciones pequeñas. Además, todos los botes deben disponer del equipo reglamentario, piezas de repuesto, herramientas, equipos de supervivencia y de primeros auxilios así como cartas actualizadas de navegación y de mareas.

TIPOS DE MINERÍA DE CARBÓN

Fred W. Hermann

La elección del método de extracción del carbón de una mina depende de factores como la topografía, la forma del filón, la geología de las rocas de las capas superiores y los requisitos o limitaciones ambientales. Pero, por encima de todos ellos, son decisivos los factores económicos, como disponibilidad, calidad y coste de la mano de obra necesaria (incluidos supervisores y gestores debidamente formados), idoneidad de las instalaciones de alojamiento, comedores y de ocio para los trabajadores (especialmente si la mina está alejada de un centro de población), disponibilidad de los equipos y la maquinaria necesarios y de trabajadores con experiencia en su manejo, medios y costes de transporte de los trabajadores, suministros necesarios y forma de enviar el carbón al usuario o comprador, existencia del capital necesario para financiar la operación (en moneda del país) y del mercado para el tipo especial de carbón que se va a extraer

Figura 74.8 • Descarga de suministros de campo desde un De Havilland DHC-6 Twin Otter, Territorios del Noroeste (Canadá).



William S. Mitchell

(p. ej., precio al que puede venderse). Un factor fundamental es la *relación de "extracción"*, es decir, la cantidad de capa de cobertura que hay que eliminar con respecto a la cantidad de carbón que puede extraerse. Cuanto más alta es esta relación, menos rentable resulta la explotación de la mina. Un factor importante, especialmente en las minas a cielo abierto, y que por desgracia no suele tenerse en cuenta en la planificación, es el coste necesario para rehabilitar el terreno y el medio ambiente cuando se cierre la mina.

Salud y seguridad

Otro factor crítico es el coste de la protección de la salud y la seguridad de los mineros. Lamentablemente, y en especial en operaciones a pequeña escala, cuando se decide la viabilidad de la explotación de carbón o la forma de llevarla a cabo, se ignoran o subestiman con frecuencia las medidas de protección necesarias.

En realidad, y aunque siempre pueden surgir riesgos imprevisibles (en general debido a factores ajenos a las operaciones de minería), todas las operaciones pueden ser seguras siempre que todas las partes se comprometan a operar de un modo también seguro.

Minas de carbón a cielo abierto

La explotación de las minas a cielo abierto de carbón puede realizarse con diferentes técnicas según la topografía, el área de extracción y los factores ambientales. Todos los métodos incluyen la eliminación de la capa de cobertura para poder extraer el carbón. Las operaciones a cielo abierto, aunque suelen ser más seguras que las de las minas subterráneas, presentan algunos riesgos específicos que deben tenerse en cuenta. El principal es el uso de equipos pesados que, además de causar posibles accidentes, suponen una exposición a gases de escape y ruidos y el contacto con combustibles, lubricantes y disolventes. Las condiciones climáticas, como lluvias torrenciales, nieve o hielo, la escasa visibilidad o el calor o el frío excesivos pueden representar un riesgo adicional. Si se utilizan barrenos para romper la roca, hay que tomar precauciones especiales durante el almacenamiento, el manejo y el uso de los explosivos.

Las operaciones a cielo abierto requieren inmensas escombreras para almacenar los productos de la capa de cobertura. Se debe proceder a los controles necesarios para evitar fallos en el escombrado y proteger tanto a los trabajadores como a la población en general y el entorno.

Minas subterráneas

En este tipo de minería también pueden aplicarse diferentes técnicas, aunque el común denominador es la perforación de galerías que van desde la superficie al filón de carbón, así como el uso de máquinas y/o explosivos para extraer el carbón. En las operaciones dentro de las minas subterráneas, además de la alta tasa de accidentes (la minería del carbón ocupa en todas las estadísticas uno de los primeros lugares en cuanto a puestos de trabajo peligrosos), siempre existe la posibilidad de que se produzca un accidente grave con pérdida de vidas humanas. Las dos principales causas de este tipo de catástrofes son los hundimientos por un entibado deficiente de las galerías y las explosiones e incendios debidos a la acumulación de metano y/o de niveles inflamables de polvo de carbón presentes en el aire.

Metano

El metano es altamente deflagrante en concentraciones del 5 al 15 % y ha sido la causa de muchos accidentes graves en las minas. La mejor forma de controlarlo es introduciendo un flujo de aire que diluya el gas a un nivel por debajo de su punto de deflagración y aspirarlo rápidamente fuera de la zona de trabajo.

En cualquier caso, hay que supervisar continuamente los niveles de metano y establecer una normativa para interrumpir el trabajo cuando la concentración alcance niveles entre 1 y 1,5 % y evacuar la mina rápidamente cuando los niveles se encuentren entre 2 y 2,5 %.

Polvo de carbón

Además de provocar la enfermedad pulmonar denominada *antracosis* cuando es inhalado, el polvo de carbón es deflagrante al contacto con el aire y en combustión. El polvo de carbón transportado por el aire puede controlarse mediante pulverización con agua y aspiración. Se puede recoger filtrando el aire de recirculación o neutralizar añadiendo polvo de piedra en cantidad suficiente para inertizar la mezcla de polvo de carbón y aire.

TECNICAS DE MINERIA SUBTERRANEA ●

Hans Hamrin

En todo el mundo existen minas subterráneas que trabajan con los métodos y equipos más variados. Se cuentan aproximadamente 650 minas subterráneas con una producción anual superior a las 150.000 toneladas, lo que representa el 90 % de la producción minera del mundo occidental. Además, se estima que hay 6.000 minas de menor tamaño con una producción inferior a las 150.000 toneladas. Cada mina es diferente en cuanto a ubicación, instalaciones y operaciones subterráneas, todo ello dependiendo del tipo de mineral que se extrae, la localización y las formaciones geológicas, así como de aspectos económicos como el mercado del mineral y la disponibilidad de capital. Algunas minas llevan en funcionamiento ininterrumpido desde hace más de un siglo, mientras que en otras acaba de iniciarse la explotación.

Las minas son lugares peligrosos y la mayoría de los trabajos son duros. Los riesgos para los trabajadores van desde catástrofes como hundimientos, explosiones e incendios hasta accidentes, exposición al polvo, ruido, calor, etc. La protección de la salud y la seguridad de los trabajadores es una cuestión fundamental en las minas correctamente gestionadas y, en la mayoría de los países, esta normativa es de obligado cumplimiento.

La mina subterránea

La mina subterránea es una fábrica situada en el interior de la tierra en la que trabajan los mineros para extraer minerales ocultos en los estratos rocosos. Los mineros pican, arrancan y barrenan para poder acceder y extraer el mineral, es decir, la roca que contiene una mezcla de minerales de los cuales como mínimo uno es procesable y convertible en un producto comercializable. El mineral se transporta a la superficie para refinarlo y obtener un concentrado de alta calidad.

El trabajo en el interior del estrato rocoso y a gran profundidad requiere un tipo de infraestructura especial: una red de pozos, galerías y cámaras conectados con la superficie que permitan el movimiento de los trabajadores, las máquinas y el mineral dentro de la mina. El pozo es el acceso hacia el interior y de él salen las galerías laterales que conectan la estación del pozo con los frentes de explotación. La rampa interna es una galería inclinada que conecta los niveles subterráneos a distintas cotas (o profundidades). Todas las galerías deben disponer de servicios tales como ventilación y aire fresco, electricidad, agua y aire comprimido, desagües y bombas para el agua subterránea que se filtra así como un sistema de comunicación.

Planta y sistemas de extracción

El castillete identifica la mina en superficie. Se encuentra situado justo encima del pozo, la arteria principal de la mina a través de la cual entran y salen los mineros, se bajan los suministros y equipos y se suben a la superficie el mineral y los materiales residuales. El pozo y las instalaciones de extracción varían según las necesidades de capacidad, profundidad, etc. Cada mina debe disponer como mínimo de un segundo pozo como salida de emergencia.

Las instalaciones de extracción y los pozos deben cumplir una normativa estricta. El equipo de extracción (p. ej., máquina de extracción, frenos y soga) ha de estar diseñado con un amplio margen de seguridad y ser revisado periódicamente. También el interior del pozo debe ser inspeccionado regularmente por personal situado sobre el montacargas. En caso necesario, los botones de parada situados en todas las paradas permiten activar el freno de emergencia.

En cada parada las puertas de la verja del pozo impiden la entrada al montacargas si éste no se encuentra en la misma. Cuando el montacargas se detiene en una parada, una señal abre la puerta. Una vez que los mineros han entrado en el montacargas y se ha cerrado la puerta, otra señal permite que el mismo suba o baje por el . Según los casos, es el operador del montacargas quien activa la señal o, siguiendo las instrucciones situadas en cada parada, son los propios mineros quienes marcan la detención. Por lo general, los mineros son muy conscientes de los riesgos que corren durante los desplazamientos por el pozo y las galerías de extracción, lo que limita el número de accidentes.

Perforación con trépano de diamantes

Antes de comenzar la explotación se localiza el filón en la roca y se define su anchura, longitud y profundidad para obtener una visión tridimensional del mismo.

La perforación con trépano de diamantes se utiliza para explorar un estrato rocoso y puede iniciarse desde la superficie o desde una galería de la mina. En esta técnica, un trépano provisto de pequeños diamantes corta un núcleo cilíndrico que es recogido en los tubos adyacentes. A continuación, se analiza el núcleo para determinar el contenido de la roca. Se inspeccionan las muestras y se dividen en porciones para analizar su contenido en metales. Para localizar los filones, hay que desarrollar amplios programas de perforación, efectuando barrenos a intervalos regulares en sentido horizontal y vertical para identificar las dimensiones del yacimiento (véase la Figura 74.9).

Trazado de las minas

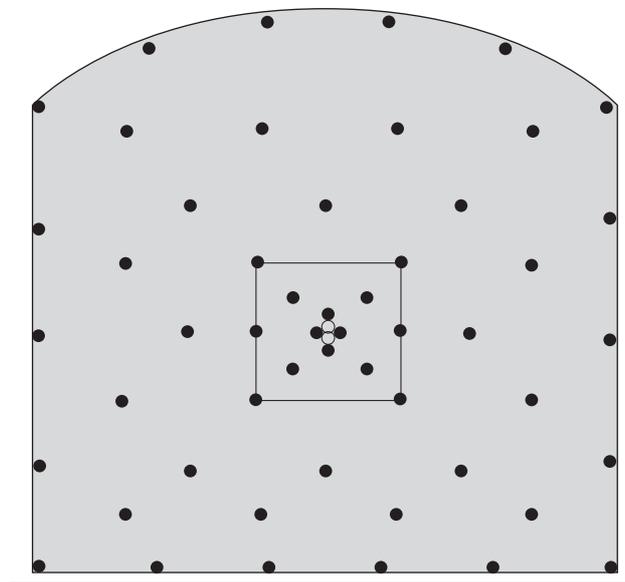
El trazado de una mina incluye las excavaciones necesarias para instalar las infraestructuras con que trabajar en los tajos y preparar la continuidad futura de las operaciones. Entre los elementos rutinarios, realizados todos con técnicas de perforación-voladura-excavación, se encuentran las galerías horizontales, las rampas inclinadas y los pozos verticales o inclinados.

Creación de pozos

Para crear un pozo se excava la roca avanzando en sentido vertical. Normalmente, esta operación, que suele asignarse a contratistas, requiere personal especializado y equipos específicos, como un marco de superficie para excavación de pozos, un sistema de elevación con un gran cangilón de draga al final de un cable y un sistema especial de desescombro del pozo.

El personal de excavación de pozos se expone a muchos riesgos, pues trabaja en el fondo de una excavación profunda y vertical, y comparte el mismo cangilón de draga con el material y la roca barrenada. Además, los trabajadores que se encuentran en el fondo del pozo no disponen de espacio para

Figura 74.9 • Patrón de perforación de la mina Garpenberg (plomo y zinc) en el centro de Suecia.



resguardarse de los objetos que puedan caerles encima; en resumen, puede decirse que la excavación de pozos no es un trabajo para novatos.

Galerías y rampas

Una galería es un túnel horizontal de acceso que se utiliza para transportar roca y mineral. La excavación de una galería es una actividad rutinaria dentro del trazado de una mina. En minas mecanizadas, se utilizan trenes electrohidráulicos perforadores múltiples de doble brazo para perforar los frentes. Una galería típica presenta un perfil de 16,0 m² de sección y el frente se perfora a una profundidad de 4,0 m. Los barrenos se cargan de forma neumática con un explosivo (normalmente fueloil de nitrato amónico (ANFO) a granel) que se transporta en un camión especial. Se utilizan detonadores no eléctricos (Nonel) de retardo breve.

Figura 74.10 • Cargador CLV.



Atlas Copco

Figura 74.11 • Métodos de perforación de pozos.



Las labores de desescombro se realizan con vehículos CLV (cargar, levantar, volcar) (véase la Figura 74.10) con palas de cerca de $3,0 \text{ m}^3$ de capacidad. Los escombros se transportan directamente al sistema de paso de mineral, donde se transfieren a camiones de mayor tonelaje. Las rampas son pasajes con desniveles entre 1:7 y 1:10 (muy superiores a los de las carreteras normales), que conectan uno o más niveles y permiten una tracción adecuada para los equipos pesados de autopropulsión. Tienen a menudo forma de espiral. La excavación de las rampas, que se realiza con el mismo equipo utilizado en las galerías, es un trabajo de rutina dentro del trazado de una mina.

Excavación de pozos

Un pozo es una abertura vertical o muy inclinada que conecta diferentes niveles en una mina y puede servir como escalera para acceder al tajo, como paso del mineral o como parte del sistema de ventilación de la mina. La excavación de pozos es una tarea difícil y peligrosa pero necesaria. Los métodos utilizados van desde la simple perforación y voladura manuales hasta la excavación mecánica de la roca con maquinaria especializada (véase la Figura 74.11).

Excavación manual de pozos

La excavación manual es un trabajo difícil, peligroso y físicamente duro que exige una gran agilidad, fuerza y resistencia y sólo puede ser realizado por mineros expertos y en buenas condiciones físicas. Por regla general, la sección del pozo se divide mediante un muro de largueros de madera en dos compartimientos, uno de los cuales se mantiene expedito para la escalera de acceso al frente, a las conducciones de aire, etc. y el otro se va llenando con la roca procedente de la voladura formando una plataforma de perforación para el minero. La división con largueros de madera se va ampliando progresivamente. Este trabajo, que exige subir por la escalera, montar los andamiajes de madera, perforar la roca y realizar el barrenado, es realizado en un espacio escaso y mal ventilado por un solo minero, pues no hay espacio para un ayudante. En las explotaciones mineras se sigue buscando alternativas viables a estos métodos peligrosos y duros de excavación manual de pozos.

Vehículo de cremallera

El vehículo de cremallera para excavación de pozos evita el uso de la escalera y facilita considerablemente el método manual. Es un vehículo que sube por el pozo sobre unos raíles anclados en la roca y proporciona una plataforma sólida de trabajo desde la cual el minero puede picar la roca. Con este vehículo pueden perforarse pozos muy profundos con una seguridad mucho mayor que la que ofrece el método manual. Con todo, la excavación de pozos sigue siendo un trabajo muy peligroso.

Perforadora

La perforadora (RBM) es una máquina potente que rompe la roca de forma mecánica (véase la Figura 74.12). Se instala encima del punto planificado para el pozo y con ella se perfora un barreno piloto de unos 300 mm de diámetro hasta alcanzar un objetivo de nivel inferior. La perforación piloto se sustituye por un cabezal de trépano del diámetro del pozo previsto y se coloca la máquina de forma invertida, de forma que el cabezal de trépano gira y se eleva para crear un pozo circular del tamaño deseado.

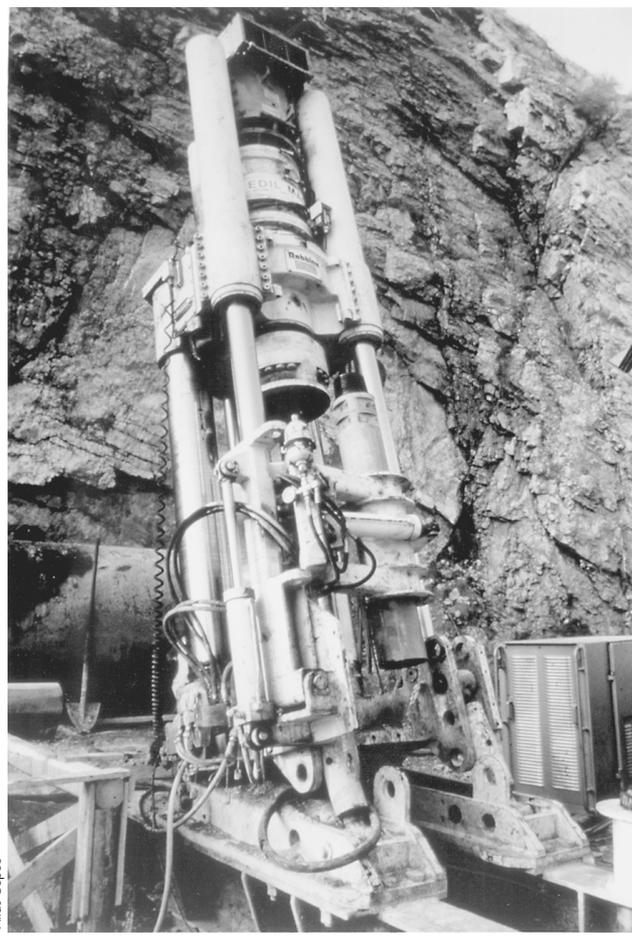
Control de tierras

El control de tierras es crucial para las personas que trabajan en el interior de un estrato rocoso y de especial interés en minas mecanizadas, donde se utilizan equipos con ruedas de neumáticos en secciones de galería de $25,0 \text{ m}^2$, frente a las minas con equipos sobre raíles donde la sección suele ser de sólo $10,0 \text{ m}^2$. En estos casos, la altura del techo de 5,0 m es excesiva para que el minero pueda utilizar una barra de saneamiento del techo y comprobar los posibles desprendimientos de rocas.

En las galerías subterráneas se utilizan varios modos de asegurar el techo. En los volados suaves se perforan barrenos muy juntos y se cargan con un explosivo de baja potencia. La voladura produce una perforación sin llegar a fragmentar la roca exterior.

Sin embargo, a menudo se producen grietas en el estrato rocoso que no resultan visibles en superficie, por lo que los

Figura 74.12 • Máquina perforadora de pozos.



Allax Coppo

desprendimientos de rocas es un riesgo siempre presente. Este riesgo puede reducirse mediante el anclaje de las rocas, es decir, insertando y sujetando varillas de acero en los taladros. Los anclajes sujetan el estrato rocoso, evitan que las grietas aumenten de tamaño, ayudan a estabilizar el estrato rocoso y dan mayor seguridad al entorno subterráneo.

Métodos de minería subterránea

En las minas subterráneas la elección del método de explotación depende de la forma y el tamaño del filón, el valor de los minerales contenidos, la composición, estabilidad y fuerza del estrato rocoso, así como de la demanda de producción y las condiciones de seguridad del trabajo (aspectos que a veces son casi incompatibles). Aunque las técnicas de minería han avanzado con el paso del tiempo, el presente artículo se centra en las utilizadas en las minas total o parcialmente mecanizadas de finales del siglo XX. Aunque cada mina es diferente, en todas se intenta conseguir un entorno de trabajo seguro y un funcionamiento rentable.

Filones planos con cámaras y pilares

Este sistema se aplica a la extracción en suelo horizontal o ligeramente inclinado sin exceder los 20° (véase la Figura 74.13). Los filones suelen ser de tipo sedimentario y la roca es resistente tanto para el techo como para la explotación (concepto relativo ya que los mineros tienen la opción de instalar anclajes de roca para reforzar el techo cuando su estabilidad es dudosa). El sistema de pilares es uno de los métodos más utilizados en las minas de carbón subterráneas.

Con esta técnica, el mineral se extrae perforando horizontalmente y avanzando a lo largo de un frente de explotación múltiple dejando espacios vacíos o cámaras detrás de él. Los pilares (secciones de roca) se van dejando entre las cámaras para evitar el hundimiento del techo. El resultado suele ser un

diseño regular de cámaras y pilares con un tamaño que depende de la estabilidad del estrato rocoso pero con el objetivo de extraer la mayor cantidad posible de mineral. A tal fin, es necesario un cuidadoso análisis previo de factores como la resistencia de los pilares o la resistencia de los estratos del techo. Los anclajes en la roca se utilizan habitualmente para aumentar la resistencia de la roca en los pilares. Las cámaras entre pilares sirven de paso para los camiones que transportan el mineral al almacén de la mina.

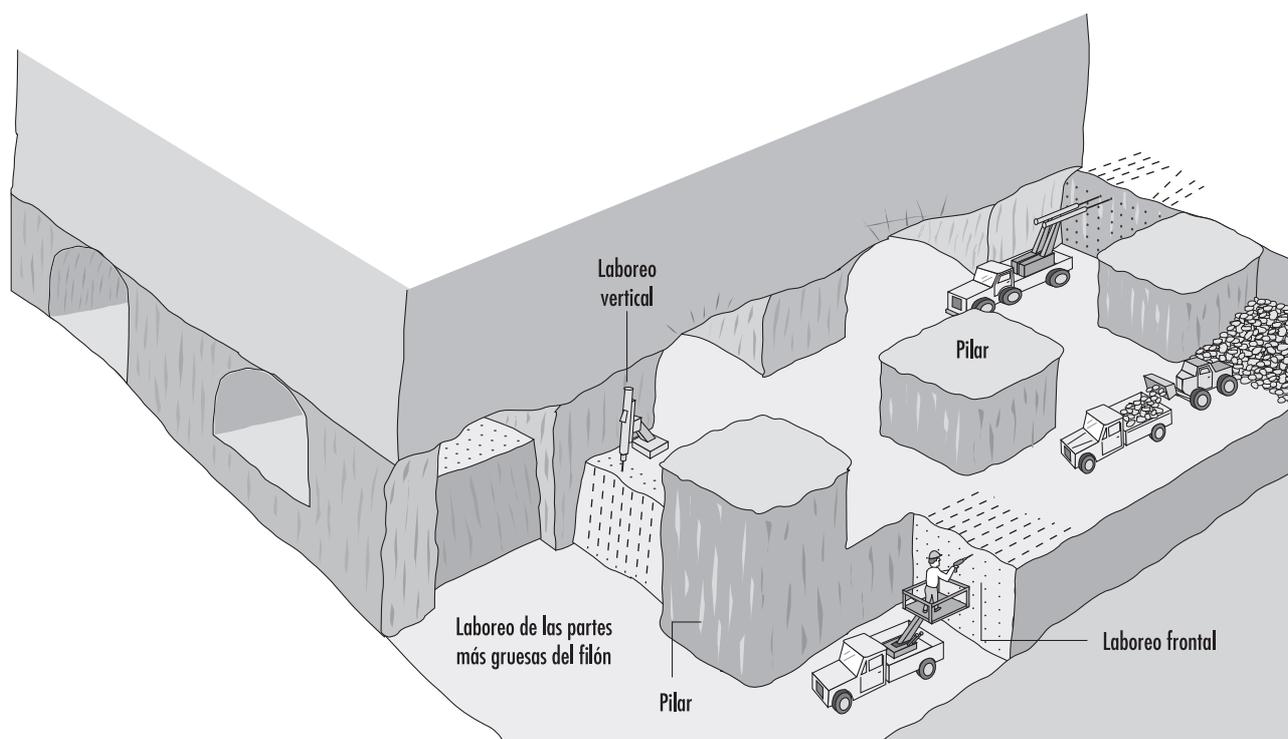
El frente en este tipo de minas se perfora como en el caso de las galerías. La anchura y altura del tajo dependen del tamaño de la galería, que puede ser bastante grande. En las minas de altura normal se utilizan grandes trenes perforadores y máquinas compactas cuando el mineral presenta un grosor inferior a 3,0 m. El yacimiento se va explotando gradualmente desde la parte superior, lo que permite asegurar el techo a una altura adecuada para los mineros. Las secciones inferiores se extraen en estratos horizontales perforando barrenos planos y realizando la voladura contra el espacio superior. El mineral se carga en camiones en el frente. Normalmente, se utilizan retroexcavadoras y volquetes convencionales. En las minas de poca altura se utilizan camiones y vehículos CLV especiales.

El sistema de pilares resulta muy eficaz. La seguridad depende de la altura de las cámaras y de las normas de control de suelos. Los principales riesgos son los accidentes causados por hundimiento de rocas y equipos en movimiento.

Filones inclinados con pilares

Esta técnica se aplica a la extracción en suelo liso con una inclinación comprendida entre 15° y 30° sobre el plano horizontal. Se trata de una inclinación excesiva para los vehículos con neumáticos e insuficiente para la caída de la roca por la fuerza de gravedad.

Figura 74.13 • Mina de cámaras y pilares en un filón plano.



El enfoque tradicional del yacimiento inclinado se basa en el trabajo manual. Los mineros realizan perforaciones en el frente con máquinas sostenidas por ellos mismos. El frente se limpia con palas de arrastre.

El trabajo en el frente inclinado es difícil. Los mineros tienen que trepar por encima de los montones de rocas arrancadas cargando con las perforadoras, las poleas y los cables de acero. A los riesgos de caída de rocas y de accidentes, hay que añadir los debidos al ruido, el polvo, la ventilación inadecuada y el calor.

Cuando es posible introducir la mecanización en los filones inclinados de mineral, se utiliza la técnica de la “extracción en escalón”, convirtiendo la galería de “fuerte inclinación” en una “escalera” con peldaños con un ángulo adecuado para que puedan subir las máquinas sin raíl. Los peldaños se moldean en forma de diamante con tajos y vías de carga con el ángulo elegido para todo el yacimiento.

La extracción del mineral se inicia con perforaciones horizontales a partir de una galería combinada de acceso y carga. El tajo inicial es horizontal en la dirección del techo. El siguiente tajo comienza a una pequeña distancia del anterior y en la misma dirección. Este procedimiento se repite desplazándose hacia abajo para crear una serie de peldaños y poder extraer el mineral.

Para soportar el techo se mantienen secciones de la explotación. Esta operación se realiza perforando dos o tres barrenos adyacentes en toda su longitud y comenzando el siguiente un paso más abajo, dejando un pilar alargado entre ellos. Las secciones de estos pilares pueden recuperarse posteriormente perforando y barrenando desde el tajo inferior.

Los modernos equipos sin raíles se adaptan bien a este tipo de minería. La extracción puede mecanizarse totalmente utilizando equipos móviles estándar. El mineral extraído es recogido en el tajo por vehículos CLV que lo trasladan a camiones para su transporte al pozo. Si el tajo no tiene altura suficiente para cargar el mineral en camiones, puede cargarse en espacios especialmente excavados en la vía de acarreo.

Explotación por franjas-almacenes

La explotación por franjas-almacenes puede considerarse el método “clásico” de minería, y fue muy utilizado durante el siglo pasado. Actualmente, esta técnica ha sido sustituida en gran medida por métodos mecanizados, aunque todavía se sigue utilizando en muchas minas pequeñas de todo el mundo. Se aplica a filones con límites regulares y fuerte inclinación situados dentro de un estrato rocoso resistente. También el mineral extraído debe resistir el almacenamiento en las laderas (p. ej., los minerales con sulfuros tienden a oxidarse y descomponerse en contacto con el aire). Su principal característica es el uso de la fuerza de gravedad para el tratamiento del mineral: el mineral extraído del tajo cae directamente a vagonetas a través de canaletas, lo que evita la carga manual, tradicionalmente la tarea más común y menos agradable de las minas. Hasta la aparición de la pala oscilante neumática en el decenio de 1950, no existía una máquina adecuada para cargar la roca en las minas subterráneas.

La extracción del mineral se realiza en planchas horizontales, comenzando por la base del tajo y avanzando hacia arriba. La mayor parte de la roca barrenada permanece en el tajo formando una plataforma de trabajo que permite al minero perforar los barrenos en el techo y asegurar los muros del tajo. Cuando la roca barrenada aumenta en un 60 %, se retira el 40 % del mineral en la base para mantener un espacio de trabajo libre entre la parte superior del escombros y el techo. El mineral restante se retira cuando la voladura alcanza el límite superior del tajo.

Al tener que trabajar encima del montón de escombros y desde el acceso a la escalera resulta imposible utilizar equipos

mecanizados. Sólo son útiles los equipos ligeros que pueda utilizar el propio minero. La perforadora neumática, de unos 45 kg de peso, es la herramienta habitual utilizada en este tipo de tajos. El minero, situado sobre la parte superior del montón de escombros, coloca la broca de acero de la perforadora contra el techo y comienza a trabajar. No es un trabajo fácil.

Sistema de corte y relleno

El sistema de cortar y llenar está indicado para filones de gran inclinación dentro de un estrato rocoso de estabilidad buena o media. El mineral se extrae en planchas horizontales comenzando desde un corte en la base y avanzando hacia arriba, dejando que los límites del tajo se ajusten a la explotación irregular. Así, se pueden extraer de forma selectiva secciones ricas y dejar intactas las de menor calidad.

Una vez que se ha desescombrado el tajo, el espacio limpio se vuelve a rellenar para formar una plataforma de trabajo que permita extraer la siguiente plancha y mejorar la estabilidad de los muros del tajo.

Este tipo de explotación en un entorno de trabajo sin equipos de raíles comprende una galería de acarreo a lo largo del yacimiento en el nivel principal, una roza en el tajo con desagües para el rellenado hidráulico, una rampa en espiral excavada en el suelo con salidas de acceso al tajo y un pozo desde el tajo hasta el nivel superior para la ventilación y el transporte del relleno.

El *rebaje de cabeza* se utiliza en el sistema de corte y relleno con roca seca y arena hidráulica como material de relleno. En este sistema, el tajo se perfora desde abajo barrenando una plancha de 3,0 m a 4,0 m de grosor. Así, se extrae toda el área de explotación y se barrena todo el tajo sin interrupción. Los barrenos “superiores” se perforan con simples perforadoras de vagoneta.

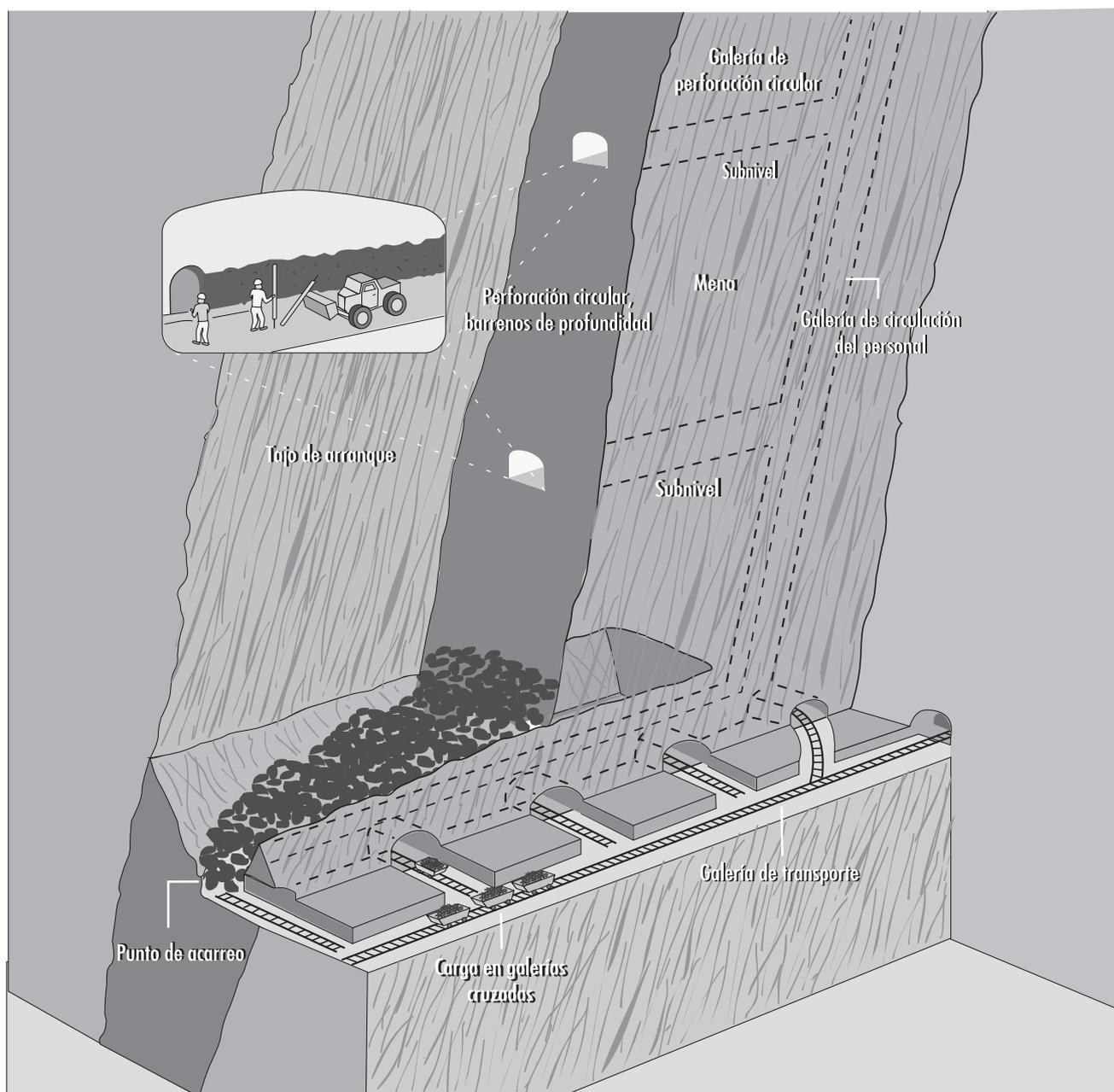
Este sistema deja una superficie de roca basta en el techo; después del desescombro, su altura puede ser de unos 7,0 m. Antes de que los mineros puedan entrar en esa zona, hay que asegurar el techo alisándolo con un barrenado suave y eliminando las rocas sueltas. Esta operación la realizan los mineros con equipos manuales y trabajando desde el montón de escombros.

En el sistema *frontal*, se utilizan equipos sin raíles para la extracción del mineral. Para rellenar se emplean relaves de arena que se distribuyen en los tajos subterráneos a través de conducciones de plástico. Los tajos se rellenan casi en su totalidad, lo que crea una superficie suficientemente dura para ser atravesada por equipos con neumáticos. La explotación en los tajos está totalmente mecanizada con trenes y vehículos CLV. El frente es un muro vertical de 5,0 m a lo largo del tajo con una abertura de 0,5 m por debajo de él. Se perforan en el frente barrenos horizontales de cinco metros de longitud y se barrena el mineral contra la abertura inferior.

El volumen producido en una voladura depende del área frontal y no es comparable al que se consigue con el sistema anterior de rebaje de cabeza. Sin embargo, la producción del equipo sin raíl es muy superior al método manual y el control del techo puede realizarse con el tren perforador, que realiza un barrenado ligero junto con la voladura del tajo. El vehículo CLV, equipado con un inmenso cangilón de carga y grandes ruedas, es una herramienta versátil para el desescombro y el acarreo y se desplaza con facilidad por la superficie de relleno. En un tajo de doble frente, el tren perforador trabaja en un lateral mientras el CLV trabaja en el montón de escombros en el otro extremo, haciendo un uso eficiente del equipo y mejorando el rendimiento.

En el sistema *por subniveles* se extrae el mineral en tajos abiertos. El relleno del tajo con un material consolidado después de la extracción permite a los mineros volver posteriormente a

Figura 74.14 • Explotación por subniveles con perforadora circular y carga en galerías cruzadas.



recuperar los pilares entre los tajos, obteniéndose una tasa de recuperación muy alta del filón.

El desarrollo del sistema por subniveles es complejo. El yacimiento se divide en secciones de una altura vertical de unos 100 m en la que se preparan subniveles conectados a través de una rampa inclinada. Las secciones del yacimiento se dividen a su vez lateralmente en tajos y pilares y se crea una galería de arrastre en el suelo con salidas para la carga en puntos de vaciado.

Una vez arrancado el mineral, el tajo por subniveles será una abertura rectangular a lo largo del yacimiento. La base del tajo es un embudo en forma de V que permite enviar el material barrenado a los puntos de vaciado. Las galerías de perforación

para los equipos de pozos profundos se preparan en los subniveles superiores (véase la Figura 74.14).

El barrenado requiere un espacio para que la roca se expanda en volumen, por lo que es necesario preparar una abertura de unos metros de anchura antes de iniciar la voladura de pozos profundos. Esto se consigue aumentando el tamaño de un coladero de abajo a arriba hasta obtener la abertura completa.

Una vez realizada esta operación, el equipo de pozos profundos (véase la Figura 74.15) comienza la extracción en galerías por subniveles siguiendo con precisión un plan diseñado por expertos en voladuras especificando la posición de los barrenos, la posición de laminado circular, la profundidad y la dirección de los barrenos. El equipo de perforación continúa

Figura 74.15 • Equipo de perforación de pozos profundos.



Ailes Capco

hasta finalizar todos los círculos de un nivel. A continuación, se desplaza al siguiente subnivel para continuar la perforación. Entretanto, los barrenos se cargan y un sistema de voladura que cubre un área extensa dentro del tajo hace saltar un gran volumen de mineral de una sola vez. El mineral barrenado cae al fondo del tajo y es recuperado por vehículos CLV que están desescombrando en el punto de vaciado por debajo del tajo. Normalmente, la perforación de pozos profundos precede a la carga y la voladura, lo que proporciona una reserva de mineral listo para barrenar y permite una explotación efectiva.

El sistema por subniveles es un método de extracción productivo. La eficiencia se mejora utilizando para la perforación de pozos profundos equipos totalmente mecanizados y de funcionamiento continuo. Esta técnica resulta además relativamente segura, pues al realizar la operación de perforación dentro de galerías de subnivel y la de desescombro a través de puntos de vaciado se elimina el riesgo potencial de desprendimiento de rocas.

Sistema de retirada mediante cráteres verticales

Al igual que el sistema por subniveles y el de franjas-almacenes, el sistema de retirada mediante cráteres verticales (RCV) se aplica a la extracción en estratos de gran inclinación aunque utilizando una técnica de voladura diferente: la roca se rompe con cargas pesadas concentradas en barrenos ("cráteres") de gran diámetro (unos 165 mm) a una distancia de 3 m de la superficie rocosa libre. La voladura rompe una abertura en forma de cono en el estrato rocoso alrededor del barreno y permite que el material barrenado permanezca en el tajo durante la fase de explotación, de forma que el relleno de roca ayuda a soportar los muros del

tajo. En este caso, el requisito de estabilidad de la roca es menor que en el sistema por subniveles.

El desarrollo del sistema RCV es similar al de subniveles salvo que se requieren excavaciones superiores e inferiores. La talla superior es necesaria en la primera fase para instalar el equipo de perforación de los barrenos de gran diámetro y para acceder mientras se cargan los barrenos. La talla inferior proporciona la superficie libre necesaria para la voladura RCV. También permite el acceso a un vehículo CLV (manejado por control remoto por un operario que permanece fuera del tajo) para cargar el mineral barrenado en los puntos de vaciado bajo el tajo.

En la voladura RCV normal se utilizan barrenos en patrón de 4,0 m x 4,0 m dirigido en sentido vertical o inclinado con las cargas cuidadosamente situadas a distancias calculadas para liberar la superficie inferior. Las cargas permiten romper una abertura horizontal en la roca de unos 3,0 m de grosor. La roca barrenada cae al tajo inferior. Controlando la velocidad de desescombro, se mantiene el tajo parcialmente lleno de forma que el relleno de roca ayuda a estabilizar los muros durante la fase de explotación. La última voladura rompe la talla superior, que cae al tajo; después, se desescombra el tajo y se prepara para el relleno.

El sistema RCV utiliza a menudo un sistema de tajos primarios y secundarios en el yacimiento. Los primarios se extraen en la primera fase, se rellenan con material cementado y se dejan compactar. A continuación, los mineros recuperan el mineral de los pilares entre tajos primarios y de los tajos secundarios. Este sistema, junto con el relleno cementado, permite obtener casi el 100 % de la reserva de mineral.

Sistema de hundimiento de subniveles

El sistema de hundimiento de subniveles se aplica a filones con una inclinación importante o moderada y una gran profundidad. El mineral se fractura en bloques manejables mediante voladura. El techo se hunde al extraer el mineral y el suelo en la superficie del yacimiento también lo hace (debe acordonarse la zona para evitar el acceso de personal a este área).

El hundimiento de subniveles está basado en la fuerza de la gravedad dentro de un estrato rocoso fracturado que contiene mineral y roca. El estrato rocoso se fractura mediante perforación y voladura y, a continuación, se desescombra a través de galerías por debajo del estrato rocoso hundido. Es un método seguro, porque los mineros siempre trabajan en el interior de aberturas del tamaño de una galería.

En este sistema, se abren subniveles con galerías de forma regular preparadas dentro del yacimiento con una separación vertical bastante pequeña (entre 10,0 m y 20,0 m). El diseño de la galería es el mismo en todos los subniveles (es decir, galerías paralelas a través del yacimiento desde la galería de transporte de base hasta la de techo) pero ligeramente desplazadas en cada subnivel con respecto al anterior de forma que las galerías del nivel inferior están situadas entre las galerías del subnivel superior. Una sección transversal de las mismas mostraría un esquema en diamante con galerías verticales y horizontales espaciadas de forma regular, lo que da idea de la complejidad del sistema de hundimiento de subniveles. Sin embargo, la excavación de galerías es una tarea fácilmente mecanizable. La posibilidad de trabajar en frentes múltiples a diferentes subniveles favorece una elevada tasa de utilización de los equipos.

Cuando se ha completado el trazado de un subnivel, el equipo de perforación de pozos profundos pasa a perforar barrenos en forma de abanico en la roca superior. Cuando todos los barrenos están listos, el equipo se desplaza al subnivel inferior.

La voladura de pozos profundos fractura el estrato rocoso por encima de la galería del subnivel, iniciando un hundimiento que

comienza en contacto con el techo y va retrocediendo hacia el suelo siguiendo un frente recto a través del yacimiento en el subnivel. Una sección vertical mostraría una escalera en donde cada subnivel superior se encuentra avanzado respecto al subnivel inferior.

La voladura rellena el frente del subnivel con una mezcla de mineral y desechos. Cuando llega el vehículo CLV, el hundimiento contiene un 100 % de mineral. A medida que avanza la carga, la proporción de roca residual irá aumentando gradualmente hasta que el operario decida que la dilución es excesiva y detenga la carga. Cuando el vehículo se desplaza a la siguiente galería para continuar el desescombro, el técnico en voladuras prepara el siguiente círculo de barrenos.

El trabajo de desescombro en los subniveles es una aplicación ideal para el vehículo CLV. Este vehículo, disponible en diferentes tamaños, rellena el cangilón, se desplaza unos 200 m, vacía el cangilón en el rumbadero y vuelve por otra carga.

El sistema de hundimiento de subniveles consta de tareas repetitivas (excavación de galerías, perforación de pozos profundos, barrenado y voladura, carga y transporte) que se realizan de forma independiente. Así, el personal y los equipos pueden trasladarse continuamente de un subnivel a otro, lo que permite un uso muy eficiente de los mismos. Realmente, la mina es como una fábrica con departamentos. Sin embargo, el sistema de subniveles es menos selectivo que otros métodos y no proporciona unas tasas de extracción especialmente eficientes. El hundimiento genera un 20-40 % de residuos y una pérdida de mineral de entre el 15 % y el 25 %.

Sistema de hundimiento en bloque

Este sistema es aplicable a explotaciones del orden de 100 millones de toneladas distribuidas en todas las direcciones del estrato rocoso con posibilidad de hundimiento (p. ej., con tensiones internas que, al extraer los elementos de soporte del estrato rocoso, ayudan a fragmentar el bloque barrenado). El rendimiento anual previsto tiene que situarse entre 10 y 30 millones de toneladas. Estos requisitos hacen que el sistema de hundimiento en bloque sólo pueda aplicarse en algunos filones específicos. Se utiliza en todo el mundo en minas de cobre, hierro, molibdeno y diamantes.

El término *bloque* se refiere al diseño de la mina. El yacimiento se divide en grandes secciones o bloques con un tonelaje suficiente para muchos años de explotación. El hundimiento se induce eliminando el soporte del estrato rocoso directamente debajo del bloque mediante la realización de un corte, una sección de roca de 15 m de alto fracturada mediante perforación de pozos profundos y voladura. Las tensiones creadas por fuerzas tectónicas naturales de considerable magnitud, similares a las que provocan los movimientos continentales, agrietan el estrato rocoso y fracturan los bloques en trozos de un tamaño que les permite pasar por las aberturas de los puntos de vaciado en la mina. A veces, sin embargo, es necesaria la ayuda de los mineros para manejar bloques demasiado grandes.

El sistema de hundimiento de bloques requiere una gran planificación y un trazado inicial detallado, que incluye un complejo sistema de excavaciones bajo el bloque. Aunque éstas pueden variar según el lugar, por lo general incluyen rozas, aberturas cónicas, cribones para separar las rocas de tamaño excesivo y rumbaderos que envían el mineral al vagón de carga.

Las aberturas cónicas excavadas por debajo de una roca recogen el mineral de un área mayor y lo envían a un punto de vaciado en el nivel de explotación inferior. Allí, el mineral es recogido en vehículos CLV y trasladado a rumbaderos. Los bloques demasiado grandes que no caben en el cangilón se barrenan en puntos de vaciado, mientras que los más pequeños son tratados en el cribón. Los cribones, conjunto de barras de

hierro paralelas para clasificar las rocas, se utilizan por lo general en minas de hundimiento de bloques aunque para esta tarea cada vez se emplean más los equipos hidráulicos.

Las brechas en una mina de hundimiento de bloques están sometidas a una elevada presión por la roca, de modo que las galerías y demás aberturas se excavan con la sección mínima posible. Es necesario realizar un cuidadoso anclaje de las rocas y un recubrimiento con hormigón para mantener las aberturas en buen estado.

Adecuadamente aplicado, el sistema de hundimiento de bloques es un método de minería barato y rentable. Sin embargo, no siempre se puede prever la capacidad de hundimiento de un estrato rocoso. Además, el extenso trazado necesario requiere una larga fase previa antes de comenzar la explotación de la mina, y el retraso en la entrada de ingresos puede influir negativamente en las previsiones económicas que sirvan para justificar la inversión.

Sistema por tajos largos

El sistema por tajos largos se aplica a filones de forma uniforme, grosor limitado y extensión horizontal amplia (p. ej., vetas de carbón, capa de potasa o estrato de material de cuarzo explotado en las minas de oro de Sudáfrica) y es uno de los principales métodos utilizados en las minas de carbón. Con este sistema, se extrae el mineral en láminas a lo largo de una línea que se repite para extraer el material en un área más extensa. El espacio más cercano al frente se mantiene abierto mientras que el techo se deja hundir a una distancia segura detrás de los mineros y de su equipo.

El sistema de tajos largos incluye la realización de una red de galerías para acceder al área de explotación y para acarrear el producto extraído hasta el pozo. Dado que la explotación se realiza en forma de una plancha que se extiende a lo largo de una extensión amplia, normalmente pueden diseñarse las galerías en forma de red. Las galerías de arrastre se realizan en la propia veta de carbón. La distancia entre dos galerías de arrastre adyacentes determina la longitud del frente por tajos largos.

Relleno

El relleno de los tajos impide que la roca se hunda, manteniendo la estabilidad del estrato rocoso y permitiendo una extracción más completa del mineral. Tradicionalmente, el relleno se ha utilizado en operaciones de corte y relleno pero también se utiliza en los sistemas de subniveles y RCV.

Por norma general, los mineros vuelcan los residuos de roca en tajos vacíos en lugar de llevarlos a la superficie. Así, por ejemplo, en las minas de corte y relleno la roca residual es distribuida por el tajo vacío con palas de carga o aplanadoras.

En el sistema de *relleno hidráulico* se utilizan relaves de la instalación de preparación mecánica de la mina que se distribuyen en el subsuelo a través de barrenos y tubos de plástico. Los relaves primero se desenlodan y sólo se utiliza la fracción gruesa para el relleno. El relleno es una mezcla de arena y agua, con aproximadamente un 65 % de materia sólida. Al mezclar el cemento en el último vertido, la superficie del relleno se endurece formando un lecho firme para los equipos de ruedas neumáticas.

El relleno también se utiliza en los sistemas de subniveles y RCV, en donde se introduce roca machacada como complemento al relleno de arena. La roca machacada y cribada, obtenida de una cantera cercana, se envía al subsuelo a través de pozos especiales de relleno, donde es cargada en camiones y transportada al tajo, para ser volcada en pozos de relleno especiales. Los tajos primarios se rellenan con roca cementada que se obtiene vaporizando sobre el relleno una mezcla de polvo de cenizas y cemento antes de distribuirlo a los tajos. Este relleno se endurece formando un pilar artificial para explotar el tajo

secundario. Por lo general, no es necesaria la mezcla de cemento cuando se rellenan los tajos secundarios, salvo en los últimos vertidos para obtener un suelo de desescombro firme.

Equipos para la minería subterránea

Las minas subterráneas disponen de un grado de mecanización cada vez mayor. Características comunes a todas las máquinas de funcionamiento subterráneo son la articulación sobre ruedas de goma, el uso de motores diesel y la tracción a las cuatro ruedas (véase la Figura 74.16).

Tren perforador de frentes

Este vehículo, dotado de uno o dos brazos con perforadores hidráulicos, es un elemento indispensable en las minas y se utiliza para todos los trabajos de excavación de rocas. Dirigido por un trabajador desde un panel de control, puede realizar 60 perforaciones de 4,0 m de profundidad en pocas horas.

Perforadora de profundidad para pozos

Este equipo (véase la Figura 74.15) perfora barrenos de forma radial alrededor de la galería cubriendo una gran área de roca y rompiendo grandes volúmenes de mineral. Se utiliza en los sistemas de subnivel, hundimiento de subniveles, hundimiento de bloques y RCV. El operario utiliza un potente perforador hidráulico y almacenamiento en carrusel con brazos extensibles de control remoto para perforar la roca desde una posición segura.

Camión de carga

El camión de carga es un complemento necesario del tren perforador. Sobre el transportador se monta una plataforma de servicio hidráulica, un contenedor a presión de explosivos ANFO y una manguera de carga que permite al operario llenar los barrenos en todo el frente en un plazo muy breve de tiempo. Simultáneamente, pueden introducirse detonadores Nonel para controlar las voladuras individuales.

Vehículo CLV

El vehículo versátil de carga-levantamiento-volcado (véase la Figura 74.10) se utiliza para una serie de operaciones, como la explotación del mineral y el manejo de materiales. Existe en varios tamaños, de forma que el minero puede seleccionar el modelo más adecuado para cada tarea y situación. A diferencia

de otros vehículos diesel utilizados en las minas, el vehículo CLV se usa a la máxima potencia durante largos períodos de tiempo por lo que genera un gran volumen de humo y gases de escape. Un sistema de ventilación capaz de diluir y aspirar estos humos es esencial para mantener unos niveles de aire aceptables en el área de carga.

Carga subterránea

El mineral arrancado en los tajos de todo el yacimiento se acarrea hasta un vertedero situado cerca del pozo de extracción. Se abren galerías especiales de acarreo para un transporte lateral más amplio que normalmente están formadas por instalaciones de trenes con vagonetas. El acarreo sobre raíles ha demostrado ser un sistema de transporte eficiente para volúmenes y distancias importantes y está provisto de locomotoras eléctricas que no contaminan el ambiente subterráneo como los camiones diesel utilizados en las minas sin raíles.

Manejo del mineral

En el trayecto desde el tajo al pozo de extracción, el mineral pasa por varias estaciones en las que el mineral recibe diversos tratamientos.

La *excavadora de carga*, que utiliza un cangilón de acarreo para transportar el mineral del tajo al rumbadero, está equipada con tambores giratorios, cables y poleas y puede producir un movimiento de carga de vaivén. La excavadora de carga no requiere que el piso del tajo esté acondicionado y puede cargar el mineral almacenado en montones irregulares de escombros.

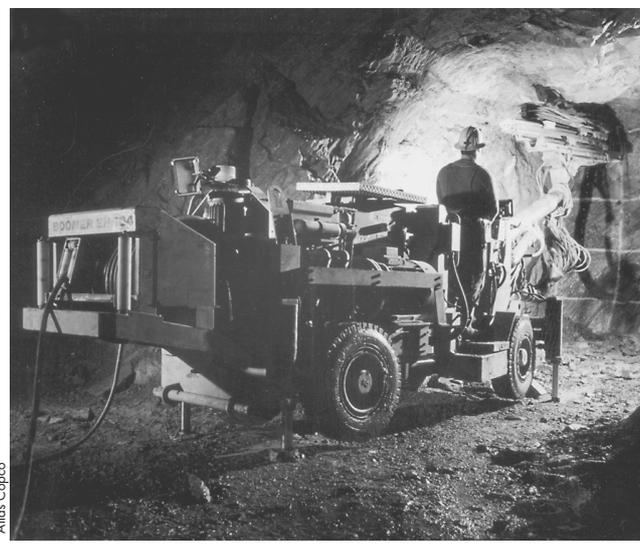
El *vehículo CLV*, con motor diesel y ruedas neumáticas, transporta la carga contenida en su cangilón (de tamaño variable) desde el montón de escombros al rumbadero.

El *rumbadero* es una abertura vertical o muy inclinada a través de la cual la roca cae por el peso de la gravedad desde un nivel superior a otro inferior. Los rumbaderos a veces están situados en una secuencia vertical para recoger el mineral de los niveles superiores en un punto común en la galería de arrastre.

La *canaleta* es la trampilla situada en el fondo del rumbadero. Los rumbaderos normalmente finalizan cerca de la galería de arrastre de forma que, cuando se abre la canaleta, el mineral cae llenando los camiones situados debajo de la misma.

Cerca del pozo, los trenes con mineral pasan por una *estación de volcado* donde puede descargarse el material en un *depósito*. Un *cribón* en la estación de volcado impide que caigan en el depósito rocas grandes. Estas últimas se parten mediante volado o con martillos hidráulicos; también puede instalarse una *machacadora* debajo del cribón para un control posterior de tamaño. Debajo del depósito se encuentra un *calibrador* que comprueba automáticamente que el volumen y el peso de la carga no exceden de las capacidades del eskip y del elevador. Cuando un *eskip* vacío, que es un contenedor para desplazamiento vertical, llega a la *estación de llenado*, se abre una canaleta en el fondo del calibrador que lo llena con la carga adecuada. Cuando el *elevador* levanta el eskip cargado hasta el marco de superficie, se abre una canaleta para descargar material en el depósito de superficie. La elevación del eskip puede realizarse de forma automática utilizando un circuito cerrado de televisión para supervisar el proceso.

Figura 74.16 • Equipo para frentes de pequeño tamaño.



Atlas Copco

MINAS SUBTERRANEAS

Simon Walker

En un principio, la explotación de las minas de carbón subterráneas se realizaba excavando túneles de acceso, o bocaminas, en las vetas de carbón a partir de su afloramiento superficial. Sin embargo, los problemas derivados de unos medios de transporte

inadecuados para llevar el carbón a la superficie y el riesgo creciente de combustión de las bolsas de metano por velas y otras llamas abiertas limitaron la profundidad a que podían trabajarse las primeras minas subterráneas.

El aumento de la demanda de carbón durante la Revolución Industrial propició la excavación de pozos para poder acceder a reservas de carbón más profundas. Así, a mediados del siglo XX, la mayor parte de la producción de carbón del mundo procedía de minas subterráneas. Durante los decenios de 1970 y 1980 se produjo un amplio desarrollo de la capacidad de las minas de carbón a cielo abierto, especialmente en países como Estados Unidos, Sudáfrica, Australia e India. En el decenio de 1990, sin embargo, un renovado interés por las minas subterráneas hizo que se abrieran algunas nuevas (p. ej., en Queensland, Australia) a partir de la máxima profundidad anteriormente alcanzada por las minas a cielo abierto. A mediados del decenio de 1990, casi el 45 % del total de carbón extraído en el mundo procedía de minas subterráneas. La proporción actual varía ampliamente, siendo, por ejemplo, del 30 % en Australia e India y del 95 % en China. Por razones económicas, no se suele explotar en minas subterráneas el lignito y el carbón bituminoso.

Una mina subterránea de carbón está formada básicamente por tres elementos: área de explotación, acarreo del carbón a pie de pozo o rampa y transporte del carbón a la superficie. La explotación comprende asimismo el trabajo previo necesario para permitir el acceso a futuras áreas de explotación de la mina, que presenta el máximo nivel de riesgo personal.

Trazado de la mina

La forma más sencilla de acceder a una veta de carbón es seguirla desde su afloramiento superficial, técnica todavía muy utilizada en áreas donde la topografía es inclinada y las vetas de carbón son relativamente horizontales. Un ejemplo son las minas de los Apalaches en Virginia del Sur (EE.UU.). Realmente, el método no es determinante, lo importante es que se pueda explotar la mina de forma económica y con un mínimo esfuerzo de infraestructura. Las bocaminas se suelen utilizar también en áreas mineras con escasa tecnología, en las que se amortizan los costes de trazado con el carbón que se va extrayendo de la bocamina.

Otros medios de acceso pueden ser las rampas y los pozos verticales. La elección depende normalmente de la profundidad de la veta de carbón: cuanto más profunda sea, más caro resultará perforar una rampa escalonada que permita el funcionamiento de los vehículos o las cintas transportadoras.

La construcción de un pozo vertical desde la superficie exige mucho tiempo y dinero, e impone el paso de un mayor lapso de tiempo entre el inicio de la construcción y la primera extracción de carbón. Cuando las vetas de carbón se encuentran a gran profundidad, como suele ocurrir en la mayor parte de los países europeos y China, a menudo hay que construir pozos que atraviesen capas freáticas. En tal caso, para evitar que el agua caiga al pozo hay que recurrir a técnicas especiales como la congelación o cementación del terreno y, a continuación, recubrir el pozo con anillos de acero u hormigón armado para su aislamiento definitivo.

Las rampas se utilizan normalmente para acceder a vetas de carbón que se encuentran a demasiada profundidad como para ser explotadas a cielo abierto, pero que están cerca de la superficie. Así, por ejemplo, en las minas de Mpumalanga (Transvaal oriental), Sudáfrica, las vetas de carbón se encuentran a menos de 150 m. En algunas zonas se explotan a cielo abierto y en otras se utiliza la explotación subterránea con rampas para introducir el equipo necesario e instalar las cintas transportadoras con las que se saca el carbón arrancado fuera de la mina.

Las rampas se diferencian de las galerías en que normalmente se excavan en la roca, no en el carbón (salvo que la inclinación

de la veta de carbón sea constante), y presentan una inclinación constante para facilitar el acceso de vehículos y medios de transporte. Una innovación introducida en el decenio de 1970 ha sido el uso de cintas transportadoras instaladas en rampas para la explotación de minas profundas, un sistema que presenta ventajas sobre la extracción tradicional por pozos en términos de capacidad y fiabilidad.

Métodos de explotación

Para la explotación de minas subterráneas se utilizan básicamente dos sistemas, a partir de los cuales se han desarrollado múltiples variantes que mejoran condiciones específicas de funcionamiento. Con el sistema de cámaras y pilares se excavan galerías (o vías) dispuestas de forma regular, dejando a menudo pilares de roca para soportar el techo. Con el sistema por tajos largos se consigue la extracción total de grandes zonas de una veta de carbón, dejando que las rocas del techo se hundan en la zona ya explotada.

Sistema de cámaras y pilares

Este sistema, el más antiguo en las minas subterráneas de carbón, fue el primero en que se previó un soporte del techo para proteger a los mineros. Su nombre se debe a los pilares de carbón que se dejan de forma regular como soporte *in situ* del techo. Este sistema se ha ido desarrollando hasta convertirse en un método mecanizado de alta explotación con el que, en algunos países, se obtiene una parte importante del total de la producción de minas subterráneas. Así, por ejemplo, en Estados Unidos el 60 % de la producción en minas subterráneas de carbón procede de minas explotadas con el sistema de cámaras y pilares. Algunas minas en Sudáfrica están obteniendo una producción de más de 10 millones de toneladas anuales en operaciones de multiproducción en vetas de carbón de hasta 6 m de espesor. En cambio, en Estados Unidos, muchas de las minas en que se aplica este sistema son pequeñas, operan con grosores de veta de sólo 1 m y tienen capacidad para detener y reanudar rápidamente la explotación en función de la demanda del mercado.

Normalmente, el sistema de cámaras y pilares se utiliza en vetas delgadas de carbón, donde la presión ejercida por las rocas superiores sobre los pilares de soporte no es excesiva. Este sistema presenta dos ventajas clave sobre el método de tajos largos: su flexibilidad y su seguridad. La principal desventaja es que la recuperación de los recursos de carbón sólo es parcial y depende de factores como la profundidad de la veta bajo la superficie y su grosor, llegando a conseguirse recuperaciones de hasta un 60 % o incluso un 90 % si se explotan los pilares en una segunda fase del proceso de extracción.

Este sistema también presenta varios niveles de complejidad técnica, que van desde técnicas de trabajo intensivo (como el sistema "de cestos", en el que la mayoría de las fases de explotación, incluido el acarreo, son manuales) hasta técnicas de alta mecanización. El carbón puede arrancarse desde el frente del túnel utilizando explosivos o máquinas de funcionamiento continuo. Para su acarreo se emplean vehículos o cintas transportadoras. Para soportar el techo de las vías y de sus intersecciones, donde el vano es mayor, se utilizan pernos de consolidación del techos y sujeción con puntales metálicos o de madera.

Un equipo de funcionamiento continuo, con un cabezal cortador y un sistema de carga del carbón montado sobre orugas pesa, por lo general, entre 50 y 100 toneladas, según la altura de operación, la potencia y la anchura de corte necesaria. Algunos de estos equipos llevan máquinas de instalación de pernos de consolidación de la roca y realizan la operación de sujetar el techo al mismo tiempo que cortan el carbón; en otros casos, el funcionamiento de los equipos continuos y de las

máquinas de instalación de pernos de consolidación es de tipo secuencial.

Las vagonetas de transporte de carbón pueden estar movidas por electricidad a partir de un cable umbilical o funcionar con baterías o motores diesel, de más flexibilidad. El carbón se carga desde la parte trasera de la máquina de extracción continua al vagón, que acarrea una carga de entre 5 y 20 toneladas durante una pequeña distancia, hasta un alimentador de tolva que, a su vez, lo trasvasa al sistema de cinta transportadora principal. El alimentador de tolva puede ir provisto de una trituradora para romper los trozos grandes de carbón o roca capaces de bloquear las canaletas o dañar las cintas transportadoras en algún punto del sistema de acarreo.

Una alternativa al acarreo en vehículos es el sistema de carga continua, que consiste en un transportador montado sobre una oruga de sección flexible que traslada el carbón arrancado directamente desde el equipo continuo a la tolva. El uso de estos equipos, que presentan ventajas en términos de seguridad personal y capacidad de producción, se está extendiendo también al sistema por tajos largos.

Las vías se excavan con una anchura de hasta 6,0 m y generalmente con la altura total de la veta de carbón. El tamaño de los pilares depende de la profundidad desde la superficie; lo normal en minas de carbón poco profundas de filón delgado son pilares cuadrados de 15,0 m separados unos 21,0 m.

Sistema por tajos largos

Aunque se cree que este sistema es un desarrollo del siglo XX, parece que ya existía hace 200 años. El principal avance registrado es que antiguamente las operaciones eran en su mayoría manuales, mientras que desde el decenio de 1950 el nivel de mecanización ha aumentado hasta el punto de que un frente extraído por tajos largos es ahora una unidad de alta productividad que requiere un grupo muy reducido de trabajadores.

El sistema de tajos largos presenta una gran ventaja en comparación con el de cámaras y pilares: permite la extracción total del panel en una pasada, recuperando una proporción mayor de la reserva total de carbón. Sin embargo, es un método relativamente poco flexible y requiere la existencia de una gran reserva explotable y que la venta esté garantizada, dadas las fuertes inversiones necesarias para su trazado y equipamiento (en algunos casos más de 20 millones de dólares).

Si antiguamente lo habitual era que la extracción se realizase de forma simultánea en varios frentes (en países como Polonia, más de 10 frentes por mina en muchos casos), la tendencia actual es efectuar una extracción intensiva en menos unidades, lo que reduce las necesidades de mano de obra, así como el trazado y el mantenimiento de la infraestructura subterránea necesaria.

En el sistema por tajos largos se hunde deliberadamente el techo a medida que se va agotando la veta de carbón; sólo las principales rutas de acceso subterráneas se mantienen con pilares. El techo a lo largo del tajo se entiba mediante soportes de accionamiento hidráulico de doble o cuádruple cadena que soportan la carga inmediata del techo y permiten que se distribuya parcialmente al frente sin explotar y a los pilares a ambos lados del panel, protegiendo asimismo al equipo y al personal del techo hundido detrás de la línea de soportes. El carbón se corta con una rozadora eléctrica, normalmente equipada con dos tambores de corte de carbón, que extrae una tira de carbón de hasta 1,1 m de grosor en cada pase. La rozadora se desplaza cargando el carbón arrancado en un transportador blindado que se desliza hacia delante después de cada corte mediante un movimiento secuencial de los soportes del frente.

En el extremo del frente, el carbón cortado se carga en una cinta transportadora para su acarreo hasta la superficie.

A medida que se avanza en el frente hay que ir ampliando la cinta, al contrario de lo que sucede con el sistema de retirada de tajos largos.

Durante los últimos 40 años se ha producido un importante aumento tanto en la longitud del frente explotado por tajos largos como en la longitud de los paneles (bloque de carbón a través del cual progresa el frente) trabajados con este sistema. A título ilustrativo valga citar que en Estados Unidos la longitud media del frente trabajado con este sistema aumentó de 150 m en 1980 a 227 m en 1993. En Alemania, la media en el decenio de 1990 era de 270 m y están previstas longitudes de frente de más de 300 m. En el Reino Unido y Polonia, los frentes típicos son de más de 300 m de longitud. La longitud del panel viene determinada por factores geológicos como las fallas o la extensión de la mina, pero en condiciones normales suele ser de más de 2,5 km. En Estados Unidos se está estudiando la posibilidad de explotar paneles de hasta 6,7 km de longitud.

El sistema de explotación en retirada se está convirtiendo en el más habitual, aunque requiere una mayor inversión inicial para el trazado de vías hasta el límite de cada panel antes de poder comenzar la extracción por tajos largos. Actualmente, siempre que resulta viable, se excavan las vías en la veta de carbón, utilizando turnos continuos de mineros y sustituyendo los arcos de acero y los refuerzos anteriormente utilizados para soportar las rocas superiores por pernos de consolidación, en lugar de limitarse a reaccionar de forma pasiva ante los movimientos de rocas. Sin embargo, su aplicación está supeditada a la existencia de rocas resistentes en el techo.

Precauciones de seguridad

Las estadísticas de la OIT (1994) indican que existe una gran variación en la tasa de accidentes mortales en las minas de carbón de todo el mundo, aunque en estos datos hay que tener en cuenta el nivel de complejidad del trabajo y el número de trabajadores empleados en cada país. En muchos países industrializados las condiciones han mejorado considerablemente.

En la actualidad, son relativamente infrecuentes los accidentes graves en las minas gracias a la mejora de los estándares de ingeniería y a la incorporación de la lucha contra incendios a materiales como las cintas transportadoras y los fluidos hidráulicos utilizados en las minas subterráneas. Sin embargo, sigue existiendo el riesgo de que se produzcan accidentes con daños personales o materiales. Igualmente, se siguen produciendo explosiones de gas metano y de polvo de carbón, a pesar de la mejora de las prácticas de ventilación, y los hundimientos de techos son los causantes de la mayor parte de los accidentes graves en todo el mundo. Los incendios, bien de equipos o como resultado de una combustión espontánea, representan un peligro especial.

Para las dos opciones extremas, funcionamiento prácticamente manual y altamente mecanizado, las tasas y los tipos de accidentes difieren mucho. Los trabajadores empleados en pequeñas minas de explotación manual están más expuestos a accidentes por caídas de rocas o carbón del techo o de las paredes. También están más expuestos al polvo y a los gases inflamables si los sistemas de ventilación no son los adecuados.

Tanto el sistema de cámaras y pilares como el trazado de vías para acceder a los paneles de explotación por tajos largos requieren un soporte del techo y de los muros laterales. El tipo y la distancia entre soportes varía dependiendo, entre otras cosas, del grosor de la veta de carbón, de la solidez de la roca superior y de la profundidad de la veta. El lugar más peligroso de una mina es debajo de un techo sin soportes, y la mayoría de los países imponen serias limitaciones legales a la longitud de vía que puede desarrollarse antes de instalar los soportes adecuados. La recuperación de pilares en el sistema de cámaras y pilares

presenta un riesgo específico por la posibilidad de que el techo se hunda de forma inesperada, lo que hace necesaria una planificación cuidadosa para evitar un riesgo mayor para los trabajadores.

El sistema moderno de extracción de frentes por tajos largos, de alta productividad, requiere un equipo reducido de seis a ocho trabajadores, de forma que el número de personas expuestas a riesgos potenciales es ahora mucho menor. El problema principal es el polvo generado por la rozadora de tajos largos. Para que el flujo de ventilación arrastre el polvo lejos de los trabajadores de la rozadora, el corte de carbón a veces se limita a una sola dirección a lo largo del frente. El calor generado por las máquinas eléctricas cada vez más potentes que se emplean en las proximidades del frente tiene asimismo efectos nocivos sobre los trabajadores, especialmente a medida que se va profundizando en la mina.

También está aumentando la velocidad de trabajo de las rozadoras. A finales del decenio de 1990, la velocidad de corte ha llegado a alcanzar los 45 m/minuto. Se duda que los trabajadores puedan resistir físicamente un turno entero de trabajo manejando una rozadora que se desplaza constantemente a esa velocidad a lo largo de un frente de 300 m. En consecuencia, este factor será un motivo importante para introducir de forma masiva sistemas de automatización de las máquinas en los que los mineros actuarían como simples supervisores y no como operarios directos.

La recogida de los equipos empleados en el frente y su traslado a un nuevo lugar de trabajo representa un riesgo especial para los trabajadores. Se han desarrollado métodos innovadores para asegurar el techo y las paredes del frente de carbón de forma que se minimice el riesgo de caída de rocas durante las operaciones de traslado. Sin embargo, la maquinaria utilizada es extremadamente pesada (más de 20 toneladas para un equipo acarreador de frente largo y bastante más en el caso de una rozadora) y a pesar del uso de herramientas específicas, en estas operaciones de traslado sigue existiendo el riesgo de aplastamiento de personas o de lesiones por manejo de grandes pesos.

● MINAS A CIELO ABIERTO

Thomas A. Hethmon y Kyle B. Dotson

Trazado de las minas

Planificación y diseño de la mina

El principal objetivo económico de las minas a cielo abierto es extraer la cantidad mínima de material y obtener una máxima recuperación de la inversión procesando el producto mineral más comercializable. Cuanto mejor sea la calidad del filón, mayor será su valor. Para minimizar las inversiones de capital y acceder al mismo tiempo al material de mayor valor dentro de un filón, hay que desarrollar un plan de explotación que detalle de forma precisa el método de extracción y de tratamiento del mineral. Dado que muchos yacimientos no presentan una disposición uniforme, antes de elaborar el plan de explotación de la mina es necesario emprender amplias perforaciones exploratorias para perfilar la geología y localización del mineral. La forma del filón definirá el tamaño y el diseño de la mina. El diseño depende de la mineralogía y la geología de la zona. La mayoría de las minas a cielo abierto son de forma cónica, aunque ésta puede variar dependiendo de la forma del filón. Se construyen con una serie de mantos o antepechos concéntricos divididos por el acceso a la mina y las vías de acarreo que descienden desde el borde de la mina hasta el fondo en forma de espiral o zigzag.

Independientemente de su tamaño, el plan de la mina incluye disposiciones sobre el trazado, las infraestructuras (de almacenamiento, oficinas, mantenimiento, etc.), el transporte, los equipos y el ritmo de explotación que repercuten en el período de vida útil de la mina, que concluye con el agotamiento del mineral o con el cumplimiento de un límite económico.

Las minas a cielo abierto actuales pueden consistir en pequeñas empresas privadas que procesan unos cientos de toneladas de mineral al día hasta grandes complejos industriales estatales o empresas multinacionales que extraen más de un millón de toneladas de material diario. Las operaciones de mayor envergadura pueden realizarse en superficies de muchos kilómetros cuadrados.

Capa de cobertura de extracción a cielo abierto

La capa de cobertura es la roca residual formada por material consolidado y no consolidado que debe eliminarse para dejar al descubierto el mineral subyacente. Es aconsejable eliminar la menor cantidad posible de capa de cobertura para acceder al mineral de interés, pero si el filón es profundo será necesario excavar un volumen mayor de roca residual. La mayoría de las técnicas de eliminación son cíclicas, con interrupción de las fases de extracción (perforación, voladura y carga) y transporte. Esto es especialmente válido en terrenos de recubrimiento de roca dura que deben ser previamente perforados y barrenados. Una excepción a este carácter cíclico la constituyen las dragas utilizadas en la minería de superficie con equipos hidráulicos y en algunos tipos de minería de material suelto con excavadoras de ruedas y cangilones. La relación de extracción a cielo abierto define la relación entre la parte de roca residual y la parte de mineral excavado. En operaciones importantes de minería esta relación suele estar comprendida entre 2:1 y 4:1. Las relaciones superiores a 6:1 tienden a ser menos viables desde el punto de vista económico, aunque depende del mineral extraído. La capa de cobertura, una vez extraída, puede utilizarse para la construcción de carreteras y para relaves o comercializarse como material de relleno.

Selección del equipo de minería

La selección del equipo de minería aparece definida en el plan de la mina. Algunos de los factores que deben tenerse en cuenta a tal fin son la topografía de la mina y del área circundante, la cantidad de mineral que va a extraerse, la velocidad y distancia a que debe transportarse el mineral para su procesamiento y la vida útil estimada de la mina. Por lo general, la mayoría de las operaciones en las minas a cielo abierto se efectúan con equipos de perforación móviles, palas hidráulicas, palas cargadoras de ataque frontal, cucharas de carga y camiones para extraer el mineral e iniciar su procesamiento. Cuanto mayor sea el volumen de operación de la mina, mayor capacidad deberá tener el equipo para poder mantener el plan de la mina. Por lo general, se elige el mayor equipo disponible de acuerdo con la economía de escala de la mina a cielo abierto y la capacidad necesaria. Así, por ejemplo, una pequeña pala cargadora de ataque frontal puede llenar un gran camión de transporte pero la operación no resultaría eficiente. De forma análoga, una pala de gran capacidad puede cargar camiones más pequeños pero obligaría a los camiones a reducir sus tiempos de ciclo y no se optimizaría la utilización de la pala, pues su cangilón puede contener mineral para cargar más de un camión. Si se intenta cargar sólo medio cangilón o cargar un camión en exceso se reduce el nivel de seguridad. El tamaño del equipo elegido debe estar de acuerdo también con las instalaciones de mantenimiento disponibles. A menudo se producen problemas con grandes equipos debido a las dificultades logísticas para transportarlos a las instalaciones de mantenimiento adecuadas. Siempre que sea posible, las instalaciones de mantenimiento de la mina deben corresponderse con el

tamaño y la cantidad de los equipos de la mina. Por tanto, cada vez que se introduzcan en el plan de la mina nuevos equipos de mayor tamaño, deberá ajustarse asimismo la infraestructura de apoyo (tamaño y calidad de las vías de acarreo, herramientas, instalaciones de mantenimiento, etc.).

Métodos convencionales de la minería a cielo abierto

Las dos categorías principales de la minería superficial son la minería a cielo abierto y la minería de extracción a cielo abierto, que representan más del 90 % de la explotación minera mundial a cielo abierto. Las principales diferencias entre ambos métodos son la localización del mineral y la forma de extracción mecánica. En la tecnología para roca suelta, el proceso en serie de arrancado y carga es básicamente continuo. La tecnología para roca consolidada requiere un proceso discontinuo de fases de perforación y voladura y fases de carga y acarreo. Con las técnicas de *minería de extracción a cielo abierto* (o minería a cielo abierto) se extrae el mineral que se encuentra próximo a la superficie y que se presenta en vetas relativamente planas o tabulares. Se utiliza maquinaria como palas, camiones, dragalinas, excavadoras de ruedas de cangilones y cucharas de carga. La mayoría de las minas de descortezado procesan yacimientos de roca no consolidada. El carbón es el mineral que se extrae de forma más habitual con técnicas de descortezamiento de filones superficiales. Por el contrario, *la minería a cielo abierto* se utiliza para extraer mineral consolidado que se encuentra diseminado o en vetas profundas utilizando, por lo general, palas y camiones. Muchos metales, como oro, plata y cobre, se extraen con la técnica de cielo abierto.

La *explotación en canteras* es un término que se utiliza para describir una técnica especial de minería a cielo abierto que consiste en la extracción de roca con un alto grado de compactación y densidad de yacimientos localizados. La piedra que se extrae en las canteras puede ser machacada o fracturada para producir agregados o piedra para construcción, como la dolomita y la piedra caliza, o combinarse con otros productos químicos para producir cemento y cal viva. Los materiales de construcción se obtienen en canteras situadas en las proximidades del lugar de utilización del material con el fin de reducir los costes de transporte. Otra clase de material extraído de las canteras son las piedras para construcción, como placas, granito, piedra caliza, mármol, arenisca y pizarra. Este tipo de canteras se localizan en zonas con las características minerales deseadas, que pueden estar o no geográficamente alejadas y hacer necesario el transporte a los correspondientes mercados.

Muchos yacimientos son demasiado irregulares, demasiado pequeños o demasiado profundos para ser explotados mediante métodos de descortezado o a cielo abierto y deben extraerse con un enfoque de minería subterránea. Para determinar cuándo es aplicable la minería a cielo abierto hay que considerar factores como el terreno y la altitud del lugar y la región, la lejanía, el clima, la infraestructura de carreteras, el suministro de electricidad y agua, los requisitos legales y ambientales, la estabilidad de la ladera, la eliminación de la capa de cobertura y el transporte del producto.

Terreno y altitud: La topografía y la altitud del terreno desempeñan un papel importante, pues definen la viabilidad y el alcance del proyecto de minería. En general, cuanto mayor sea la altitud y más irregular el terreno, más difícil será el trazado y la explotación de la mina. Un mineral de mayor calidad en un lugar montañoso de difícil acceso puede extraerse con menos eficiencia que un mineral de menor calidad pero situado en una planicie. Las minas situadas a menor altura presentan, por lo general, menos problemas derivados de las inclemencias atmosféricas durante las fases de prospección, trazado y explotación

de la mina. Por tanto, la topografía y la localización repercuten en la técnica de minería y en la viabilidad económica.

La decisión de explotar una mina se toma después de definir el yacimiento de mineral durante la fase de prospección y determinar las opciones de extracción y procesamiento del mineral en los estudios de viabilidad. Entre la información necesaria para elaborar un plan de trazado se encuentran la forma, el tamaño y la calidad de los minerales del yacimiento, el volumen total o tonelaje de material, incluida la capa de cobertura, además de otros factores como la hidrología, el acceso a una fuente de agua de procesamiento, la disponibilidad de una fuente de electricidad, de lugares de almacenamiento de la roca residual, los requisitos de transporte y las características de la infraestructura, incluida la localización de centros de población con mano de obra o la necesidad de crear un centro de población. Los requisitos de transporte pueden incluir carreteras, autovías, conducciones, aeropuertos, ferrocarriles, vías fluviales y puertos.

Las minas a cielo abierto requieren, por lo general, grandes extensiones de terreno en las que puede no existir la infraestructura necesaria. En este caso, primero hay que construir carreteras, instalaciones y centros habitables. La mina se desarrolla en función de otros elementos de procesamiento, como áreas de almacenamiento de la roca residual, machacadoras, concentradores, hornos de fusión y refinerías, dependiendo del grado de integración necesario. Debido al gran volumen de inversión necesario para financiar estas operaciones, el trazado puede realizarse en fases que permitan ir comercializando lo antes posible el mineral inicial extraído y seguir financiando el resto del trazado.

Explotación y equipos

Perforación y voladura

En la mayoría de las minas a cielo abierto las operaciones de perforación y voladura son las primeras que se realizan para extraer el mineral, y suelen ser el método más utilizado para eliminar la capa de cobertura de roca dura. Aunque existen muchos sistemas mecánicos para fragmentar la roca dura, los explosivos son el método más habitual, dado que no existe ningún sistema mecánico que pueda igualar la capacidad de fragmentación de la energía de una carga explosiva. Para volar rocas suele emplearse nitrato amónico. El equipo de perforación se elige en función de la naturaleza del mineral y de la velocidad y profundidad de los barrenos necesarios para fragmentar un volumen específico de mineral diario. Por ejemplo, para extraer un antepecho de 15 m de mineral, es necesario perforar más de 60 barrenos, según la longitud del antepecho, a 15 m por detrás del frente de desescombro. En este proceso hay que tener en cuenta el tiempo necesario para preparar el lugar para las actividades de carga y arrastre posteriores.

Carga

Actualmente, en la minería de superficie se utilizan palas de mesa, cargadoras de ataque frontal o hidráulicas. En las minas a cielo abierto el equipo de carga se selecciona de forma que los camiones puedan cargarse en tres a cinco ciclos o pases de la pala; sin embargo, existen otros factores que determinan el tipo de equipo de carga. Para rocas duras o climas húmedos son preferibles las palas sobre orugas. En cambio, para cargar material de pequeño volumen y fácil extracción resultan mucho más económicas e indicadas las cargadoras sobre neumáticos. Además, por su movilidad, las cargadoras son adecuadas en lugares en que se requieran desplazamientos rápidos de una zona a otra o para operaciones de mezclado de mineral. Las cargadoras también se utilizan con frecuencia para cargar, transportar

y volcar en las machacadoras los montones de mineral de mezclado depositados por los camiones.

Las palas hidráulicas y las de cable presentan ventajas y limitaciones similares. Las primeras no son adecuadas para la extracción de minerales duros y las segundas suelen ser de mayor tamaño, por lo que en minas donde la producción es superior a 200.000 toneladas al día los equipos adecuados son las grandes palas de cable con capacidades superiores a 50 metros cúbicos. Por el contrario, las palas hidráulicas son más versátiles en el frente de la mina y permiten al operario una mayor selectividad de la carga del mineral desde el fondo o la mitad superior del frente de la mina. Esta ventaja es importante cuando en la zona de carga es posible separar el mineral de la roca residual, optimizando así la calidad del mineral que se carga y procesa.

Acarreo

El acarreo en las minas a cielo abierto y de extracción se realiza, por lo general, con camiones. El papel de los camiones en muchas minas a cielo abierto se limita al traslado del material entre la zona de carga y puntos de transferencia, como la estación interna de machaqueo o el sistema de transporte. Los camiones tienen una mayor flexibilidad de funcionamiento que el ferrocarril, método de transporte predominante hasta el decenio de 1960. El coste del transporte en las minas de superficie metálicas y no metálicas suele ser superior al 50 % del coste total de operación de la mina. La trituración dentro de la mina y el transporte mediante sistemas de cintas ha contribuido de forma decisiva a reducir este elevado coste de transporte. Las innovaciones introducidas en los camiones, como los motores diesel o la transmisión eléctrica, han permitido aumentar la capacidad de los vehículos. Actualmente, algunos fabricantes construyen camiones de más de 240 toneladas y en un futuro próximo se espera llegar hasta las 300 toneladas. Además, el uso de sistemas informáticos de gestión de cargas y la tecnología de posicionamiento por satélite permiten el seguimiento y la planificación de los vehículos con una mayor eficiencia y productividad.

El acarreo puede realizarse en vías de dirección única o doble. La conducción puede ser por la derecha o por la izquierda; esta última se utiliza más porque permite al operario ver mejor la posición de las ruedas en camiones muy grandes. La circulación por la izquierda ha permitido asimismo mejorar la seguridad al reducir la posibilidad de colisión en el lateral del conductor. Las pendientes en las vías de transporte suelen estar limitadas al 8-15 % para transportes sostenidos, situándose el valor óptimo entre el 7 % y el 8 %. La seguridad y el drenaje de las aguas requieren pendientes fuertes con secciones mínimas de 45 m y un gradiente máximo del 2 % cada 460 m de pendiente. Las bermas (bordes elevados) entre la carretera y la excavación constituyen una norma de seguridad en las minas de superficie, aunque también pueden estar situadas en el centro de la carretera para separar las dos direcciones del tráfico. En las carreteras alternadas?? pueden instalarse vías de escape de elevación creciente al final de las pendientes prolongadas. Las barreras de limitación como las bermas deben utilizarse de forma normalizada entre la carretera y las excavaciones adyacentes. Unas carreteras de alta calidad mejoran la productividad al aumentar la velocidad de seguridad de los camiones y reducir el tiempo muerto de mantenimiento y la fatiga del conductor. El buen mantenimiento de las carreteras para el tránsito de camiones contribuye a reducir los costes de funcionamiento gracias a un menor consumo de combustible, una mayor vida útil de los neumáticos y menores costes de reparación.

El transporte por ferrocarril es el más indicado para acarrear el mineral a gran distancia de la mina, pero ya no suele utilizarse en las minas a cielo abierto desde la aparición de los

camiones de motor eléctrico y diesel. El acarreo por ferrocarril dentro de las minas se ha abandonado por la mayor versatilidad y flexibilidad de los camiones de carga y los sistemas de transporte. El ferrocarril sólo puede desplazarse por pendientes muy suaves del 0,5 % al 3 % y la inversión en máquinas e infraestructuras es muy elevada, sólo justificada en minas con una vida útil muy larga y grandes volúmenes de explotación que permitan amortizar la inversión.

Tratamiento del mineral

La trituración y el acarreo dentro del pozo es un método que ha ido ganando popularidad desde que se inició a mediados del decenio de 1950. La instalación de una trituradora semimóvil en el pozo de la mina y el posterior arrastre del mineral fuera del mismo mediante un sistema de transporte aporta importantes ventajas de explotación y un ahorro de costes frente al transporte tradicional en vehículos, pues reduce los gastos de construcción y mantenimiento de carreteras de alto coste y minimiza el consumo de combustible y los costes de mano de obra asociados al manejo y el mantenimiento de los camiones.

La razón de instalar el sistema de trituración dentro del pozo es básicamente permitir el transporte del mineral con una cinta transportadora. Estos sistemas pueden ser permanentes o móviles, aunque su diseño suele ser de tipo modular, lo que facilita su transporte dentro de la mina. La operación de traslado de una trituradora (transcurridos de 1 a 10 años) puede requerir horas, días o meses dependiendo del tamaño, la complejidad de la unidad y la distancia de desplazamiento. Las ventajas de las cintas transportadoras frente a los camiones son la puesta en marcha instantánea, el funcionamiento automático y continuo y un alto grado de fiabilidad con una disponibilidad de hasta el 90-95 %. Estos equipos no se ven afectados, por lo general, por las inclemencias atmosféricas. Las cintas transportadoras también presentan unas exigencias de funcionamiento muy inferiores a las de los camiones; el funcionamiento y el mantenimiento de una flota de camiones puede requerir diez veces más personal que un sistema de acarreo de capacidad equivalente. Además, las cintas transportadoras pueden trabajar con pendientes de hasta el 30 %, mientras que los camiones sólo pueden hacerlo con pendientes del 10 %. Al utilizar pendientes más pronunciadas se evita eliminar la capa de cobertura de baja calidad e incluso puede que no sea necesario construir carreteras de alto coste. Los sistemas de cintas transportadoras también pueden integrarse en palas de cangilones de carga para muchas operaciones de extracción de carbón en minas a cielo abierto, lo que evita el uso de camiones.

Sistemas de minería por disolución

El sistema por disolución, que es el más habitual de los dos utilizados en la minería con agua, se aplica para la extracción de mineral soluble allí donde los métodos de minería convencionales resultan menos eficientes y/o menos económicos. Esta técnica, que también recibe el nombre de lixiviación o lixiviación superficial, constituye en ocasiones el método básico de explotación, como ocurre en los yacimientos de oro y plata, mientras que en otras se utiliza para completar las fases pirometalúrgicas convencionales de fundido y refinado, como en los yacimientos de óxidos de baja calidad. En cualquier caso, los métodos por disolución superficial presentan dos características comunes: 1) el mineral se extrae de la forma habitual y se apila en montones y 2) se vierte una solución acuosa en la parte superior del montón que reacciona químicamente con el metal de que se trate y, cuando éste escurre por el montón, se recoge y procesa. La aplicación del sistema de disolución superficial depende del volumen, de la metalurgia de los minerales de interés y del tipo de roca hospedante, así como del espacio y el drenaje disponible para

Aspectos ambientales de la minería a cielo abierto

Las importantes repercusiones ambientales de las minas a cielo abierto son claramente visibles sea cual sea su ubicación. La alteración del terreno, la destrucción de la flora y los efectos negativos sobre la fauna autóctona son sus consecuencias inevitables. La contaminación de la superficie y de las aguas subterráneas a menudo constituye un problema, especialmente a causa de los lixiviantes en la minería por disolución y de los derrumbes en la minería hidráulica.

Gracias al trabajo de los ecologistas y al uso de aviones y de fotografías aéreas, las empresas de minería ya no pueden "cavar e irse" una vez concluida la extracción del mineral. En la mayoría de los países desarrollados se han adoptado leyes y normativas, que las organizaciones internacionales están promoviendo en los países en que todavía no existen. Esas normativas establecen un programa de gestión medioambiental como parte integrante de todo proyecto de minería al tiempo que exigen estudios preliminares de impacto ambiental, programas de rehabilitación progresiva (con recuperación del aspecto del terreno, reforestación, restauración de la fauna y de la flora autóctona, etc.), así como una auditoría de cumplimiento durante la explotación y a largo plazo (UNEP 1991, UN 1992, Environmental Protection Agency (Australia) 1996, ICME 1996). Es fundamental que este programa no se quede en meras afirmaciones en la documentación necesaria para obtener la licencia gubernamental. Los gestores de campo deben aceptar y poner en la práctica los principios básicos, que han de comunicarse asimismo a los trabajadores de todos los niveles.

crear vertederos de lixiviación suficientemente amplios como para que la operación sea rentable.

El trazado de los vertederos de lixiviación de una mina de superficie en que la disolución constituya el método básico de explotación es similar a los de las minas a cielo abierto, salvo que el mineral se destina únicamente al vertedero y no al procesamiento. En minas con métodos de procesamiento y de disolución, el mineral se separa en una parte procesada y otra lixiviada. Así, por ejemplo, la mayor parte del mineral de sulfuro de cobre se procesa y purifica hasta conseguir una calidad comercial aceptable mediante fundición y refinado. El mineral de óxido de cobre, que generalmente no admite el tratamiento pirometalúrgico, se somete a operaciones de lixiviación. Una vez creado el vertedero, la disolución lixivía el metal soluble de la roca adyacente a la velocidad deseada, controlable a través de los parámetros de diseño del vertedero, de la naturaleza y el volumen de la disolución aplicada así como de la concentración y la mineralogía del metal contenido en el mineral. La disolución que se utiliza para extraer el metal soluble se denomina *lixivante*. Los lixiviantes más habituales en este sector de la minería son disoluciones diluidas de cianuro sódico alcalino para el oro, ácido sulfúrico para el cobre, dióxido de azufre acuoso para el manganeso y ácido sulfúrico-sulfato férrico para el mineral de uranio. Sin embargo, la mayor parte del uranio y de las sales solubles lixivadas se recogen *in-situ* inyectando el lixivante directamente en el mineral del yacimiento, sin realizar una extracción mecánica previa. Esta técnica permite procesar minerales de calidad baja sin necesidad de extraer previamente el mineral del filón.

Salud y seguridad

Los riesgos profesionales de salud y seguridad relacionados con la extracción mecánica del mineral utilizando sistemas por

disolución son básicamente los mismos que en las minas de superficie convencionales. La única diferencia es que en las minas de superficie el mineral que no se va a lixiviar se somete a un trituración antes de ser enviado a fábrica para su procesamiento convencional, mientras que en el sistema de disolución el mineral suele transportarse en camiones directamente del lugar de extracción al vertedero de lixiviación. Los trabajadores de este tipo de minas están, por lo tanto, menos expuestos a peligros como polvo, ruido y accidentes físicos. Las principales causas de accidente en minas de superficie son el manejo de materiales, los resbalones y caídas, el uso de maquinaria, el uso de herramientas manuales o equipos eléctricos y el contacto con fuentes eléctricas. Sin embargo, un peligro específico del sistema por disolución es la exposición a los lixiviantes químicos durante las operaciones de transporte y lixiviación y los procesos químicos y electrolíticos. En los tanques de extracción electrolítica de metales puede existir cierta exposición a la niebla ácida, mientras que en la minería del uranio hay un riesgo de radiación ionizante, que aumenta desde la extracción a la clasificación.

Métodos hidráulicos en minería

En la minería hidráulica, para extraer el material suelto consolidado o no consolidado y formar una mezcla que es procesada posteriormente, se utiliza una vaporización con agua a alta presión. Los métodos hidráulicos se aplican básicamente a yacimientos de metales y de agregados, aunque el carbón, la arenisca y los relaves metálicos también pueden tratarse con este método. Su aplicación más común es el *sistema de aluvión*, que consiste en lavar metales como oro, titanio, plata, estaño o tungsteno en un depósito de aluvión. Para realizar el trazado de una instalación de minería hidráulica hay que tener en cuenta factores tan importantes como el suministro y la presión de agua, la pendiente del terreno de escorrentía, la distancia desde el frente de la mina a las instalaciones de procesamiento, el grado de consolidación del material extraíble y la disponibilidad de áreas de vertido. Al igual que en otros sistemas de minería superficial, su aplicación depende específicamente del lugar. Entre las principales ventajas de este método se encuentran unos costes relativamente bajos y una gran flexibilidad, derivados del uso de equipos sencillos, resistentes y móviles, por lo que muchas operaciones hidráulicas se desarrollan en áreas mineras remotas donde los requisitos de infraestructura no constituyen una limitación.

A diferencia de otros tipos de minería superficial, los sistemas hidráulicos utilizan el agua como medio tanto de extracción como de transporte del mineral extraído ("lavado a gran agua"). Con monitores o cañones de agua se envían al banco de aluvión o filón vaporizaciones de agua a alta presión que desintegran la grava y el material no consolidado, que una vez lavado pasa a las instalaciones de recogida y procesamiento. La presión del agua puede ser desde la propia de un flujo de caída para materiales finos muy sueltos hasta miles de kilogramos por centímetro cuadrado en yacimientos no consolidados. A veces se utilizan aplanadoras y máquinas niveladoras u otro equipo móvil de excavación para facilitar la extracción de los materiales más compactos. Tanto en el pasado como actualmente en operaciones a pequeña escala, la recogida de la mezcla o escorrentía se realiza con cajas y trampillas de pequeño volumen. Para operaciones a escala comercial, se utilizan bombas, estanques de contención y de sedimentación y equipos de separación que pueden procesar grandes volúmenes de lodos de lavado por hora. Dependiendo del tamaño del yacimiento, el control del agua puede realizarse de forma manual, por control remoto o por ordenador.

El método de minería hidráulica para tratar mineral situado bajo el agua se denomina dragado. Se utiliza una estación de

tratamiento por flotación para extraer depósitos sueltos, como arcilla, fango, arena, grava y otros minerales asociados, utilizando una línea de cangilones de draga, dragalinas y/o chorros bajo el agua. El material extraído se transporta por métodos hidráulicos o mecánicos hasta una estación de lavado integrada en el propio equipo de dragado o que puede estar físicamente separada y contener las fases posteriores de procesamiento para separar y completar el tratamiento. Aunque el dragado se utiliza para extraer minerales comerciales y agregados, es más conocido como técnica de limpieza y profundización de canales de agua y terrenos inundables.

Salud y seguridad

Los riesgos físicos de la minería hidráulica difieren de los de la minería superficial. Al haber una utilización mínima de operaciones de perforación, voladura, transporte y reducción, los riesgos se derivan principalmente de los sistemas de agua a presión, los movimientos manuales de equipos móviles, el suministro de energía y agua, los hundimientos de frentes de mineral y el mantenimiento de los equipos. Los riesgos para la salud están básicamente relacionados con la exposición al ruido y el polvo y los riesgos ergonómicos se concentran en el manejo de los equipos. La exposición al polvo es un problema menos importante que en la minería de superficie tradicional gracias al uso del agua como medio de tratamiento. Las actividades de mantenimiento como la soldadura incontrolada también pueden ser un riesgo para los trabajadores.

● CONTROL DE LA MINERÍA DEL CARBÓN A CIELO ABIERTO

Paul Westcott

Las características geológicas diferenciadoras de las minas de carbón a cielo abierto de otros tipos de minas a cielo abierto son la naturaleza de la formación y su valor relativamente bajo, lo que a menudo hace necesario mover grandes volúmenes de capa de cobertura en una amplia zona (es decir, una alta relación de descortezado). Por esta razón, para la minería del carbón a cielo abierto se han desarrollado equipos y técnicas específicos, como un sistema de extracción a cielo abierto mediante dragalinas que extraen tiras de un ancho de 30 a 60 m y vierte el material en galerías de hasta 50 km de longitud. La rehabilitación del entorno es una parte fundamental del ciclo de una mina debido al importante deterioro de estas áreas.

La producción de las minas de carbón a cielo abierto puede ser pequeña (inferior a 1 millón de toneladas al año) o de gran volumen (más de 10 millones de toneladas al año). La mano de obra necesaria depende de la extensión y el tipo de la mina, del tamaño y la cantidad de equipos utilizados y del volumen de carbón y de la capa de cobertura que deben extraerse. Existen algunos indicadores típicos que definen la productividad y el volumen de mano de obra, como:

1. producción por minero (toneladas x minero x año), con valores que oscilan entre 5.000 toneladas por minero y año y 40.000 toneladas por minero y año;
2. material total movido (toneladas x minero x año). Este indicador de productividad comprende el material de carbón y de capa de cobertura, con valores que oscilan entre 100.000 toneladas por minero y año, que se considera una productividad baja, y 400.000 toneladas por minero y año, que se considera una productividad muy alta.

Debido a la gran inversión de capital necesaria, muchas minas de carbón operan con turnos continuos 7 días a la semana, lo que requiere disponer de cuatro equipos: tres turnos de ocho horas y un cuarto turno que cubre los días de descanso.

Planificación de una mina

La planificación de las minas de carbón a cielo abierto es un proceso rutinario que puede resumirse en una lista de comprobación. El ciclo comienza con los estudios geológicos y de comercialización y finaliza con una evaluación económica. El nivel de detalle (y el coste) de la planificación aumenta a medida que el proyecto pasa por las diferentes fases de homologación y trazado. Antes de comenzar el trazado se realizan los estudios de viabilidad. La misma lista de comprobación es válida cuando el equipo de explotación comienza a desarrollar los planes anuales y quinquenales o los planes para cerrar la mina y rehabilitar la zona una vez extraído todo el carbón.

La planificación es un proceso continuo, con frecuentes actualizaciones derivadas de los cambios de mercado, tecnológicos y legislativos, así como de la información sobre el yacimiento que se va obteniendo a medida que avanza la explotación.

Influencias geológicas

Las características geológicas influyen en gran medida en la elección del método de minería y del equipo que se van a utilizar en una determinada mina de superficie de carbón.

La *inclinación de la veta de carbón*, o *pendiente*, representa el ángulo entre la veta de carbón y el plano horizontal. Cuanto mayor es la inclinación, más difícil resulta su explotación. La inclinación también afecta a la estabilidad de la mina; la inclinación límite para operaciones de dragalina es de unos 7°.

La *dureza* del carbón y de la roca residual determina el tipo de equipo que puede utilizarse y si es necesario aplicar técnicas de voladura al material. Los equipos de minería continua, como las excavadoras de rueda de cangilones utilizadas habitualmente en Europa oriental y Alemania, sólo sirven para material de una dureza muy baja que no requiera la aplicación de sistemas de voladura. La capa de cobertura suele ser demasiado dura para ser excavada sin realizar operaciones de voladura que fragmenten la roca en trozos más pequeños, que a continuación se cargan con palas y equipos mecánicos.

A medida que aumenta la *profundidad* de las vetas de carbón, va aumentando también el coste del transporte de los residuos y del carbón hasta la superficie o el vertedero. Alcanzada una determinada profundidad resulta más económico aplicar métodos de minería subterránea que de cielo abierto.

Es posible extraer vetas de carbón delgadas de hasta 50 mm de espesor, pero la recuperación del carbón se hace más difícil y costosa a medida que disminuye el *grosor de la veta de carbón*.

El término *hidrología* se refiere a la cantidad de agua presente en el carbón y en la capa de cobertura. Cantidades importantes de agua afectan a la estabilidad, y la necesidad de bombeo aumenta los costes.

El volumen de las *reservas* de carbón y la magnitud de la explotación influye en el tipo de equipo que debe utilizarse. Las minas pequeñas requieren equipos más reducidos y relativamente más caros, mientras que las minas grandes permiten las economías de escala y presentan costes menores por unidad de explotación.

Por *características ambientales* se entiende el comportamiento de la capa de cobertura una vez explotada. Algunas capas de cobertura son "acidificantes", lo que significa que, cuando quedan expuestas al aire y al agua, producen ácido que daña el medio ambiente, por lo que requieren un tratamiento especial.

Los factores anteriores, además otros no mencionados, determinan el método de minería y el equipo adecuados para una determinada mina de carbón a cielo abierto.

El ciclo de la mina

La metodología de las minas de carbón a cielo abierto puede dividirse en las fases siguientes:

La *eliminación de la capa superficial del suelo* y su almacenamiento o vertido en zonas de rehabilitación es una parte importante del ciclo, ya que el objetivo es devolver el terreno a una situación como mínimo equivalente a la que existía antes de iniciar la explotación. La capa superficial del suelo es un elemento importante pues contiene nutrientes para las plantas.

En la *preparación del terreno* pueden utilizarse explosivos para fragmentar las rocas de gran tamaño. En algunos casos esta operación la realizan aplanadoras con disgregadores mecánicos para fragmentar la roca en elementos más pequeños. En minas donde la dureza de la roca es baja no es necesario preparar el terreno, ya que la excavadora puede trabajar directamente en el frente de ataque.

La *eliminación de residuos* consiste en arrancar la roca situada encima de la veta de carbón y transportarla al vertedero. En una mina a cielo abierto que tenga el vertedero en las proximidades, esta operación es secundaria. Sin embargo, en algunas minas, el vertedero puede encontrarse a varios kilómetros de distancia debido a la estructura de la veta de carbón, por lo que resulta necesario acarrear hasta allí el material en camiones o cintas transportadoras.

La *extracción del carbón* consiste en arrancar el carbón del frente de la mina y acarrearlo fuera del pozo. El siguiente paso depende de la situación del mercado del carbón y de su uso final. Si hay que enviarlo a una estación eléctrica en la propia mina, se machaca y envía directamente a la caldera. Si el carbón es de baja calidad, puede mejorarse con un “lavado” en una planta de preparación, donde se separa el carbón de la capa de cobertura para obtener un producto de mayor calidad. Antes de enviarlo al mercado suele ser necesario triturarlo para que su tamaño sea uniforme y mezclarlo para controlar la calidad. El carbón puede acarreararse en camión, cinta transportadora, tren o barco.

La *rehabilitación* es la operación que se realiza en el vertedero para restaurar el terreno y cumplir los criterios de drenaje, volviendo a colocar la capa superficial de suelo y la vegetación para devolver al terreno su aspecto original. Otras consideraciones de tipo ambiental pueden ser:

- *control del agua*: desviación de cursos existentes de agua y control del agua de la mina mediante construcción de presas de sedimentación y reciclado de forma que no se vierta agua contaminada;
- *planificación visual*: para garantizar que el impacto visual sea mínimo;
- *flora y fauna*: para recuperar árboles y vegetación y devolver al terreno su fauna autóctona;
- *arqueología*: conservación y/o restauración de posibles lugares de interés cultural;
- *vacío final*: dar una utilidad al vacío resultante una vez cerrada la mina (p. ej., volverlo a llenar o convertirlo en un lago);
- *explosiones de aire y vibraciones* causadas por las voladuras, que deben realizarse con técnicas específicas si existen edificios en las proximidades,
- *ruido y polvo*, que han de controlarse para evitar molestias a los habitantes de las comunidades vecinas.

El impacto ambiental de las minas de carbón a cielo abierto puede ser importante, pero con una planificación y un control

adecuados durante todas las fases de la explotación, es posible cumplir todos los requisitos.

Métodos y equipos de minería

Existen tres métodos básicos para explotar las minas de carbón a cielo abierto: el sistema de camiones y palas, el sistema de dragalinas y el sistema basado en cintas transportadoras (p. ej., excavadoras de rueda de cangilones o trituradoras dentro de la mina), aunque en muchas minas se utilizan combinados. Hay también técnicas especiales, como la de barrenado y la de pared continua, que sólo representan una pequeña parte de la explotación total de las minas a cielo abierto de carbón. Los sistemas de dragalina y de rueda de cangilones de draga fueron desarrollados específicamente para las minas de carbón a cielo abierto, mientras que los sistemas de camiones y palas se utilizan en toda la industria minera.

El método de minería de *camiones y palas* requiere una excavadora (pala de cable eléctrico, excavadora hidráulica o pala cargadora de ataque frontal) para cargar en los camiones la capa de cobertura. La capacidad de éstos puede oscilar entre 35 y 220 toneladas. El camión transporta la capa de cobertura desde el frente del tajo hasta la zona de vertidos, donde un aplanadora arrastra y amontona la roca de acuerdo con el esquema previsto de rehabilitación. La gran flexibilidad del método de camión y pala hace que sea el más utilizado en la mayoría de los países del mundo.

El método de *dragalinas* es uno de los más económicos para arrancar la capa de cobertura, pero su funcionamiento está limitado por el aguilón. La dragalina se balancea sobre un eje central, pudiendo arrojar el material al vertedero a una distancia aproximada de 100 m de su posición. Para su utilización es necesario que la mina esté diseñada con franjas de extracción largas y estrechas.

La principal limitación de la dragalina es que sólo puede extraer la capa de cobertura hasta una profundidad de unos 60 m; para profundidades mayores hay que utilizar un sistema suplementario, como una flota de camiones y palas.

Los *sistemas de minería basados en cintas transportadoras* utilizan, como su nombre indica, cintas transportadoras en lugar de camiones para acarrear la capa de cobertura. Si ésta es de baja dureza puede arrancarse directamente en el frente con una excavadora de rueda de cangilones. Este método se dice que es “continuo” porque arranca la capa de cobertura y el carbón de forma ininterrumpida, mientras que las dragalinas y las palas operan de forma cíclica, cargando cada cangilón en 30-60 segundos. Las capas de cobertura más duras hay que tratarlas con una combinación de técnicas de voladura o trituración dentro de la mina y de carga con palas para introducir el material en la cinta transportadora. Este tipo de sistema está especialmente indicado cuando la capa de cobertura debe transportarse a grandes distancias o a gran altura.

Conclusión

La minería superficial del carbón requiere la utilización de equipos y técnicas especiales para arrancar grandes volúmenes de residuos y de carbón en zonas amplias. La rehabilitación de las minas es una parte fundamental del proceso global.

PROCESAMIENTO DEL MINERAL

Sydney Allison

Casi todos los metales y algunos materiales inorgánicos explotados en minas están integrados en compuestos que forman la

corteza terrestre. Los procesos que han conformado la superficie terrestre han ido concentrando estos minerales en cantidades muy diferentes. Cuando su concentración es suficientemente importante y permite que el mineral sea explotado y recuperado de forma rentable, el depósito se denomina yacimiento. Sin embargo, aun en este caso, los minerales no suelen encontrarse con la pureza necesaria para que su procesamiento sea inmediato y se pueda obtener el producto final deseado. En su obra sobre la minería en el siglo XVI, Agricola afirmaba que: “La naturaleza normalmente crea metales en un estado impuro, mezclados con tierra, piedras y líquidos solidificados, por lo que resulta necesario separar al máximo el mineral de estas impurezas antes de fundirlos”.

Primero, hay que separar los minerales valiosos de los que no tienen valor comercial, que reciben el nombre de *ganga*. Por procesamiento del mineral se entiende este tratamiento inicial del material extraído con el fin de obtener un mineral concentrado de una calidad suficientemente alta para que pueda ser procesado satisfactoriamente hasta obtener el metal puro u otro producto final. Las diferentes características de los minerales presentes permiten separarlos utilizando métodos físicos que no modifican, por lo general, la composición química del mineral (el procesamiento del carbón se estudia de forma específica en el artículo “Preparación del carbón”).

Trituración y molienda

El tamaño de partícula del material que llega a la planta de procesamiento dependerá del método utilizado y del tipo de mineral de que se trate, pero en cualquier caso siempre será relativamente grande. La *cominución* o reducción progresiva del tamaño de partícula del mineral se realiza por dos razones: para reducir el material a un tamaño más adecuado y para separar el componente valioso del material residual como primer paso hacia su recuperación efectiva. En la práctica, la cominución va seguida de la trituración del material en tambores giratorios de acero hasta obtener partículas más finas.

Trituración

No es posible pasar de trozos muy grandes a partículas finas en una sola operación o utilizando una única máquina. La trituración es normalmente una operación en seco que se suele realizar en fases (primaria, secundaria y terciaria).

En la trituración primaria se reducen los trozos de mineral de 1,5 m a 100-200 mm. Las máquinas, como las trituradoras de mandíbulas y las trituradoras giratorias, aplican una fuerza de fragmentación a las partículas de mayor tamaño que rompe el mineral por compresión.

En una trituradora de mandíbulas el mineral cae en un espacio en forma de cuña entre una placa fija y otra móvil. El material que entra se comprime hasta que se rompe. La operación se vuelve a repetir abriendo y cerrando las mandíbulas hasta que finalmente el material puede escapar por la abertura del fondo.

En la trituradora giratoria, un largo vástago soporta un elemento cónico de acero de gran peso que se mueve de forma excéntrica mediante un casquillo inferior de cojinete dentro de la cámara de la trituradora y que realiza la función de fragmentación. El movimiento relativo de los planos de trituración se produce mediante el giro del cono excéntrico contra la cámara externa. Normalmente, esta máquina se utiliza en minas de gran capacidad de producción.

En la trituración secundaria se reduce el tamaño de las partículas hasta 5-20 mm. Los principales tipos de trituradoras son la de conos, la de cilindros y la de martillos. La trituradora de conos es una máquina giratoria con un vástago más corto que no está suspendido sino apoyado sobre un soporte debajo del

cabezal. La trituradora de cilindros consta de dos cilindros horizontales que giran en sentido inverso, arrastran el mineral hacia su estrechamiento y después de una sola pasada descargan el producto. La trituradora de martillos es un dispositivo típico de impacto. La cominución se realiza mediante el impacto de los martillos, que están sujetos a un rotor dentro del espacio de trabajo y que golpean el material a gran velocidad.

Molienda

La molienda, última fase de la cominución, se realiza en recipientes giratorios cilíndricos de acero denominados tambores. Estos aparatos reducen las partículas de mineral a un tamaño de 10 a 300 mm. A los tambores se añade un agente de molienda, que pueden ser bolas de acero, varillas o trozos de mineral de tamaño prefijado y mucho más grandes que el material a granel alimentado, de forma que el mineral se va partiendo hasta alcanzar el tamaño deseado y en este caso el proceso recibe el nombre de *molienda autógena*. A veces se utiliza la molienda directa en la mina (ROM), que es una forma de molienda autógena en la que el mineral pasa directamente de la mina al equipo de molienda sin realizar un trituración previo, pues los trozos grandes de mineral actúan como agente de molienda.

El molino se carga, por lo general, hasta la mitad de su capacidad con mineral machacado y un agente de molienda. Estudios realizados han demostrado que este tipo de trituración es una combinación de sistemas de impacto y abrasión. En estos equipos se utilizan recubrimientos para evitar el desgaste de la cubeta, reducir el deslizamiento de los agentes de molienda y mejorar la relación entre la elevación y el impacto de la operación.

Existe un tamaño óptimo hasta el cual es necesario triturar el material para conseguir una separación y una recuperación efectiva del componente valioso, pues una trituración deficiente daría lugar a una liberación incompleta y a una recuperación baja, mientras que una molienda excesiva dificultaría la separación además de suponer un gasto excesivo de energía.

Separación por tamaños

Después de realizadas las operaciones de trituración y molienda, los productos se separan por tamaños con el fin de obtener un material de tamaño adecuado para su tratamiento posterior. El material demasiado grande se recicla hasta alcanzar una reducción mayor.

Cribado

El cribado se aplica, por lo general, para separar materiales bastante gruesos. También puede utilizarse para conseguir un tamaño uniforme del material para un tratamiento posterior. El cribón está formado por una serie de pesadas barras paralelas sujetas por un marco para cribar materiales muy gruesos. El tromel es una criba cilíndrica inclinada giratoria. Utilizando cribas con secciones de diferente tamaño pueden obtenerse simultáneamente productos de varios tamaños.

Clasificadores

La clasificación es la separación de partículas de acuerdo con su velocidad de sedimentación en un fluido, para lo que se utilizan de forma efectiva las diferencias de densidad, tamaño y forma. Los clasificadores se utilizan para separar el material grueso del fino, obteniendo una gran distribución de tamaños. Los clasificadores se suelen emplear en operaciones de molienda de circuito cerrado. Aunque el objetivo principal es la separación por tamaños, normalmente se produce al mismo tiempo cierta separación por tipos de minerales a causa de la diferencia de densidad.

En los clasificadores de espiral, un mecanismo de rastrillo levanta las arenas más gruesas de un estanque de fangos de lavado para obtener un producto desenfangado.

En el hidrociclón se utiliza la fuerza centrífuga para acelerar la velocidad de sedimentación y producir una separación eficiente de las partículas finas. Los fangos de lavado se introducen en un recipiente cónico que gira a gran velocidad tangencial. Debido al movimiento de giro, el sedimento más rápido, es decir, las partículas mayores y más pesadas se desplazan hacia la pared exterior donde la velocidad es menor y se sedimentan, mientras que las partículas más ligeras y pequeñas se desplazan hacia la zona de baja presión a lo largo del eje, donde son arrastradas hacia arriba.

Separación por concentración

Se trata de separar las partículas del mineral valioso de las partículas de ganga para obtener como resultado un concentrado y un producto residual. El objetivo es conseguir una recuperación máxima del mineral valioso con una calidad aceptable para su posterior procesamiento o venta.

Clasificación del mineral

El método más antiguo y sencillo de separación por concentración es la selección visual y la separación manual de las partículas. La clasificación manual ha sido sustituida por una serie de métodos electrónicos. En los métodos fotométricos, las partículas se separan por la diferente reflectancia de los minerales. A continuación, una explosión de aire comprimido sirve para sacar el material de la cinta móvil. Un proceso análogo puede aplicarse teniendo en cuenta las diferentes conductividades de los minerales.

Separación en medio pesado

La separación en medio pesado o denso es un proceso que depende exclusivamente de la diferente densidad de los minerales. Se introduce la mezcla de minerales en un líquido cuya densidad se encuentre entre las de los dos minerales que se desea separar. El material más ligero flotará y el más pesado se sedimentará. En algunos procesos se utiliza este método para la clasificación previa de los minerales antes de la trituración final y se emplea con frecuencia como una fase de lavado en la preparación del carbón.

En ciertas aplicaciones, se utilizan fluidos orgánicos pesados como el tetrabromoetano, con una densidad relativa de 2,96, pero a escala comercial se usan normalmente suspensiones de sólidos finamente triturados que se comportan como simples fluidos newtonianos, como la magnetita y la ferrosilicona, que forman "fluidos" estables, inertes y de baja viscosidad y son fácilmente separables de la suspensión por medios magnéticos.

Fuerza de gravedad

Los procesos de separación natural, como los sistemas fluviales, producen depósitos de aluvión en donde las partículas mayores y más pesadas se separan de las más pequeñas y ligeras. Las técnicas basadas en la fuerza de la gravedad imitan a estos procesos naturales. La separación se consigue por el equilibrio entre el peso de la partícula y la resistencia ejercida por el fluido en el que tiene lugar la separación.

A lo largo de los años se han ido desarrollando diversos tipos de separadores por gravedad, cuyo uso continuo refleja la buena relación coste/efectividad de este tipo de separación.

En una *criba hidráulica* se suspende ("fluidifica") un lecho de partículas de mineral mediante una corriente pulsante de agua. A medida que el agua dreña entre cada ciclo, las partículas más densas caen por debajo de las menos densas y, durante un período de drenaje, las partículas pequeñas (y especialmente las

partículas más densas y más pequeñas) penetran en los espacios entre las partículas más grandes y se sedimentan en el lecho. Al repetir el ciclo, aumenta el grado de separación.

En las *mesas de agitación* se trata material más fino que en las cribas hidráulicas. La mesa consta de una superficie plana que se balancea ligeramente en sentido longitudinal y transversal. Unos separadores de madera dividen la mesa en sentido longitudinal en ángulo recto. El mineral entra a lo largo del extremo superior y las partículas son arrastradas hacia abajo por el flujo de agua al tiempo que se someten a vibraciones asimétricas a lo largo del eje longitudinal u horizontal. Las partículas más densas, que tienden a quedar atrapadas detrás del separador, se distribuyen por la mesa a causa de las vibraciones.

Separación magnética

Todos los materiales se ven afectados por los campos magnéticos, aunque en la mayoría de los casos su efecto es demasiado débil para detectarse. Ahora bien, si uno de los componentes minerales de una mezcla presenta una susceptibilidad magnética fuerte, puede utilizarse para separarlo de los demás. Los separadores magnéticos se clasifican en aparatos de baja o alta intensidad y en separadores secos o húmedos.

Un separador de tipo tambor consta de un tambor giratorio no magnético que en su interior contiene imanes estacionarios de polaridad alternante. Las partículas magnéticas al ser atraídas por los imanes se adhieren al tambor y son lanzadas fuera del campo magnético. Un separador húmedo de alta intensidad (WHIMS) tipo carrusel consta de una matriz concéntrica giratoria de bolas de hierro que pasa a través de un fuerte electroimán. Los residuos de fango de lavado se vierten en la matriz donde actúa el electroimán y seguidamente las partículas magnéticas son atraídas hacia la matriz imantada mientras que el grueso de la mezcla pasa y sale por una rejilla de base. Justo después del electroimán, el campo se invierte y mediante una corriente de agua se elimina la fracción magnética.

Separación electrostática

La separación electrostática, que se utilizaba antiguamente de forma habitual, ha sido sustituida en gran medida por el sistema de flotación (véase más adelante). Sin embargo, se aplica con éxito a algunos minerales (rutilo, etc.) a los que resulta difícil aplicar otros métodos pero cuya conductividad permite la separación electrostática.

Este método se basa en las diferencias de conductividad eléctrica de los minerales. Se introduce mineral seco en el campo de un electrodo ionizante y se cargan las partículas mediante bombardeo de iones. Las partículas conductoras pierden rápidamente esta carga pasándola a un rotor con toma de tierra y son despedidas por la fuerza centrífuga. Las partículas no conductoras pierden su carga más lentamente, permaneciendo adheridas a la toma de tierra por la fuerza electrostática, para ser enviadas a un punto de recogida.

Flotación

La flotación es un proceso de separación que se basa en las diferencias en las propiedades superficiales fisicoquímicas de los minerales.

En este proceso se añaden a la pulpa unos reactivos químicos denominados colectores que reaccionan de forma selectiva con la superficie de las partículas del mineral valioso. Los productos de reacción que se forman convierten la superficie del mineral en hidrófoba o impermeable, de forma que se adhiere fácilmente a una burbuja de aire.

En cada celda de un circuito de flotación se agita la pulpa; así, el aire que se ha introducido se dispersa en el sistema. Las partículas de mineral hidrófobo se adhieren a las burbujas de aire y, si

hay presente un agente espumante adecuado, forman una espuma estable en la superficie que rebasa continuamente los laterales de la celda de flotación arrastrando consigo la carga de mineral.

Una planta de flotación está formada por bancos de celdas interconectadas. El concentrado obtenido en el primer banco se puede seguir limpiando de los componentes indeseados de ganga en un segundo banco más limpio e incluso, en caso necesario, en un tercer banco de celdas. El mineral valioso puede ser depurado en un cuarto banco y reciclado en bancos más limpios antes del descarte final de los residuos.

Deshidratación

Tras la mayoría de las operaciones suele ser necesario eliminar el agua utilizada en los procesos de separación del concentrado de la ganga residual. En entornos secos, esta operación resulta de especial interés porque permite reciclar el agua.

Un tanque de sedimentación consta de un recipiente cilíndrico donde se alimenta la pulpa en el centro a través de un alimentador que se coloca por debajo de la superficie para interferir al mínimo con los sólidos sedimentados. El líquido aclarado rebasa por los laterales del tanque y cae en una artesa. Unas aspas radiales con cuchillas rastrillan los sólidos sedimentados hacia el centro, donde son retirados. Pueden añadirse a la suspensión floculantes para acelerar la velocidad de sedimentación de los sólidos.

El proceso de filtración consiste en separar las partículas sólidas del fluido y obtener una pasta de concentrado que pueda ser secada y transportada. Para ello se suele utilizar un filtro de vacío continuo, como el filtro de tambor. En este aparato, un tambor cilíndrico horizontal gira en un tanque abierto con su sección inferior sumergida en la pulpa. La parte exterior del tambor consta de una serie de compartimientos cubiertos por un filtro y la parte interior de doble pared está conectada a un mecanismo de válvula en el eje central que permite aplicar el vacío o una determinada presión. Cuando se aplica el vacío a la sección sumergida en la pulpa pasa agua a través del filtro y se forma una pasta de concentrado en el tejido. El vacío deshidrata la pasta una vez que está fuera de los fangos de lavado. Justo antes de que la sección vuelva a entrar en estos fangos, se aplica presión para extraer la pasta. Los filtros de disco, formados por una serie de discos sujetos al eje central, funcionan con el mismo principio.

Eliminación de los relaves

Sólo una pequeña parte del mineral extraído contiene mineral valioso. El resto es la ganga que después del procesamiento da lugar a los relaves que hay que eliminar.

Los dos aspectos principales en la eliminación de los relaves son la seguridad y la economía. Con respecto a la seguridad, hay que tener en cuenta dos aspectos: las consideraciones físicas relativas al vertedero o presa donde se van a verter los relaves y la contaminación causada por el material residual, que puede afectar a la salud humana y causar daños al medio ambiente. Los relaves deben eliminarse de la forma más rentable posible pero respetando siempre las normas de seguridad.

Por lo general, los relaves se clasifican por tamaños, y la fracción arenosa gruesa se utiliza para construir la presa en el lugar elegido. La parte fina o fango se bombea en el embalse formado por el muro de la presa.

Cuando las aguas residuales contienen productos químicos tóxicos como cianuro, hay que acondicionar especialmente la base de la presa (p. ej., recubriéndola con un laminado plástico) para evitar la posible contaminación de las aguas subterráneas.

Siempre que sea posible, el agua de la presa se reciclará para un uso posterior, operación que puede ser de gran importancia

en las regiones secas y que cada vez es más exigida por las legislaciones para evitar la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales a causa de sustancias químicas.

Lixiviación en montón y lixiviación *in situ*

Gran parte del concentrado obtenido tras el procesamiento del mineral se sigue procesando con métodos hidrometalúrgicos. La parte de metal valioso se separa del mineral mediante lixiviación o disolución y después se separan entre sí los diferentes metales. Las soluciones obtenidas se concentran y el metal se recupera con métodos como la precipitación o la deposición electrolítica o química.

Muchos minerales presentan una calidad demasiado baja para justificar su concentración previa. El material residual también puede contener cierta cantidad de metal valioso, por lo que en algunos casos se reprocesa de forma rentable mediante un método hidrometalúrgico conocido como lixiviación en montón, que ya se utilizaba en las minas de Río Tinto en España hace más de 300 años. En estas minas, el agua que se filtraba lentamente a través de montones de mineral de baja calidad adquiría un color azulado por las sales de cobre en disolución procedentes de la oxidación del mineral. El cobre se recuperaba de la solución mediante precipitación sobre recortes de hierro.

Este proceso básico se utiliza actualmente en todo el mundo para la lixiviación en montón de óxidos y sulfuros de baja calidad y de material residual. Una vez creado un montón o un vertedero de material, se aplica el agente solubilizante adecuado (p. ej., una solución ácida) mediante rociado o inundación de la parte superior del montón y seguidamente se recupera la solución que se filtra por la base del mismo.

Aunque hace ya tiempo que se viene practicando con éxito la lixiviación en montón, hasta hace poco no se conocía el importante papel que desempeñan ciertas bacterias en este proceso. Las bacterias identificadas han sido la especie oxidante del hierro *Thiobacillus ferrooxidans* y la oxidante del azufre *Thiobacillus thiooxidans*. En el primer caso, la energía procede de la oxidación de los iones ferrosos a férricos y, en el segundo, de la oxidación de sulfuros a sulfatos. Estas reacciones catalizan de forma efectiva la oxidación acelerada de los sulfuros metálicos a los sulfatos metálicos solubles.

La lixiviación *in situ*, denominada a veces minería por disolución, es una variante de la lixiviación en montón y consiste en bombear la solución a minas abandonadas, obras hundidas, áreas remotas abandonadas o incluso yacimientos enteros en los que se ha comprobado su permeabilidad a la solución. Las formaciones rocosas tienen que permitir el contacto con la solución de lixiviación, y también es necesario disponer de oxígeno.

PREPARACION DEL CARBON

Anthony D. Walters

La preparación del carbón es el proceso por el cual el carbón en bruto extraído de la mina se convierte en un producto limpio y comercializable de tamaño coherente y calidad especificada por el consumidor. Los usos finales del carbón se agrupan en las siguientes categorías generales:

- *generación de electricidad*: el carbón se quema para suministrar el calor necesario y mover turbinas generadoras de electricidad;
- *fabricación de hierro y acero*: el carbón se somete a combustión en hornos, en ausencia de aire, con emisión de gases (materia volátil) para producir coque que se utiliza en los altos hornos en la fabricación de hierro y acero. También puede añadirse

directamente el carbón a los altos hornos como en el proceso de inyección de carbón triturado (PIC);

- *fines industriales*: el carbón se utiliza en la industria metalúrgica como reductor, y su contenido en carbono se utiliza para eliminar el oxígeno (reducción) en los procesos metalúrgicos;
- *calefacción*: el carbón puede utilizarse en los hogares y en la industria como combustible para calentar recintos. También se utiliza como combustible en hornos de secado para fabricar cemento.

Trituración y fragmentación

El carbón extraído de la mina debe triturarse hasta alcanzar un tamaño máximo aceptable para su tratamiento en la planta de preparación. Para ello, se utilizan los mecanismos siguientes:

- *fracturador de alimentación*: consta de un tambor giratorio provisto de picos para fragmentar el carbón. Un transportador de cuchara se encarga de la alimentación de carbón y el tambor gira en la misma dirección que el flujo de éste. Se utiliza, por lo general, en el interior de la mina y a veces también en la superficie como parte del circuito de preparación del carbón;
- *fracturador giratorio*: es un circuito de fragmentación que consta de una cubeta externa fija y un tambor interno giratorio con placas perforadas. La velocidad típica de rotación del tambor es de 12–18 rpm. Unas placas elevadoras recogen el carbón extraído de la mina para descargarlo en la sección del tambor. Al caer, el carbón más blando se rompe y pasa a través de las perforaciones mientras que la roca más dura es enviada a la salida. Este equipo realiza dos funciones: reducción del tamaño y limpieza mediante la eliminación del material de roca;
- *trituradora de cilindros*: puede estar formada por un solo tambor giratorio y una placa fija o por dos cilindros que giran a la misma velocidad y en sentidos opuestos. Las superficies de los cilindros están normalmente dentadas o acanaladas. Una forma habitual de trituradora es el equipo de dos fases o trituradora de cuatro cilindros; aquí, el producto que sale de la primera trituradora cae a una segunda que presenta una abertura menor, lográndose así una reducción a gran escala en una sola máquina, como la trituración del material extraído de la mina a 50 mm.

La trituración se utiliza a veces después del proceso de lavado del carbón para fragmentar las piezas de gran tamaño y ajustarlas a los requisitos del mercado. Las trituradoras de cilindros o de martillo son las más utilizadas y están formadas por una serie de martillos que se balancean y giran libremente en un pozo golpeando el carbón y lanzándolo contra una placa fija.

Clasificación por tamaños

El carbón se clasifica por tamaños antes y después del proceso de lavado. Para ello, se utilizan diferentes procedimientos dependiendo del tamaño del carbón; así, el carbón en bruto al entrar en la planta de preparación pasa por cribas de tres o cuatro tamaños antes de llegar al proceso de lavado adecuado. El cribado se realiza, por lo general, con cribas vibratorias rectangulares que disponen de una malla o una placa perforada. Para tamaños inferiores a 6 mm se emplea el cribado húmedo, que resulta más eficiente, y, para tamaños inferiores a 0,5 mm, se coloca una criba curva estática (criba de barras curvadas) antes de la pantalla vibratoria, también con el fin de aumentar la eficiencia.

Después del proceso de limpieza, a veces se clasifica el carbón mediante separación de determinados productos para los mercados industriales y domésticos. La clasificación por tamaños casi no se utiliza para el carbón destinado a la generación de electricidad (carbón térmico) o a la fabricación de acero (carbón metalúrgico).

Almacenamiento

Por lo general, el carbón se almacena en tres puntos de la cadena de preparación y tratamiento:

1. almacenamiento del carbón bruto entre la mina y la planta de preparación;
2. almacenamiento del carbón lavado entre la planta de preparación y el punto de carga en vagonetas o camiones,
3. almacenamiento del carbón lavado en puertos que pueden estar o no controlados por la mina.

Habitualmente, después de la trituración, el almacenamiento del carbón bruto se realiza en montones a la intemperie (cónicos, alargados o circulares), silos (cilíndricos) o carboneras. En esta fase, se suele realizar el mezclado de capas de carbón para suministrar un producto homogéneo a la planta de preparación. El mezclado puede ser una operación tan sencilla como depositar de forma secuencial distintos carbones en un montón cónico o una operación más compleja, en la que intervengan transportadores apiladores y equipos de rueda de cangilones de carga.

El carbón lavado puede almacenarse en montones a la intemperie o en silos. El sistema de almacenamiento del carbón lavado debe permitir una carga rápida de los vagones o camiones. Los silos de carbón lavado se construyen normalmente junto a una vía férrea, de forma que trenes de hasta 100 vagones puedan pasar lentamente por debajo del silo para ir cargando los vagones hasta un peso determinado. Normalmente, el pesaje se realiza en movimiento para mantener un funcionamiento continuo.

Existen diferentes peligros derivados del almacenamiento del carbón. Al ser los montones inestables, debería estar prohibido andar sobre los mismos por el peligro de hundimiento interno y, además, porque los trabajos de recogida pueden iniciarse sin previo aviso. Los atascos o bloqueos en la limpieza en las carboneras o silos deben tratarse con el máximo cuidado, ya que el carbón aparentemente estable puede resbalar de forma imprevista.

Lavado del carbón

El carbón bruto contiene materiales que van desde el carbón “puro” hasta roca con variadas incrustaciones de densidades relativas comprendidas entre 1,30 y 2,5. El carbón se limpia separando el material de baja densidad (producto comercial) del de alta densidad (residuo). La densidad de separación depende de la naturaleza del carbón y de los requisitos de calidad del carbón lavado. Es imposible separar el carbón fino sobre la base de su densidad; para separar el carbón bruto de 0,5 mm, se emplean procesos basados en las distintas propiedades superficiales del carbón y la roca. El método más habitual es el de flotación por espuma.

Separación sobre la base de la densidad

Existen dos métodos básicos. En el primero, se mueve el carbón bruto en el agua de forma que el carbón más ligero presenta una mayor aceleración que la roca más pesada. El segundo método consiste en introducir el carbón bruto en un líquido con una densidad intermedia entre la del carbón y la de la roca, de forma que el carbón flota y la roca se hunde.

Los sistemas basados en el agua son los siguientes:

- *cribas hidráulicas*: el carbón bruto se introduce en un baño pulsante de agua y se desplaza a través de una placa perforada con agua pulsante a través de ella, formándose un lecho estratificado de material con la roca más pesada en el fondo y el carbón más ligero en la parte superior. En el extremo de descarga se retira el residuo del carbón lavado. Los tamaños de

material que se suelen tratar con una criba hidráulica oscilan entre 75 mm y 12 mm. Existen cribas hidráulicas especiales que utilizan un lecho artificial de roca de feldespato;

- *mesas concéntricas*: constan de una placa de goma con separadores sobre un soporte conectado a un mecanismo de cabeza que origina un movimiento rápido alternativo en dirección paralela a los separadores. La pendiente lateral de la mesa es ajustable. A continuación, se produce un flujo cruzado de agua mediante una artesa montada en la parte superior de la placa y, al entrar el carbón justo delante del agua, es distribuido por toda la placa de la mesa por un movimiento diferencial y por la fuerza de la gravedad. Las partículas de carbón bruto se estratifican en capas. El carbón lavado rebasa el lateral inferior de la mesa y el residuo es extraído por el extremo opuesto. El sistema de mesas se utiliza para una gama de tamaños de $5 \times 0,5$ mm;
- *espirales*: las partículas finas de carbón bajan por una espiral en una corriente de agua y la fuerza centrífuga empuja a las partículas más ligeras de carbón hacia el exterior de la corriente y a las partículas más pesadas hacia el interior de la misma. Un mecanismo en el extremo de descarga separa el carbón fino del residuo. Las espirales se utilizan para lavar fracciones de 2 mm y 0,1 mm;
- *ciclones sólo de agua*: el carbón bruto transportado por el agua se envía tangencialmente bajo presión a un ciclón, donde el efecto de remolino y la fuerza centrífuga desplazan el material más pesado hacia el lateral del ciclón, desde donde es transportado al flujo inferior en el ápice (o espiga). Las partículas más ligeras (carbón) permanecen en el centro del vórtice del remolino y son extraídas por la parte superior a través de un tubo (visor del vórtice) al flujo superior. La densidad exacta puede ajustarse variando la presión, la longitud y el diámetro del visor del vórtice y el diámetro del ápice. El ciclón sólo de agua se utiliza con materiales de una gama de tamaños de 0,5 mm y 0,1 mm y habitualmente su funcionamiento se realiza en dos fases para mejorar la eficiencia de separación.

El segundo tipo de separación por densidad utiliza un medio pesado. En un líquido pesado (medio denso), las partículas con una densidad inferior a la del líquido (carbón) flotarán y las que presentan una densidad superior (roca) se hundirán. El medio denso más utilizado a escala industrial es una suspensión finamente molida de magnetita en agua, que presenta muchas ventajas como el que:

- la mezcla sea inofensiva, en comparación con los fluidos inorgánicos y orgánicos;
- la densidad pueda ajustarse rápidamente variando la relación magnetita/agua,
- la magnetita pueda reciclarse fácilmente mediante separación magnética.

Existen dos tipos de separadores de medio denso: el separador tipo baño para carbón grueso de una gama de tamaños de 75 mm y 12 mm, y el separador tipo ciclón para tamaños de carbón de $5 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$.

En los separadores tipo baño, que pueden ser profundos o poco profundos, el material flotante se extrae por el lateral del baño y el material hundido se retira del fondo mediante una cadena de palas de carga o una rueda de paletas.

El separador tipo ciclón suma la fuerza centrífuga a la de la gravedad. La aceleración centrífuga es unas 20 veces superior a la de la gravedad y actúa sobre las partículas en el separador de baño (esta aceleración es unas 200 veces superior a la aceleración de la gravedad en el ápice del ciclón). Estas fuerzas confieren al ciclón su alto rendimiento y su capacidad para tratar trozos de carbón pequeños.

Los productos obtenidos en los separadores de medio denso, es decir, el carbón lavado y los residuos, pasan a través de rejillas de desagüe y de enjuague donde se elimina el medio magnético, que se devuelve a los separadores. La magnetita diluida de las pantallas de enjuague se pasa por unos separadores magnéticos para su recuperación y uso posterior. Los separadores magnéticos constan de cilindros giratorios de acero inoxidable con imanes cerámicos fijos montados sobre el eje del tambor estacionario. El tambor se sumerge en un tanque de acero inoxidable que contiene la suspensión de magnetita diluida. Al girar el tambor, la magnetita se adhiere a la zona próxima a los imanes internos fijos. La magnetita se traslada fuera del baño y del campo magnético y es retirada de la superficie del tambor con una pala de carga y enviada a un tanque de almacenamiento.

En las plantas de preparación de carbón se utilizan calibradores nucleares de densidad y analizadores nucleares de corriente. Por ello, deben observarse las precauciones aplicables a los equipos emisores de radiaciones.

Flotación por espuma

La flotación por espuma es un proceso físico-químico basado en la adherencia selectiva de las burbujas de aire a la superficie de las partículas de carbón y en la no adherencia a las partículas de desecho. Este proceso requiere la utilización de reactivos adecuados para formar una superficie hidrófoba (repelente del agua) en los sólidos que flotan. Las burbujas de aire se generan dentro de un tanque (o celda) y a medida que van subiendo a la superficie, las partículas finas de carbón recubiertas con reactivo se adhieren a la burbuja, permaneciendo los residuos en el fondo de la celda. La espuma de carbón se elimina de la superficie mediante paletas y seguidamente se deshidrata mediante filtración o centrifugado. Los desechos (o relaves) pasan a un depósito de descarga y se espesan antes de bombearlos a un estanque de embalsado de relaves.

Los reactivos más utilizados en la flotación por espuma del carbón son los espumantes y los reactivos de adherencia. Los espumantes se emplean para facilitar la creación de una espuma estable (es decir, que no se deshace). Hay productos químicos que reducen la tensión superficial del agua. El espumante más utilizado para la flotación del carbón es el metilisobutilcarbinol (MIBC). Por otro lado, la función de un reactivo de adherencia es mejorar el contacto entre las partículas de carbón y las burbujas de aire formando una capa fina alrededor de las partículas que tienen que flotar, impermeabilizándolas. Al mismo tiempo, el reactivo de adherencia debe ser selectivo, es decir, no debe recubrir las partículas que no tienen que flotar (residuos). El reactivo de adherencia más utilizado para la flotación del carbón es el fueloil.

Briquetado

La historia de la briquetado del carbón es larga. A finales del decenio de 1800 se comprimió el carbón fino relativamente poco valioso obteniéndose una briqueta. Este producto fue aceptado tanto por el mercado doméstico como por el industrial. Para formar una briqueta estable había que utilizar un aglutinante y se recurrió a los alquitranes minerales y las breas. Últimamente, la industria de briquetado del carbón para el mercado doméstico está en declive, aunque se han producido avances en su tecnología y aplicación.

Los carbones de alto contenido en humedad y baja calidad pueden mejorarse por secado térmico y eliminación de una parte de la humedad inherente o "incrustada". Sin embargo, el producto que se obtiene con este proceso es friable y tiende a reabsorber la humedad y a la combustión espontánea. El briquetado del carbón de baja calidad permite obtener un producto

estable y transportable. Esta técnica se utiliza también en la industria de la antracita, donde los productos de mayor tamaño tienen un precio de venta bastante superior.

Las economías en desarrollo recurren a la briquetación del carbón para proporcionar combustible de uso doméstico a las áreas rurales. El proceso de fabricación de las briquetas comprende, por lo general, una fase de desvolatilización en la que se elimina el exceso de gas o de materia volátil antes de proceder a la briquetación y obtener un combustible doméstico que no produzca humo.

El proceso de briquetación comprende las siguientes fases:

- *secado del carbón*: el contenido de humedad es fundamental, ya que influye en el grado de dureza de la briqueta. Entre los métodos utilizados para el secado se encuentran el secado directo (secadora instantánea con gas caliente) y el secado indirecto (secador de disco con vapor caliente);
- *desvolatilización*: sólo es aplicable a carbones altamente volátiles y de baja calidad. El equipo utilizado es un alambique o una estufa de coque tipo colmena;
- *trituration*: a menudo se tritura el carbón porque con un tamaño de partícula menor se obtiene una briqueta más dura;
- *aglutinantes*: los aglutinantes son necesarios para proporcionar a la briqueta la dureza adecuada para resistir el manejo normal. Los tipos de aglutinantes más comunes son la brea de horno de coque, el asfalto de petróleo, el lignosulfonato amónico y el almidón, y la cantidad que suele añadirse es la equivalente al 5-15 % del peso. El carbón fino y el aglutinante se mezclan en un mezclador de arcillas o de paletas a alta temperatura;
- *fabricación de briquetas*: la mezcla carbón-aglutinante se introduce en una prensa de doble cilindro con superficie dentada. Puede variar la forma de las briquetas en función del tipo de indentación de los cilindros, aunque la forma más habitual es de tipo almohada. La presión aumenta la densidad aparente de la mezcla carbón-aglutinante en 1,5-3 veces;
- *recubrimiento y endurecimiento*: cuando se utilizan aglutinantes como el lignosulfonato amónico o petróleo asfáltico es necesario realizar un tratamiento térmico a 300 °C para endurecer las briquetas. La estufa para el tratamiento térmico es un aparato cerrado y calentado mediante gases calientes;
- *enfriamiento y extinción con agua*: la estufa de enfriamiento es un aparato cerrado con recirculación de aire para reducir la temperatura de la briqueta a las condiciones ambientales. Los gases desprendidos se recogen, depuran y descargan a la atmósfera. A veces se utiliza la extinción con agua para enfriar las briquetas.

La briquetación del carbón bituminoso blando con un alto contenido de humedad (60-70 %) es un proceso algo diferente del descrito. La calidad de este tipo de carbón puede mejorarse mediante la briquetación, que comprende operaciones de trituración, cribado, secado del carbón hasta reducir la humedad a aproximadamente un 15 % y compresión sin aglutinantes para formar un producto compacto. Con este método se tratan actualmente grandes cantidades de carbón en Alemania, India, Polonia y Australia. El secador utilizado es un sistema de tubo giratorio calentado por vapor. Después de la compresión por extrusión, el carbón compactado se corta y enfría antes de ser trasladado por cintas transportadoras a vagones, camiones o almacenes.

Las plantas de briquetación manejan grandes cantidades de material altamente combustible con mezclas potencialmente explosivas de polvo de carbón y aire. El control, la aspiración y el manejo del polvo así como un buen mantenimiento son factores fundamentales para un funcionamiento seguro.

Eliminación de residuos y relaves

La eliminación de residuos es un aspecto fundamental en las plantas modernas de preparación de carbón. Tanto los residuos gruesos como los relaves finos en forma de fangos de lavado deben ser transportados y eliminados de una forma ecológicamente responsable.

Residuos gruesos

Los residuos gruesos se transportan en camiones, cintas transportadoras o aviones hasta el vertedero de productos sólidos y con ellos se construyen normalmente los muros del embalse de relaves. Los residuos también pueden devolverse a la mina abierta.

Actualmente, se están utilizando formas innovadoras y rentables para transportar los residuos gruesos, como los procesos de trituración o el transporte mediante bombeo en forma de fangos de lavado hasta un embalse de vertidos o el sistema de transporte neumático hasta un almacén subterráneo.

El lugar de vertido debe disponer de una superficie de exposición mínima y, al mismo tiempo, de una buena estabilidad. Una estructura abierta por todos los laterales produce un mayor drenaje superficial, tiene más tendencia a formar fango en los cursos de agua próximos y presenta un mayor peligro de combustión espontánea. Para minimizar estos riesgos se necesita una mayor cantidad de material de recubrimiento, así como un mayor compactado y sellado. La opción ideal de vertido de residuos es la operación de llenado de valles.

Los embalses de residuos de las plantas de preparación pueden fallar por alguna de las razones siguientes:

- cimientos débiles;
- pendiente excesiva de la ladera por exceso de altura;
- control deficiente del agua y filtración del material fino a través del vertedero,
- control inadecuado del agua durante lluvias torrenciales.

Para reducir considerablemente los riesgos ambientales asociados al vertido de residuos de carbón pueden utilizarse las técnicas siguientes:

- drenaje desde el interior del montón de residuos;
- desviación del drenaje superficial;
- compactación de los residuos para minimizar la combustión espontánea,
- estabilización del montón de residuos.

Relaves

Los relaves (residuos sólidos finos en agua) suelen ser transportados a través de conducciones hasta una zona de embalse. Ahora bien, en algunos casos, esta operación no resulta aceptable desde el punto de vista ecológico y hay que realizar un tratamiento alternativo, como deshidratar los relaves en una prensa hidráulica o en una centrifugadora de alta velocidad para enviar el producto deshidratado en cintas transportadoras o camiones a la zona de vertidos gruesos.

En los embalses de relaves éstos se sedimentan en el fondo y el agua aclarada resultante se devuelve mediante bombeo a la planta para su posterior reutilización. La altura del embalse se mantiene reteniendo el agua de las tormentas y extrayéndola posteriormente por bombeo o con pequeños sistemas de trasvase. Periódicamente, puede ser necesario extraer el sedimento de los embalses más pequeños para ampliar su vida útil. El muro de contención del embalse se suele construir con residuos gruesos. Un diseño deficiente del muro o la liquefacción de los relaves por un drenaje deficiente pueden producir situaciones de riesgo. Para obtener un efecto de cementación se han utilizado agentes estabilizantes, como derivados químicos del calcio.

Los embalses de relaves suelen ir cambiando a lo largo de la vida de la mina. Por esta razón, hay que supervisar de forma cuidadosa y continua la estabilidad de la estructura del embalse.

● CONTROL DEL TERRENO EN LAS MINAS SUBTERRANEAS

Luc Beauchamp

El principal objetivo del control del terreno es mantener la seguridad en las excavaciones de rocas y suelo (en las minas subterráneas y en las explotaciones a cielo abierto se utilizan los términos *control de estratos* y *control de laderas*, respectivamente). El control del terreno, que también se aplica mucho en proyectos de ingeniería civil como túneles, plantas hidroeléctricas y repositorios de residuos nucleares, se define como la aplicación práctica de la mecánica de rocas a la minería cotidiana. El US National Committee on Rock Mechanics ha propuesto la definición siguiente: “La mecánica de rocas es la ciencia teórica y práctica del comportamiento mecánico de las rocas y los estratos rocosos y es la rama de la mecánica que estudia la respuesta de rocas y lechos rocosos a los campos de fuerza de su entorno físico”.

Los estratos rocosos muestran un comportamiento extremadamente complejo, por lo que desde el decenio de 1950 la mecánica de rocas y el control del terreno han sido objeto de numerosas investigaciones teóricas y prácticas en todo el mundo. En cierto modo, el control del terreno es más un arte que una ciencia. Requiere la comprensión de la geología estructural, de las propiedades de las rocas, de las aguas subterráneas y de los regímenes de tensión del terreno, así como de la forma en que interaccionan estos factores. Entre las herramientas disponibles a tal fin se encuentran los métodos de investigación del terreno y de prueba de rocas, las medidas para minimizar el daño causado al estrato rocoso por las voladuras, la aplicación de técnicas de diseño, y la supervisión y soporte del terreno. Últimamente se han realizado importantes desarrollos relacionados con la mecánica de rocas y el control del terreno, como técnicas de diseño empírico y análisis por ordenador del trazado de minas, introducción y uso generalizado de instrumentos de supervisión del terreno y desarrollo de herramientas y técnicas especializadas de soporte al terreno. Muchas explotaciones mineras disponen de departamentos de control del terreno formados por ingenieros y técnicos especialistas.

Las minas subterráneas son más difíciles de abrir y mantener que las explotaciones a cielo abierto, por lo que es necesario dedicarles más recursos y esfuerzos de diseño para el control del terreno que a las segundas. En los métodos tradicionales de minería subterránea, como el de franjas-almacenes y el de corte y relleno, los trabajadores están directamente expuestos a un terreno potencialmente inestable en la zona de explotación. Cuando se utilizan métodos de minería no selectivos, como el barrenado, los trabajadores no entran a la zona de explotación. En las últimas décadas se aprecia una tendencia a sustituir los métodos selectivos por los no selectivos.

Tipos de fallos del terreno

Los principales factores de inestabilidad de las minas son su estructura y la tensión de la roca.

Un estrato rocoso está formado por roca intacta y por ciertas estructuras rocosas o discontinuidades estructurales. Entre los principales tipos de estructuras rocosas se encuentran los planos de estratificación (planos divisorios que separan los distintos estratos), los pliegues (de los estratos de roca), las fallas (fracturas por desplazamiento), las contravetas (intrusiones horizontales de

roca ígnea) y las fisuraciones (fracturas de origen geológico a lo largo de las cuales no se ha producido un desplazamiento visible). Las propiedades de las discontinuidades estructurales que se enumeran a continuación afectan al comportamiento de los lechos rocosos: orientación, espaciado, persistencia, dureza, apertura y presencia de material de relleno. En una explotación minera, la recogida de la información estructural por parte de los ingenieros y geólogos es un elemento importante del programa de control del terreno. Actualmente, complejos programas informáticos permiten analizar los datos estructurales y la forma y estabilidad de las cuñas en minas a cielo abierto o subterráneas.

La tensión de la roca también puede ser una causa de inestabilidad en las minas, por lo que el conocimiento de la relación tensión-deformación de los lechos rocosos resulta fundamental para realizar un diseño de ingeniería adecuado. Las pruebas de laboratorio sobre muestras cilíndricas de roca procedentes de un núcleo de perforación pueden proporcionar información útil sobre la dureza y la deformabilidad de la roca intacta; cada tipo de roca se comporta de un modo diferente, desde la plasticidad de la sal hasta la elasticidad y la fragilidad de muchas rocas duras. La existencia de fisuras influirá de forma considerable en la dureza y la deformabilidad de todo el estrato rocoso.

Existen algunos tipos comunes de fallos de la ladera rocosa tanto en las minas a cielo abierto como en las canteras. El fallo de un bloque deslizante se produce cuando hay un desplazamiento a lo largo de una o más estructuras rocosas (fallos de corte de plano, paso escalonado, cuña, cuña escalonada o placa); el fallo de corte rotacional puede producirse en un suelo o en una ladera frágil del estrato rocoso; otros fallos pueden ser el vuelco de bloques formados por estructuras muy inclinadas y desmoronables (p. ej., desalojamiento de bloques por heladas o lluvias). Los principales fallos de ladera pueden tener consecuencias catastróficas, aunque la inestabilidad de la ladera no significa necesariamente un fallo de ladera desde un punto de vista operativo. Para el funcionamiento, la estabilidad de los antepechos suele ser un motivo de preocupación más inmediato, dado que los accidentes pueden producirse de forma súbita con pérdidas de equipos y de vidas humanas.

En las minas subterráneas pueden producirse fenómenos de inestabilidad resultantes de movimientos o hundimientos de bloques a causa de una inestabilidad estructural, de un fallo de la roca cerca de la entrada de la mina por condiciones de alta tensión de la roca o de una combinación de fallos de la roca causados por tensiones, inestabilidad estructural o inestabilidad debida a estalladuras por presión. La estructura de la roca puede influir en la elección del método de minería subterránea y en el diseño de las instalaciones mineras, ya que determina el tamaño de los vanos de excavación estables y los requisitos de capacidad y asentamiento. La roca profunda está sometida a las tensiones resultantes del peso de los estratos superiores y a tensiones de origen tectónico, siendo las horizontales a menudo superiores a las verticales. Hay instrumentos para determinar el nivel de tensión del terreno antes de iniciar la explotación. Cuando se excava la boca de una mina, el campo de tensión alrededor de ésta cambia, superando posiblemente la fuerza del estrato rocoso y dando lugar a una inestabilidad.

Existen varios tipos de fallos en las minas subterráneas de roca dura. Cuando los niveles de tensión son bajos, los fallos son controlados en gran medida por la estructura, apareciendo cuñas o bloques que caen del techo o resbalan de las paredes de las aberturas. Estas cuñas o bloques están formados por la intersección de discontinuidades estructurales. Salvo que se sujeten las cuñas o los bloques sueltos, el fallo puede proseguirse hasta el arqueado natural de la abertura. En depósitos estratificados, la separación y el fallo del lecho puede producirse a lo largo de los

planos de estratificación. Cuando los niveles de tensión son altos, los fallos incluyen desde fisuras debidas a la fragilidad y desprendimientos de lajas en estratos rocosos masivos de escasa fisuración hasta un tipo de fallo más dúctil en los estratos rocosos muy fisurados.

Un estallido rocoso debido a la presión se define como un daño que se produce en una excavación de forma imprevista o violenta y que está relacionado con un movimiento sísmico. Se han identificado diferentes tipos de estallido por presión, como la expansión o el pandeo de la roca a causa de una fractura alrededor de la boca de la mina, desprendimientos de rocas provocados por un movimiento sísmico y lanzamiento de rocas a causa de una transferencia de energía desde una fuente sísmica remota. En algunas minas de carbón, sal u otros minerales se producen explosiones de rocas y de gases con consecuencias catastróficas debido a las altas tensiones de las rocas y los grandes volúmenes de metano o de dióxido de carbono comprimidos. En las canteras y las minas a cielo abierto también se han producido pandeos y proyecciones repentinas de suelos de roca. En varios países se han estudiado ampliamente las causas y la posible atenuación de los estallidos debidos a la presión. Entre las técnicas actuales para minimizarlas se encuentran el cambio de forma, orientación y secuencia de la extracción, el empleo de una técnica conocida como voladura a baja presión, el relleno de las minas y el uso de sistemas de soporte especializados. Complejos sistemas de supervisión sísmica a escala local o global de la mina pueden ayudar a identificar y analizar los mecanismos de origen, aunque la predicción de los estallidos debidos a la presión todavía no es fiable.

En la provincia canadiense de Ontario, casi un tercio de los accidentes mortales en minas subterráneas, en el marco de una industria minera altamente mecanizada, está causado por desprendimientos de rocas y estallidos debidos a la presión y su frecuencia durante el período comprendido entre 1986 y 1995 fue de 0,014 en 200.000 horas de trabajo subterráneo. En las industrias mineras subterráneas menos mecanizadas o donde el soporte del terreno no es práctica habitual, esta frecuencia puede ser mucho mayor. El registro de seguridad del control del terreno en las minas a cielo abierto y en las canteras es, por lo general, más completo que en las minas subterráneas.

Métodos de diseño

El diseño de las excavaciones subterráneas exige la toma de decisiones de ingeniería en materias como localización, tamaño y forma de las excavaciones y pilares rocosos, secuencia de explotación y aplicación de sistemas de soporte. En las minas a cielo abierto, además de elegir un ángulo de ladera óptimo para cada sección de la mina, hay que tener en cuenta otros aspectos de diseño y soporte de las laderas. El diseño de una mina es un proceso dinámico que se va actualizando y refinando a medida que se dispone de más información a partir de la observación y la supervisión de los trabajos. Por lo general, los métodos de diseño utilizados son analíticos, de tipo empírico y de observación.

Los *métodos empíricos* suelen basarse en un sistema de clasificación del estrato rocoso (existen numerosos esquemas de este tipo, como el Sistema de estrato rocoso y el Índice de calidad de túneles en roca) junto con recomendaciones de diseño basadas en prácticas aceptadas. En la práctica, se han aplicado con éxito varias técnicas de diseño empírico, como el Método gráfico de estabilidad para el diseño de tajos abiertos.

Los *métodos de observación* se basan en la supervisión de los movimientos del terreno durante la excavación para medir la inestabilidad y en el análisis de la interacción terreno-soporte. Como ejemplos de este tipo de métodos cabe citar el nuevo método austríaco de túneles y el método de convergencia-confinamiento.

Los *métodos analíticos* se basan en el análisis de las tensiones y deformaciones en la proximidad de las bocas. Las primeras técnicas de análisis de tensiones utilizaban soluciones matemáticas cerradas o modelos fotoelásticos, pero su aplicación práctica era limitada debido a la compleja forma tridimensional de la mayoría de las excavaciones subterráneas. Últimamente se han desarrollado varios métodos numéricos basados en ordenador que permiten obtener soluciones aproximadas para problemas de tensiones, fallas y fallos en la roca alrededor de la bocamina.

Entre los últimos avances se encuentra la utilización de modelos tridimensionales, los modelos con discontinuidades estructurales e interacciones roca-soporte y la disponibilidad de interfaces gráficas orientadas al usuario. A pesar de sus limitaciones, estos modelos numéricos proporcionan una visión realista del complejo comportamiento de las rocas.

Las tres metodologías descritas deben considerarse más como un enfoque unificado de diseño de las excavaciones subterráneas que como técnicas independientes. El ingeniero de diseño debe saber utilizar una serie de herramientas y estar dispuesto a reevaluar la estrategia de diseño siempre que sea necesario, tomando como base la cantidad y la calidad de la información disponible.

Controles de perforación y de voladura

Un problema especial de la voladura de rocas es su efecto sobre la roca de las proximidades, ya que puede producir una intensa fragmentación y disrupción de la integridad de la roca de la zona circundante si la voladura o los sistemas de perforación son incorrectos. El daño sería mayor si la energía de la voladura se transmitiese a una zona más remota, lo que desestabilizaría las estructuras de la mina.

Los resultados de una voladura dependen de factores como el tipo de roca, el régimen de tensión, la geología estructural y la presencia de agua. Entre las medidas adecuadas para minimizar el daño producido por una voladura se encuentran: una elección adecuada del explosivo, el uso de técnicas de voladura perimétrica, como la voladura de predivisión (barrenos paralelos y muy juntos que definen el perímetro de la excavación), las cargas de desacople (el diámetro del explosivo es menor que el del barrenos de voladura), tiempo de retardo y taladros de tope. La forma de los taladros influye en el éxito de una voladura de control de pared, por lo que hay que controlar cuidadosamente su disposición y alineamiento.

En las voladuras se realiza a menudo el seguimiento de las vibraciones para optimizar la disposición de los barrenos y no dañar el estrato rocoso. Hay criterios empíricos para evitar los daños producidos por voladuras. El equipo para el seguimiento de voladuras consta de transductores montados en la superficie o en el barrenos, cables conectados a un sistema de amplificación y un grabador digital. El desarrollo de modelos informáticos ha permitido mejorar el diseño de las voladuras y predecir su rendimiento, incluida la fragmentación, el perfil de desescombro y la penetración de grietas causadas por los barrenos de voladura. Entre los datos de entrada de estos modelos figuran la forma de la excavación y de los barrenos perforados y cargados, las características de detonación de los explosivos y las propiedades dinámicas de la roca.

Saneamiento del techo y de las paredes de la excavación

El saneamiento es la eliminación de las placas sueltas de roca en techos y paredes de la excavación. Esta operación puede realizarse manualmente con una barra de acero o aluminio, o con una máquina de saneamiento. En el saneamiento manual, el minero comprueba la solidez de la roca golpeando el techo; un

sonido hueco indica, por lo general, que la roca está suelta y debe eliminarse con la barra. El minero debe seguir unas normas estrictas para evitar accidentes durante la operación de saneamiento (p. ej., avanzar desde terrenos sólidos a otros desconocidos, mantener un buen apoyo en los pies, asegurarse una zona libre para retroceder y hacer que la roca golpeada caiga en el lugar adecuado). El saneamiento manual requiere un esfuerzo físico considerable y puede ser una actividad de alto riesgo. Así, por ejemplo, en Ontario (Canadá) un tercio de los accidentes causados por caídas de roca se producen durante operaciones de saneamiento.

El uso de plataformas sobre brazos extensibles para que mineros montados sobre ellas puedan sanear manualmente paredes altas entraña nuevos riesgos, como el que la plataforma de saneamiento sea golpeada y volcada por las rocas al desprenderse. En la mayoría de las explotaciones mineras de grandes dimensiones se suelen utilizar equipos de saneamiento mecánico compuestos por un potente fracturador hidráulico, una pala de carga o un martillo de neumático montado sobre un brazo pivoteante y, a su vez, sujeto a un chasis móvil.

SopORTE del terreno

El principal objetivo del soporte del terreno es contribuir a la estabilidad del estrato rocoso. Para reforzar las rocas se instalan pernos de consolidación en su interior, mientras que para el soporte exterior se utilizan piezas de acero o madera. Las técnicas de soporte del terreno no han sido muy utilizadas en la minería de superficie y en la cantería, en parte debido al desconocimiento de la forma real de la mina y en parte por problemas de corrosión. Para elegir un sistema en concreto hay que tener en cuenta factores como las condiciones del terreno, la vida útil planificada de la excavación, la facilidad de instalación, la disponibilidad y el coste. Actualmente, existen en el mercado una gran variedad de sistemas de pernos de consolidación, algunos de los cuales se describen a continuación.

Los pernos de anclaje mecánico constan de una cubierta de expansión (hay varios diseños según el tipo de roca), pernos de acero (roscado o de cabeza forjada) y chapa frontal. La cubierta de expansión suele estar formada por hojas dentadas de hierro fundido maleable con una cuña cónica roscada en un extremo del perno. Cuando el perno se gira dentro del barreno, el cono se introduce a presión dentro de las hojas y las comprime contra las paredes del barreno. La cubierta de expansión aumenta su agarre a la roca a medida que aumenta la tensión en el perno. Hay pernos de diferentes longitudes con sus correspondientes accesorios. Los pernos de consolidación de rocas anclados mecánicamente son relativamente económicos y, por tanto, se utilizan mucho en las minas subterráneas para soportes a corto plazo.

La clavija enlechada consta de una barra de refuerzo nervada que se inserta en la perforación y se sujeta a la roca en toda su longitud, lo que refuerza el estrato rocoso de forma prolongada. Hay diferentes tipos de lechadas de cemento y de resina de poliéster. La lechada puede colocarse en la perforación mediante bombeo o utilizando cartuchos, una operación que resulta rápida y sencilla. Las clavijas son de acero y de fibra de vidrio de diferentes diámetros y los pernos pueden ser tensionados o no tensionados.

El estabilizador por fricción consta normalmente de un tubo de acero abierto en sentido longitudinal que, cuando se introduce en una perforación de tamaño algo menor, presiona y produce una fricción entre el tubo y la roca. Para que este perno sea efectivo debe medirse el diámetro de la perforación con una tolerancia muy reducida.

Los pernos de consolidación de roca Swellex van provistos de un tubo de acero de envoltura circular que se introduce en una perforación y se expande mediante presión hidráulica utilizando

una bomba portátil. Hay diferentes tipos y longitudes de tubos Swellex.

El perno de cable enlechado suele instalarse para controlar los hundimientos y estabilizar los techos y paredes en los tajos subterráneos. Se utiliza una lechada de cemento Portland, aunque las formas del cable y los métodos de instalación pueden variar. También se emplean en las minas barras de refuerzo y anclajes de roca de gran capacidad junto con otros tipos de pernos, como los tubulares enlechables de anclaje mecánico.

Los flejes o mallas de acero fabricados con alambre tejido o soldado se instalan a menudo en techos o paredes de la boca de la mina para soportar la roca entre los pernos.

Las explotaciones mineras deben disponer de un programa de control de calidad con variadas pruebas de campo que garanticen que el aguante del terreno es efectivo. Un aguante deficiente en las instalaciones puede deberse a un diseño inadecuado (incorrecta elección del tipo de soporte del terreno, de la longitud o la disposición de las condiciones del terreno), a materiales de aguante del terreno de calidad inferior a la estándar (por envío incorrecto del fabricante, por daños durante su manejo o por las condiciones de almacenamiento en la mina), a deficiencias de instalación (equipo defectuoso, planificación incorrecta de la instalación, preparación inadecuada de la superficie rocosa, formación deficiente del personal o incumplimiento de los procedimientos especificados), a efectos resultantes de los trabajos de minería no previstos en la fase de diseño (variaciones de tensión, fracturas o fisuras causadas por tensiones o voladuras, aflojamiento de las grietas o estallido debido a la presión) o a cambios en el diseño de la mina (cambios en la forma de excavación o prolongación de la vida útil prevista de la mina).

El comportamiento de los lechos rocosos reforzados o soportados todavía no está bien estudiado. Aunque se han establecido algunos principios básicos, directrices empíricas de diseño basadas en sistemas de clasificación de lechos rocosos y programas informáticos, el éxito de un determinado diseño depende en gran medida del conocimiento y la experiencia del técnico que controla el terreno. Un estrato rocoso de buena calidad con pocas discontinuidades estructurales y aberturas pequeñas, y con una vida de servicio limitada, puede no requerir prácticamente ningún soporte, aunque deben instalarse pernos para consolidación de rocas en determinados puntos para estabilizar los bloques que se identifiquen como potencialmente inestables. En muchas minas es obligatorio instalar en todas las excavaciones anclajes patrón o pernos de consolidación de rocas dispuestos de forma regular para estabilizar techos o paredes. En cualquier caso, los mineros y los supervisores deben tener suficiente experiencia para reconocer las zonas en que pueda ser necesario instalar un soporte adicional.

La forma más antigua y sencilla de soporte es el entibado mediante vigas de madera, que todavía se instalan cuando se trabaja en terreno inestable. Los arcos y puntales de acero son elementos con una gran capacidad de aguante de carga y se utilizan para entibar galerías y vías. En las minas subterráneas, se utiliza como material de entibado adicional el relleno, que puede ser de roca residual, arena o relaves junto con un agente de cementación. El relleno cubre los vacíos creados en las excavaciones subterráneas y sirve, entre muchas otras cosas, para evitar fallos a gran escala, para encerrar y por tanto proporcionar fuerza adicional a los pilares de roca, para permitir la transferencia de tensiones de la roca, para reducir el asentamiento superficial, para obtener una recuperación máxima del mineral y para proporcionar una plataforma de trabajo en algunos métodos de minería.

Una innovación relativamente reciente en muchas minas ha sido el uso del *hormigón vaporizado* en un frente de roca que puede

aplicarse directamente a ésta sin necesidad de ninguna otra forma de soporte o que puede vaporizarse a través de mallas y pernos de consolidación de rocas formando parte de un sistema de soporte integrado. A este tipo de hormigón se le pueden añadir fibras de acero junto con otras mezclas para conferirle propiedades específicas. Los dos procesos actuales de utilización del hormigón vaporizado son con mezcla seca y con mezcla húmeda. El hormigón vaporizado se ha aplicado para distintos fines en las minas, como, por ejemplo, para estabilizar frentes de roca que de otra forma se desmoronarían por su estrecha fisuración. En las minas a cielo abierto también se ha utilizado el hormigón vaporizado con éxito para estabilizar fallos de desmoronamiento progresivo. Otra de las últimas novedades es el uso de recubrimientos de poliuretano vaporizado en las minas subterráneas.

Para que los sistemas de entibado reaccionen de forma efectiva en caso de estallido debido a la presión, es necesario que tengan determinadas propiedades, como capacidad de deformación y de absorción de energía. Actualmente, se está estudiando en diferentes países el tema de la elección de soportes resistentes a las estallidos debidos a la presión y existen ya nuevas recomendaciones de diseño al respecto.

En las aberturas subterráneas pequeñas la instalación del entibado manual del terreno suele realizarse con una perforadora. En excavaciones de mayor tamaño se utilizan equipos semimecanizados (equipos de perforación mecanizados y equipo manual para la instalación de los pernos de consolidación), así como equipos totalmente mecanizados (perforación mecanizada e instalación de pernos de consolidación controlada desde un panel de operación situado bajo un techo soportado con pernos). La instalación manual del soporte del terreno es una actividad de alto riesgo. Así, en Ontario (Canadá), un tercio de los accidentes causados por caída de rocas durante el periodo de 1986-1995 y el 8 % de los accidentes en minas subterráneas se produjeron durante la instalación de pernos de consolidación.

Otros posibles peligros son las salpicaduras de lechada de cemento o de resina en los ojos, las reacciones alérgicas producidas por derrames de productos químicos y la fatiga. Cuando se utilizan equipos mecanizados resulta más segura y eficiente la instalación de grandes cantidades de pernos de consolidación.

Supervisión de las condiciones del terreno

La supervisión de las condiciones del terreno en la mina puede realizarse por diversas razones, entre las que se encuentran: obtener los datos necesarios (deformabilidad del estrato rocoso, tensiones de la roca, etc.) para diseñar la mina; comprobar los datos y los supuestos del diseño mediante el calibrado de modelos informáticos y el ajuste de los métodos de minería para mejorar la estabilidad; estudiar la efectividad del entibado del terreno existente y, tal vez, decidir la instalación de entibados adicionales; o detectar a tiempo fallos potenciales del terreno.

La supervisión de las condiciones del terreno puede hacerse visualmente o con la ayuda de instrumentos especializados. La inspección de la superficie y del subsuelo debe ser cuidadosa, utilizando en caso necesario focos de luz de alta intensidad; tanto los mineros como los supervisores, los técnicos y los geólogos tienen un importante papel que desempeñar en la realización periódica de las inspecciones. Entre las señales visuales o audibles de cambio en las condiciones del terreno se encuentran, entre otras, el estado del núcleo del trépano de diamantes, contactos entre tipos de rocas, terreno con sonido hueco, presencia de características estructurales, carga obvia de entibado del terreno, pandeo del suelo, nuevas fisuras en paredes o techos, aguas subterráneas y fallos de los pilares. Los mineros a menudo utilizan instrumentos sencillos (p. ej., cuñas de madera en una grieta) para detectar movimientos del techo.

La planificación y la implantación de un sistema de supervisión incluye la definición del objetivo del programa y de las variables a supervisar; la determinación de la precisión necesaria en las medidas, la selección e instalación del equipo, así como la definición de la frecuencia de observación y la forma de presentación de los datos. El equipo de supervisión debe ser instalado por personal experimentado. Son aspectos importantes del mismo un fácil manejo de los instrumentos, la redundancia y la fiabilidad. El diseñador debe definir las posibles amenazas para la seguridad o la estabilidad e incluir la elaboración de planes de emergencia en caso de que se superen determinados niveles de señal.

Un sistema de supervisión consta de un sensor que registra los cambios de la variable supervisada, un sistema de transmisión constituido por indicadores, cables eléctricos y líneas hidráulicas o radiotelemétricas para enviar la señal del sensor al punto de lectura, una unidad de lectura (p. ej., dial, calibrador de presión, multímetro o pantalla digital), así como una unidad de registro/procesamiento (p. ej., grabador de cinta, registrador de datos o microordenador).

El modo de funcionamiento de un instrumento puede ser:

- *mecánico*: suelen ser los instrumentos más sencillos, baratos y fiables en cuanto a detección, transmisión y lectura. Los detectores mecánicos utilizan una varilla o cinta de acero que por un extremo está fijada a la roca y por el otro está en contacto con un indicador graduado o un sistema eléctrico. El principal inconveniente de los sistemas mecánicos es que no permiten una lectura remota o una grabación continua;
- *óptico*: se utilizan en métodos de supervisión convencionales, precisos y fotogramétricos para establecer los perfiles de excavación, medir movimientos de límites de excavación y supervisar el asentamiento superficial;
- *hidráulico y neumático*: los transductores de diafragma se emplean para medir las presiones de agua, las cargas de soporte, etc. La cantidad medida es una presión de fluido que actúa en un extremo de un diafragma flexible de metal, goma o plástico;
- *eléctrico*: es el modo de funcionamiento más común en los instrumentos de minería, aunque los sistemas mecánicos todavía se utilizan mucho en la supervisión de fallas. Los sistemas eléctricos están provistos de un indicador de variación de la resistencia eléctrica, un cable vibratorio o una autoinducción.

Entre las variables más supervisadas en las minas se encuentran el movimiento (mediante métodos de supervisión, mecanismos de superficie como indicadores de grietas y extensómetros de cinta, mecanismos de voladura como extensómetros de varilla o inclinómetros), las tensiones de la roca (tensión absoluta o cambio de tensión en dispositivos de barreno), la presión, la carga y la deformación de los sistemas de soporte del terreno (p. ej., celdas de carga), así como los seísmos y las vibraciones por voladura.

VENTILACION Y REFRIGERACION EN LAS MINAS SUBTERRANEAS

M.J. Howes

El principal objetivo de la ventilación en las minas es suministrar una cantidad suficiente de aire a todos los puestos de trabajo y galerías de una mina subterránea para diluir hasta un nivel aceptable los productos contaminantes que no pueden ser controlados por otros medios. Cuando la profundidad y la temperatura de la roca es tal que la temperatura del aire resulta excesiva, se pueden

utilizar sistemas mecánicos de refrigeración para mejorar la ventilación.

El ambiente dentro de una mina

La composición de la capa gaseosa que envuelve la Tierra varía en menos de un 0,01 % de un lugar a otro. El aire "seco" suele estar compuesto por un 78,09 % de nitrógeno, un 20,95 % de oxígeno, un 0,93 % de argón y un 0,03 % de dióxido de carbono. El vapor de agua también está presente en la atmósfera en cantidad variable dependiendo de la temperatura y la presión del aire y de la existencia de superficies de agua. A medida que el aire de ventilación va pasando por la mina, la concentración del vapor de agua puede ir cambiando de forma importante. Esta variación es estudiada por una ciencia denominada psicometría. Para definir el estado de una mezcla de vapor de agua y aire seco en un punto determinado hay que conocer tres propiedades independientes: la presión barométrica, la temperatura de termómetro seco y la temperatura de termómetro húmedo.

Requisitos de ventilación

Las sustancias contaminantes que deben controlarse mediante la ventilación de dilución son básicamente los gases y el polvo, aunque las radiaciones ionizantes relacionadas con el radón natural pueden ocasionar problemas, especialmente en las minas de uranio y cuando las concentraciones de uranio de la roca principal o de las adyacentes son elevadas. La cantidad de aire necesaria para una ventilación de dilución depende de la fuerza de la fuente de contaminación y de la efectividad de otras medidas de control, como el agua para la supresión del polvo o los sistemas de drenaje de metano en las minas de carbón. El flujo mínimo de aire de dilución viene determinado por el contaminante que requiera mayor dilución, una vez estudiados los posibles efectos resultantes de mezclas y sinergias que hacen que un contaminante pueda potenciar el efecto de otro. En cualquier caso, la velocidad mínima del aire debe ser de 0,25 m/s, aumentando a medida que sube la temperatura del aire.

Ventilación de equipos con motor diesel

En las minas mecanizadas que utilizan equipos móviles con motor diesel y no se supervisa el gas de forma continua, se utiliza la dilución del gas de escape para determinar los requisitos mínimos de ventilación. La cantidad de aire normalmente necesaria oscila entre 0,03 y 0,06 m³/s por kW de potencia media en el punto de funcionamiento, dependiendo del tipo de motor y de si se utiliza acondicionamiento de gas de escape. Las continuas innovaciones en combustibles y motores están consiguiendo reducir las emisiones, al tiempo que los convertidores catalíticos, las depuradoras húmedas y los filtros cerámicos también ayudan a reducir las concentraciones de monóxido de carbono/aldehídos, óxidos de nitrógeno y partículas diesel, respectivamente. De este modo, se podrían cumplir límites de contaminantes cada vez más rigurosos sin necesidad de aumentar en gran medida el caudal de dilución de los gases de escape. El límite mínimo posible de dilución (0,02 m³/s por kW) viene determinado por las emisiones de dióxido de carbono que son proporcionales a la potencia del motor e independientes del acondicionamiento del gas de escape.

Los motores diesel convierten aproximadamente un tercio de la energía disponible en el combustible en potencia útil, que en su mayor parte se utiliza para contrarrestar la fricción, dando lugar a una emisión de calor que es aproximadamente tres veces la potencia. Incluso cuando se transporta roca en un camión por una rampa, el trabajo útil realizado sólo es del 10 % de la energía disponible en el combustible. Los equipos móviles de mayor tamaño necesarios para un funcionamiento seguro en

Tabla 74.1 • Factores nominales de cantidad de aire.

Método de explotación	α (factor de cantidad de aire m ³ /s/Mtpa)
Por socavación y derrumbe	50
Por cámaras y pilares (potasa)	75
Por socavación en subniveles	120
Por escalones a cielo abierto	
>0,5 Mtpa	160
<0,5 Mtpa	240
Por excavación y relleno mecanizados	320
Por explotaciónno mecanizada	400

grandes excavaciones utilizan motores diesel de mayor potencia. Si se toman los valores normales del vehículo y un caudal típico de dilución de gases diesel de 0,04 m³/s por kW, la velocidad de aire mínima necesaria en lugares donde operan motores diesel es de aproximadamente 0,5 m/s.

Ventilación de diferentes métodos de minería

Aunque no es conveniente establecer unos requisitos generales de cantidad de aire cuando se dispone o se puede disponer de información detallada sobre la planificación de la mina y su ventilación, al menos sirven para apoyar los criterios empleados en el diseño. Por lo general, en las minas con problemas causados por calor o por la presencia de radón se explican y justifican desviaciones de los valores normales. La ecuación general es:

$$\text{cantidad de aire en la mina} = \alpha t + \beta$$

siendo t la velocidad de producción anual en millones de toneladas por año (Mtpa), α es un factor variable de cantidad de aire que está directamente relacionado con la velocidad de producción y β es la constante del aire necesario para ventilar la infraestructura de la mina así como el sistema de tratamiento del mineral. En la Tabla 74.1 se muestran valores típicos de α .

La constante del aire β depende principalmente del sistema de tratamiento del mineral y, hasta cierto punto, de la velocidad de producción global de la mina. En minas en que la roca se acarrea por rampas con camiones de motor diesel y no existe fase de trituración de la roca arrancada, un valor adecuado de β es 50 m³/s. Este valor suele aumentar a 100 m³/s cuando se utilizan trituradoras subterráneas y extracción mediante eskip con zonas de mantenimiento subterráneo. Si se amplía el sistema de manejo de mineral (p. ej., con cintas transportadoras u otros sistemas de transporte del mineral), β puede aumentar en un 50 %. En minas de gran volumen donde se utilizan sistemas de pozos múltiples, la constante del aire β también es múltiplo del número de sistemas de pozos necesarios.

Requisitos de refrigeración

Condiciones térmicas nominales

La definición de unas condiciones térmicas adecuadas para minimizar los peligros y los efectos negativos de la fatiga calorífica puede hacer necesaria la instalación de refrigeración mecánica además de la ventilación destinada a controlar los contaminantes. Aunque la fatiga calorífica aplicada es una función compleja de variables climáticas y respuestas fisiológicas a ellas, en términos de minería práctica los factores que más influyen son la velocidad del aire y la temperatura del termómetro húmedo. Así se observa en las potencias de refrigeración de aire con corrección de ropa

Tabla 74.2 • Potencias de refrigeración de aire con corrección de ropa (W/m^2).

Velocidad del aire (m/s)	Temperatura de bola mojada ($^{\circ}C$)					
	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0	32,5
0,1	176	153	128	100	70	37
0,25	238	210	179	145	107	64
0,5	284	254	220	181	137	87
1,0	321	290	254	212	163	104

(W/m^2) de la Tabla 74.2. A escala subterránea la temperatura radiante se considera igual a la temperatura del termómetro seco y $10^{\circ}C$ más que la temperatura del termómetro húmedo. La presión barométrica y el régimen de ropa son típicos del trabajo subterráneo (p. ej., 110 kPa y 0,52 unidades de ropa).

Una velocidad del aire de 0,1 m/s refleja el efecto de la convección natural (p. ej., no se percibe ningún flujo de aire). Una velocidad del aire de 0,25 m/s es la mínima permitida normalmente, y es necesaria una de 0,5 m/s cuando la temperatura del termómetro húmedo excede de $25^{\circ}C$. Para conseguir un equilibrio térmico, el calor metabólico resultante de velocidades de trabajo típicas debe ser: reposo, $50 W/m^2$; trabajo ligero, 115 a $125 W/m^2$; trabajo intermedio, 150 a $175 W/m^2$; y trabajo duro, 200 a $300 W/m^2$. Las condiciones nominales para una aplicación minera específica requerirían un estudio detallado de optimización. Por lo general, las temperaturas óptimas de termómetro húmedo se encuentran entre $27,5^{\circ}C$ y $28,5^{\circ}C$, siendo las inferiores aplicables a operaciones menos mecanizadas. Cuando la temperatura del termómetro húmedo excede de $30,0^{\circ}C$, disminuye el rendimiento y aumenta de forma considerable el riesgo de enfermedades relacionadas con el calor. Normalmente, debería interrumpirse el trabajo cuando la temperatura del termómetro húmedo supere los $32,5^{\circ}C$.

Cargas de calor en las minas

La carga de refrigeración de una mina es igual a la carga de calor de la misma menos la capacidad de refrigeración del aire de ventilación. La carga de calor es función de la autocompresión del aire en las vías de entrada de aire (conversión de la energía potencial en entalpía cuando el aire entra en la mina), del flujo de calor en la mina procedente de la roca circundante, del calor desprendido de las rocas fracturadas o del agua procedente de fisuras antes de ser eliminada de las entradas o secciones de trabajo y del calor resultante del funcionamiento de los equipos utilizados en los procesos de extracción y transporte del mineral. La capacidad de refrigeración del aire de ventilación depende de las condiciones ambientales térmicas del diseño en los puestos de trabajo y de las condiciones climáticas reales en superficie.

Aunque la contribución relativa de cada fuente de calor al valor total depende del lugar, la autocompresión suele ser el factor principal (35-50 % del total). Cuando aumenta la profundidad de la mina, puede llegar un punto en que la autocompresión convierta en negativa la capacidad de refrigeración del aire y, si se suministra más aire, aumenta la carga de refrigeración de la mina. En este caso, la cantidad de ventilación suministrada debe ser la mínima para el control de los contaminantes, siendo necesario incrementar la refrigeración para garantizar unas condiciones de trabajo productivas y seguras. La profundidad de la mina a la que empieza a ser necesario suministrar refrigeración depende fundamentalmente de las condiciones climáticas en superficie, de la distancia que tiene que recorrer el aire antes

de ser utilizado y de la cantidad de maquinaria pesada (diesel o eléctrica) que se emplee.

Sistemas de ventilación primaria

Redes

Los sistemas de ventilación primaria son redes que garantizan el flujo de aire a través de aberturas interconectadas. La red general de ventilación consta de puntos de conexión en los que se cruzan tres o más vías de aire, ramales entre estos puntos de conexión y mallas, que son pasos cerrados en la red. Aunque la mayoría de las redes de ventilación de minas son de tipo ramificado con cientos e incluso miles de ramales, el número de vías principales de entrada (ramal entre la superficie y los lugares de trabajo de la mina) y de retorno o escape (ramal entre los lugares de trabajo y la superficie) normalmente es inferior a diez.

Cuando en una red existe un gran número de ramales, no es fácil fijar un patrón de flujo y establecer la pérdida global de presión. Aunque muchas secciones suelen estar dispuestas en serie o en paralelo y pueden calcularse con precisión con métodos algebraicos, pueden existir otras más complejas que requieran métodos iterativos con convergencia a una tolerancia aceptable. Para el análisis de las redes se han utilizado ordenadores analógicos, que posteriormente han sido sustituidos por sistemas digitales más rápidos basados en la técnica de aproximación de Hardy Cross para redes de flujo de agua.

Resistencia en las vías y pérdidas por choque

La resistencia al flujo de aire de un túnel o de la bocamina es función de su tamaño y de las irregularidades de la superficie, dependiendo la pérdida de presión resultante de dicha resistencia y del cuadrado de la velocidad del aire. Al añadir energía al sistema puede generarse una presión para compensar esta pérdida. La energía puede tener un origen natural, como la energía procedente del calor de la roca o de otras fuentes (ventilación natural), que ha sido el método más utilizado para producir ventilación, aunque sólo convierte el 2-3 % de la energía y en los veranos cálidos la roca puede llegar a enfriar el aire entrante dando lugar incluso a inversiones de flujo. En las minas modernas, para suministrar energía a la corriente de aire se suele utilizar un ventilador que restaura la pérdida de presión, aunque los efectos de la ventilación natural pueden favorecer o dificultar esta operación en función de la época del año.

Cuando el aire pasa por encima de una superficie, las moléculas de aire en contacto directo con ésta se encuentran en reposo y las adyacentes resbalan sobre ellas con una resistencia que depende de la viscosidad del aire, formándose un gradiente de velocidad en el que la velocidad aumenta a medida que aumenta la distancia a la superficie. La capa límite creada como resultado de este fenómeno y la subcapa laminar que se va formando a medida que se desarrolla la capa límite influyen considerablemente en la cantidad de energía necesaria para favorecer el flujo. Por lo general, las rugosidades de la superficie de las vías de aire de la mina son suficientemente significativas para que los "baches" se extiendan a través de la subcapa límite. Desde el punto de vista hidráulico, la vía de aire es irregular y la resistencia es función de la irregularidad relativa, es decir la relación entre la altura de la irregularidad y el diámetro de la vía de aire.

La mayoría de las vías de aire construidas con técnicas convencionales de perforación y voladura presentan alturas de rugosidad comprendidas entre 100 y 200 mm y, ni siquiera en un terreno muy "rugoso", la altura media de las rugosidades supera los 300 mm. Cuando las vías de aire se construyen utilizando máquinas de barrenar, la altura de las rugosidades se sitúa entre 5 y 10 mm, valor que todavía se considera irregular desde

el punto de vista hidráulico. Las rugosidades de las vías de aire pueden reducirse con un recubrimiento, aunque esta operación se justifica más por el entibado del terreno que por la reducción de la energía necesaria para hacer circular el aire de ventilación. Así, por ejemplo, un pozo recubierto con cemento con irregularidades de 1 mm sería considerado transitoriamente irregular y el índice de Reynolds (relación entre inercia y viscosidad) también afectaría a la resistencia al flujo de aire. En la práctica, las dificultades para ir recubriendo de forma regular con hormigón un pozo profundo a medida que es excavado hace que las irregularidades y resistencias sean crecientes, pudiendo llegar a aumentar casi un 50 % al final del pozo con respecto a los valores de superficie.

El número de vías de aire de entrada y de salida entre los lugares de trabajo y la superficie es limitado, y gran parte de la pérdida total de presión en la mina (70-90 %) tiene lugar en ellas. Esta pérdida de presión en las vías de aire también depende de si existen discontinuidades que puedan causar pérdidas por choque, como curvas, contracciones, expansiones u obstrucciones en las vías de aire. Las pérdidas resultantes de estas discontinuidades (curvas de entrada o de salida de las vías de aire, etc.), expresadas en términos de pérdidas en longitudes equivalentes de vías de aire rectas, pueden representar un porcentaje importante del total y deben ser cuidadosamente valoradas, especialmente cuando se estudian las entradas y salidas de aire principales. Las pérdidas por discontinuidades dependen de la distancia de separación de la capa límite, que puede minimizarse evitando alteraciones repentinas en la zona.

Resistencia de las vías de aire con obstrucciones

La pérdida de presión por obstrucciones depende de su coeficiente de frenado y del coeficiente de relleno, que es la relación entre el área de bloqueo del objeto y el área de la sección transversal de la vía de aire. Las pérdidas causadas por obstrucciones pueden reducirse minimizando la separación de la capa límite laminando el objeto para reducir la amplitud de cualquier estela turbulenta. Los coeficientes de frenado son función de la forma y disposición de las obstrucciones en el pozo (valores comparativos: viga I, 2,7; cuadrada, 2,0; cilíndrica, 1,2; hexagonal alargada, 0,6 y totalmente laminada, 0,4).

Incluso con coeficientes de relleno pequeños y coeficientes de frenado bajos, si la obstrucción se repite de forma periódica, como ocurre con las vigas que separan los compartimentos de extracción en un pozo, el efecto acumulativo sobre la pérdida de presión es importante. Así, la resistencia de un pozo equipado con vigas hexagonales alargadas semilaminadas y con un coeficiente de relleno de 0,08 sería aproximadamente cuatro veces superior a la del pozo recubierto de hormigón. Aunque el coste de las estructuras de acero de sección rectangular hueca más comunes en el mercado es superior al de las vigas I, los coeficientes de frenado son aproximadamente la tercera parte y justifican fácilmente su utilización.

Ventiladores principales y ventiladores de refuerzo

Para mejorar la circulación del aire en los sistemas de ventilación de las minas se utilizan ventiladores axiales y centrífugos que permiten alcanzar eficiencias de ventilación superiores al 80 %. En los ventiladores principales de una mina la elección entre flujo axial o centrífugo depende de factores tales como el coste, el tamaño, la presión, la robustez y la eficiencia. En las minas en que un fallo de ventilación puede causar acumulaciones peligrosas de grisú, hay que instalar un sistema adicional de ventilación. Cuando el caso no sea tan crítico y se disponga de una instalación de doble ventilación, aunque deje de funcionar uno de los ventiladores se seguirá disponiendo de casi dos terceras partes

del flujo de aire de la mina. Los ventiladores de flujo axial instalados en las vías de aire resultan económicos pero su capacidad se limita a 300 m³/s. Para flujos mayores, hay que instalar ventiladores múltiples, que se conectan a la aspiración mediante conducciones y secciones curvas.

Para obtener la máxima eficiencia a un coste razonable, se utilizan ventiladores de flujo axial para las aplicaciones de baja presión (inferior a 1,0 kPa) y ventiladores centrífugos para los sistemas de alta presión (superior a 3,0 kPa). Cualquiera de las dos opciones resulta adecuada para presiones intermedias. Cuando se requiere robustez, como en el caso de aspiraciones con velocidades de aire por encima del rango crítico, y además por el sistema circulan gotículas de agua, la opción más aconsejable es un ventilador centrífugo. El rango crítico de velocidad del aire se sitúa entre 7,5 m/s y 12,5 m/s, donde las gotículas de agua pueden mantenerse en suspensión según su tamaño. Dentro de este rango, la cantidad de agua suspendida puede aumentar e ir incrementando la presión del sistema hasta que el ventilador se detiene. Esta es la región de fluctuación de flujo en la que parte del aire recircula alrededor de las paletas y el funcionamiento del ventilador se hace inestable. Aunque esta situación no es deseable para ningún tipo de ventilador, en esta región la posibilidad de un fallo de las paletas del ventilador centrífugo es bastante menor que en un ventilador axial.

Es raro que un ventilador principal se utilice siempre en el mismo punto durante toda la vida útil de la mina y, por tanto, es aconsejable disponer de métodos efectivos que permitan variar el rendimiento de la ventilación. Aunque poder variar la velocidad hace más eficiente el funcionamiento tanto de los ventiladores axiales como de los centrífugos, el aumento del coste es significativo, especialmente en ventiladores de gran tamaño. Es posible variar el rendimiento de un ventilador de flujo axial ajustando el ángulo de la paleta, operación que puede realizarse cuando el ventilador está parado o, a un coste bastante más alto, cuando está girando. Para variar el rendimiento de un ventilador centrífugo en funcionamiento se aplica una turbulencia al aire que entra en el ventilador aplicando paletas de entrada variables. La eficiencia del ventilador centrífugo fuera de su punto de diseño disminuye más rápidamente que la de un ventilador de flujo axial; así, cuando se necesita obtener un alto rendimiento en un amplio rango de puntos de operación y las presiones lo permiten, es aconsejable utilizar el ventilador de flujo axial.

Sistemas de ventilación

En el sistema general, el ventilador principal suele estar instalado a nivel de la superficie en la vía de salida del aire. Las principales razones para ello son, por un lado, la facilidad de instalación, ya que la entrada de aire suele ser un pozo de extracción y la salida de aire una vía independiente, y, por otro, la minimización de la carga de calor al estar los ventiladores separados de las vías de aire de entrada. Los ventiladores pueden instalarse en los pozos de extracción en modo impelente o aspirante instalando un castillete de extracción hermético. Sin embargo, si el pozo se utiliza asimismo para la entrada o salida de trabajadores, materiales o roca, pueden producirse fugas de aire.

Los sistemas de retorno que tienen instalados ventiladores de entrada y de salida de aire se utilizan para repartir la presión máxima en el sistema o para mantener una diferencia de presión mínima entre el lugar de trabajo y la superficie. Estos sistemas están indicados para minas con métodos por hundimiento, en donde la fuga de aire por la zona hundida puede ser indeseable. Al existir grandes diferencias de presión, y aunque la fuga de aire por una zona hundida normalmente es pequeña, pueden producirse problemas en los puestos de trabajo a causa del calor, la radiación o la oxidación.

Por las limitaciones de espacio, los ventiladores reforzadores subterráneos son casi siempre de flujo axial y se utilizan para reforzar el flujo en las secciones más profundas o alejadas de la mina. Su principal inconveniente es la posibilidad de recirculación entre las vías de salida de aire y las de entrada del ventilador reforzador. Si sólo se suministra un refuerzo a los flujos de aire más pequeños en caso necesario, puede reducirse la presión de ventilación principal en todo el flujo de aire de la mina, con la consiguiente reducción de potencia total de ventilación necesaria.

Ventilación secundaria

Sistemas auxiliares

Los sistemas de ventilación secundaria se instalan cuando la ventilación general resulta impracticable, como en los frentes en explotación. Hay cuatro tipos de sistemas, que presentan sus ventajas e inconvenientes específicos.

El *sistema de función forzada* produce el aire más natural y frío en el frente y permite utilizar tubos flexibles y más económicos. La alta velocidad del aire que sale del extremo del tubo de suministro produce un chorro que introduce aire adicional, y por efecto inductor del frente los contaminantes y proporciona una velocidad aceptable. Su principal desventaja es que el resto del frente se ventila con aire que está contaminado con los gases y el polvo producidos en las operaciones de minería. Este es un problema especialmente importante después de las voladuras, cuando los tiempos de reentrada segura son mayores.

El *sistema de aspiración* permite eliminar todos los contaminantes del frente y mantiene el resto del mismo con aire de entrada. Los inconvenientes son que el flujo de calor procedente de la roca circundante y la evaporación de la humedad dan lugar a un aumento de la temperatura del aire en el frente, las operaciones en la parte posterior del frente (eliminación de rocas con equipos diesel, etc.) contaminan el aire de entrada, no se produce chorro de aire que barra el frente y además es necesario utilizar conducciones más costosas que pueden mantener una presión negativa.

En el *sistema de aspiración-solapamiento* se ha solucionado el problema de limpiar el frente con un chorro de aire instalando un ventilador y conducciones más pequeñas (solapamiento). Además del coste adicional, presenta el inconveniente de que es necesario hacer avanzar el solapamiento a medida que lo hace el frente.

En el *sistema de inversión* se utiliza la ventilación forzada, salvo durante la voladura y en la fase de reentrada posterior a la voladura, cuando se invierte el flujo de aire. Su principal aplicación es en la construcción de pozos, donde los tiempos de reentrada para pozos profundos pueden ser prohibitivos si sólo se ha utilizado un sistema de forzado. La inversión del aire puede realizarse utilizando reguladores a la entrada y la salida del ventilador o aprovechando la característica de los ventiladores de flujo axial que hace que, al cambiar la dirección de giro de la paleta, se invierta el flujo obteniéndose un rendimiento del 60 % de la normal.

Ventiladores y conducciones

Los ventiladores utilizados para la ventilación secundaria son casi exclusivamente de flujo axial. Para conseguir las altas presiones necesarias para que el flujo logre pasar a través de conducciones de gran longitud, pueden utilizarse ventiladores múltiples con sistemas de impulsión de contrarrotación o corrotación. El mayor problema en los sistemas de ventilación auxiliar y de conducciones son las fugas de aire, especialmente en grandes distancias. Cuando las conducciones rígidas de acero galvanizado o fibra de

vidrio se instalan con juntas dan lugar a fugas reducidas y pueden utilizarse en frentes de hasta varios kilómetros de longitud.

Las conducciones flexibles son bastante más económicas y fáciles de instalar, pero las fugas en los acoplamientos y la facilidad con que se rompen al contacto con equipos móviles da lugar a pérdidas de aire mucho mayores. El límite práctico de utilización de conducciones flexibles raramente supera un 1,0 km, aunque puede ampliarse utilizando conducciones de mayor longitud y dejando amplios espacios de seguridad entre las conducciones y el equipo móvil.

Controles de ventilación

Tanto la ventilación general como los sistemas auxiliares de ventilación y las conducciones sirven para proporcionar aire de ventilación a los lugares de trabajo. Los controles de ventilación tienen el cometido de dirigir el aire al puesto de trabajo y de minimizar el cortocircuito o pérdida de aire entre las vías de entrada y salida de aire.

Para interrumpir el aire que fluye a través de un túnel de conexión se utilizan tabiques. Los materiales de construcción de estos tabiques dependen de la diferencia de presión existente y de la probabilidad de sufrir ondas de choque procedentes de voladuras. Las cortinas flexibles sujetas a las superficies de roca circundantes están indicadas para aplicaciones de baja presión, como la separación de las vías de aire de entrada y de salida en un panel de sala y pilares extraído con un equipo continuo. Los tabiques de madera y de hormigón están indicados para soportar presiones mayores y pueden incorporar una faldilla de goma pesada que, al abrirse en caso de voladura, minimiza los posibles daños.

Hay que disponer de una puerta de ventilación en los lugares de paso de personas o vehículos. El material de construcción, el mecanismo de apertura y el grado de automatización de estas puertas dependerán de la diferencia de presión existente y de la frecuencia de la operación de apertura/cierre. Para aplicaciones a alta presión pueden instalarse dos o incluso tres puertas para crear bloqueos de aire y reducir las fugas y las pérdidas de aire de entrada. A fin de facilitar la apertura de las puertas de bloqueo de aire, suelen disponer de una pequeña sección deslizante que se abre primero para equilibrar la presión a ambos lados de la puerta.

Los reguladores se utilizan cuando sólo se desea reducir y no interrumpir totalmente la cantidad de aire que pasa por un túnel y también cuando los accesos son innecesarios. El regulador dispone de un orificio variable, de modo que al variar el área varía la cantidad de aire que pasa a través de él. El panel abatible es uno de los tipos más sencillos y consta de un marco de hormigón con canales en los que se pueden colocar (abatir) diferentes paneles de madera, variando así el área de paso. Otros tipos, como los registros de ventilación con persiana, pueden automatizarse y controlarse de forma remota. En los niveles superiores de algunos sistemas de frentes abiertos puede ser necesario el paso esporádico de aire a través de los reguladores, para lo cual basta levantar o bajar los paneles flexibles pero rígidos horizontalmente que permiten el acceso del aire al tiempo que minimizan los daños por voladura. Para aumentar la resistencia en secciones de un nivel donde temporalmente no existe actividad minera a veces se utilizan montones de roca partida.

Sistemas de refrigeración

El primer sistema de refrigeración de minas se instaló en 1919 en Morro Velho (Brasil). Desde entonces, esas instalaciones fueron en aumento, pasando de los 3 megavatios de refrigeración (MWR) por año de la primera instalación hasta cerca de 100 MWR en 1965. A partir de ese momento, el aumento de la capacidad ha sido exponencial, duplicándose el valor cada seis o

siete años. En la evolución de la refrigeración de las minas ha influido el desarrollo de la industria del aire acondicionado y las dificultades derivadas de un sistema de minería dinámico en el que las incrustaciones de las superficies del intercambiador de calor pueden afectar profundamente a la cantidad de refrigeración suministrada.

En un principio, las plantas de refrigeración estaban instaladas en la superficie y se enfriaba el aire que entraba en la mina. A medida que fue aumentando la distancia entre la superficie y el fondo de la mina se fue reduciendo el efecto refrigerante y hubo que trasladar las plantas de refrigeración al interior de las minas, más cerca de los puestos de trabajo. Sin embargo, la dificultad para combatir el calor subterráneo, así como la sencillez de funcionamiento y mantenimiento de las plantas de superficie, ha provocado una vuelta a ellas. Actualmente, además de enfriar el aire de entrada, también se suministra agua fría al interior de la mina para su uso en los sistemas de enfriamiento de aire próximos a los puestos de trabajo o como agua de servicio en perforaciones y para la eliminación del polvo.

Equipo de la planta de refrigeración

Los equipos generadores están formados por bombas de calor situadas en la planta de superficie. La capacidad de una planta puede oscilar entre 5 MWR y 100 MWR y, por lo general, son necesarios sistemas de compresores múltiples con mecanismos de desplazamiento centrífugo o positivo. El frigorígeno suele ser amoniaco en las plantas al nivel de superficie y un hidrocarburo halogenado para las plantas a nivel subterráneo.

El calor necesario para condensar el refrigerante después de la compresión se libera a la atmósfera y, para minimizar la potencia necesaria de refrigeración de la mina, se reduce al mínimo. La temperatura del termómetro húmedo siempre es inferior o igual a la temperatura del termómetro seco y, por lo tanto, siempre se seleccionan sistemas de rechazo de calor húmedo. Se suelen utilizar condensadores por agua y forma de separación. También pueden combinarse ambos procesos utilizando un condensador evaporativo en el que el frigorígeno circula por tubos por los que pasa el aire y se vaporiza el agua. Si la planta de refrigeración se instala dentro de la mina, se utiliza el aire de aspiración de ésta para rechazar el calor, salvo que se bombee a la superficie el agua del condensador. El funcionamiento de la planta subterránea está limitado por la cantidad de aire disponible y por su humedad relativa ya que dentro de la mina es mayor que en la superficie.

La producción de aire frío se realiza mediante un sistema de evaporador por agua que se suministra a intercambiadores agua-aire, climatizadores y también suministra agua fría de servicio para la mina. La calidad del agua de mina produce incrustaciones en el intercambiador de calor, aumentando la resistencia al flujo de calor. Siempre que sea posible, debe minimizarse este efecto seleccionando equipos que presenten grandes áreas superficiales de contacto con el agua y que sean fáciles de limpiar. Tanto a nivel superficial como subterráneo se utilizan cámaras de vaporización y torres de refrigeración que proporcionan un intercambio de calor más efectivo por contacto directo entre el aire en proceso de enfriamiento y el agua fría. Los serpentines de refrigeración que separan el aire y las corrientes de agua se van obstruyendo con el polvo y las partículas diesel y su efectividad disminuye rápidamente.

Los sistemas de recuperación de energía pueden utilizarse para amortizar los costes producidos por el bombeo del agua al exterior de la mina, aplicación para la que están muy indicadas las ruedas Pelton. El uso del agua fría como agua de servicio ha

permitido disponer de refrigeración en todas las actividades de la mina y su uso ha mejorado considerablemente la efectividad de los sistemas de refrigeración de las minas.

Sistemas de hielo y refrigeradores locales

La capacidad de refrigeración de 1,0 l/s de agua fría suministrada dentro de la mina oscila entre 100 y 120 kW. En minas en que es necesaria una gran potencia de refrigeración a profundidades superiores a 2.500 m, el coste de la recirculación del agua fría puede justificar su sustitución por hielo. Si se tiene en cuenta el calor latente de fusión del hielo, la capacidad de refrigeración de un 1,0 l/s se cuadruplica aproximadamente, reduciendo así la cantidad de agua que es necesario bombear desde el interior de la mina a la superficie. La utilización del hielo para transportar el frío reduce la potencia de bombeo necesaria, pero esta ventaja se compensa con la energía empleada en la producción del hielo y por la imposibilidad de recuperar la energía.

El trazado de la mina es, por lo general, la actividad que genera una mayor carga de calor en relación con la cantidad de aire disponible para ventilación. Esto suele generar unas temperaturas en el puesto de trabajo muy superiores a las que se encuentran en otras actividades en la misma mina. Cuando la instalación de la refrigeración en la mina sea una cuestión compleja, podrán utilizarse temporalmente refrigeradores locales especialmente dirigidos a las operaciones de trazado. Un refrigerador local es básicamente una planta de refrigeración subterránea en miniatura con condensadores por aire, el cual es conducido a los circuitos de retorno desde la explotación, y sus valores típicos se encuentran entre 250 y 500 kW de refrigeración.

Supervisión y emergencias

Para cumplir los requisitos legales y supervisar de forma continuada la efectividad de los métodos de control de la ventilación, se efectúan estudios rutinarios de la ventilación que incluyen mediciones del flujo de aire, de los contaminantes y de la temperatura. Siempre que sea posible, se supervisarán de forma continua los parámetros del sistema, tanto de los equipos como de la calidad de aire. Cuando se supervisa continuamente un contaminante crítico, puede realizarse un control automático que, al superar un límite prefijado, active la acción correctora correspondiente.

Estudios más detallados de presión barométrica y temperatura son menos frecuentes y se utilizan para confirmar la resistencia de las vías de aire y planificar ampliaciones de operaciones existentes. Esta información puede utilizarse para ajustar las resistencias de simulación de la red y reflejar la distribución real del flujo de aire. Para determinar el rendimiento real del equipo y supervisar cualquier posible variación pueden utilizarse asimismo modelos de sistemas de refrigeración y análisis de mediciones de flujo y temperatura.

En las minas, las emergencias relacionadas con el sistema de ventilación pueden ser incendios, explosiones de gas y fallos en la corriente de ventilación. Los dos primeros casos se estudian en otra sección de este capítulo y el tercero sólo representa un problema en las minas profundas, donde las temperaturas del aire pueden aumentar hasta niveles peligrosos. En esos casos se suele instalar un ventilador de refuerzo con motor diesel para disponer de un flujo reducido de aire a través de la mina. Por lo general, cuando se produce una emergencia, como un incendio dentro de la mina, es mejor no modificar la ventilación mientras quede dentro de la mina personal familiarizado con el tipo normal de ventilación.

● ILUMINACION EN LAS MINAS SUBTERRANEAS

Don Trotter

Fuentes de iluminación en las minas

En 1879 se patentó la lámpara de filamento incandescente, y a partir de entonces la iluminación dejó de depender de una fuente de combustible. Desde el descubrimiento de Edison se han producido numerosos e importantes avances en el conocimiento de la luz, entre ellos algunas aplicaciones para las minas subterráneas que presentan ventajas e inconvenientes específicos. En la Tabla 74.3 se muestran varios tipos de fuentes de iluminación y algunos de los parámetros correspondientes.

La corriente para alimentar fuentes de iluminación puede ser de tipo alterno (CA) o continuo (CC). Las fuentes de iluminación fijas utilizan casi siempre corriente alterna mientras que las portátiles, como las lámparas de casco y los faros de los vehículos subterráneos, se sirven de baterías de corriente continua. No todos los tipos de fuentes de iluminación resultan adecuados para corriente continua.

Fuentes de iluminación fijas

Las lámparas de filamento de tungsteno son las más habituales y a menudo están provistas de una bombilla esmerilada y una protección para reducir el deslumbramiento. La lámpara fluorescente es la segunda fuente de iluminación más utilizada y se distingue fácilmente por su diseño tubular. En las minas, donde suele escasear el espacio, se emplean diseños compactos de tipo circular y en forma de U. En las minas subterráneas las fuentes de filamento de tungsteno y fluorescentes se utilizan para iluminar estaciones de pozo, acarreadores, galerías, comedores, estaciones de carga, depósitos de combustibles, instalaciones de reparación, almacenes, cuartos de herramientas y estaciones de trituración.

La tendencia en materia de iluminación de minas es utilizar fuentes de iluminación más eficientes, del tipo de las de descarga de alta intensidad (HID), vapor de mercurio, haluro metálico, y sodio a alta presión y a baja presión. Estas fuentes requieren algunos minutos (1-7) para alcanzar su capacidad luminica total y, si se interrumpe el suministro de energía a la lámpara, el tubo de arco debe enfriarse antes de poder encenderse de nuevo (salvo en las lámparas de sodio a baja presión (Sox), de reencendido casi instantáneo). La distribución espectral es diferente a la de la luz natural. Las lámparas de vapor de mercurio producen una luz blancoazulada mientras que las de sodio a alta presión

producen una luz amarillenta. Dado que en el trabajo subterráneo es importante distinguir bien los colores (p. ej., para utilizar botellas de gas con diferentes códigos de color en los trabajos de soldadura, para reconocer señales con códigos de color, para conectar cables eléctricos o para clasificar minerales por su color), hay que tener en cuenta la apreciación de color que permite cada fuente. Los objetos, al ser iluminados por una lámpara de sodio a baja presión, presentan un color superficial distorsionado. En la Tabla 74.3 se indica la apreciación de color de las diferentes fuentes.

Fuentes de iluminación móviles

Cuando los puestos de trabajo están diseminados tanto en sentido horizontal como vertical y se realizan operaciones continuas de voladura en ellos, las instalaciones permanentes resultan impracticables por su alto coste de instalación y mantenimiento. En muchas minas, la lámpara de baterías en el casco del minero es la principal fuente de iluminación. Aunque a veces se utilizan lámparas de casco fluorescentes, en su mayoría son de filamento de tungsteno alimentadas con batería (bien de tipo ácido de plomo o bien de níquel-cadmio). En ocasiones también se utiliza una minibombilla halógena de tungsteno; la minibombilla permite enfocar fácilmente el rayo y el gas halógeno alrededor del filamento evita que éste hierva y ennegrezca las paredes de la lámpara. La bombilla también puede arder con más calor y, por tanto, con más luz.

Para los vehículos móviles, el método de iluminación más utilizado son las lámparas incandescentes, que no requieren mecanismos especiales, resultan económicas y son fáciles de sustituir. En los faros de los vehículos se utilizan lámparas parabólicas de reflector aluminizado (PAR).

Normas de iluminación en las minas

En los países con una industria minera subterránea fuerte existen, por lo general, requisitos muy específicos de seguridad de iluminación en las minas y, en especial, en aquellas en que se desprende gas metano, generalmente minas de carbón. El gas metano puede entrar en combustión y ocasionar explosiones subterráneas de efectos devastadores. Por lo tanto, el diseño de la iluminación debe ser "intrínsecamente seguro" o "antideflagración". Una fuente luminosa intrínsecamente segura es aquella que dispone de una corriente de alimentación de baja energía, de forma que un cortocircuito no puede producir chispas que den lugar a la combustión del gas metano. En una lámpara antideflagración cualquier explosión causada por la electricidad de la

Tabla 74.3 • Comparación de fuentes de iluminación en minería.

Tipo de fuente de iluminación	Luminancia aproximada cd/m ² (bombilla transparente)	Vida nominal media (h)	Fuente CC	Eficacia inicial aproximada lm·W ⁻¹	Apreciación de color
Filamento de tungsteno	105 a 107	750 a 1.000	Sí	5 a 30	Excelente
Incandescente	2 × 107	5 a 2.000	Sí	28	Excelente
Fluorescente	5 × 104 a 2 × 105	500 a 30.000	Sí	100	Excelente
Vapor de mercurio	105 a 106	16.000 a 24.000	Sí, con limitaciones	63	Media
Halogenuro metálico	5 × 106	10.000 a 20.000	Sí, con limitaciones	125	Buena
Sodio a alta presión	107	12.000 a 24.000	No recomendada	140	Regular
Sodio a baja presión	105	10.000 a 18.000	No recomendada	183	Mala

cd = bujías, CC = corriente continua; lm = lúmenes.

lámpara debe quedar contenida dentro de la misma, y no debe generar calor suficiente para causar una explosión. Este tipo de lámparas son más caras y más pesadas, pues contienen piezas de metal fundido. Los gobiernos suelen disponer de instalaciones de prueba para certificar las lámparas clasificadas como válidas para su uso en minas con emisiones de gas. Una lámpara de sodio a baja presión no podría ser certificada como tal, ya que en caso de rotura el sodio de su interior ardería en contacto con el agua.

Los Estados han adoptado asimismo normas que establecen la cantidad de luz necesaria para cada tarea; según las diferentes legislaciones, la cantidad de luz para cada puesto de trabajo varía considerablemente.

Las organizaciones internacionales que se ocupan de la iluminación, como la Sociedad de Ingeniería de la Iluminación (IES) y la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE), también elaboran directrices de iluminación para minas. Según la CIE, la calidad de la luz recibida por el ojo es tan importante como la cantidad y ha establecido fórmulas para evitar que el deslumbramiento afecte al rendimiento visual.

Repercusión de la iluminación en los accidentes, la producción y la salud

Cabría esperar que una mejor iluminación permitiría reducir el número de accidentes, aumentar la producción y reducir los riesgos para la salud, pero esto no resulta fácil de justificar. En una mina, es difícil medir el efecto directo de la iluminación sobre la eficiencia y la seguridad, porque la iluminación es sólo uno de los muchos factores que inciden en la producción y la seguridad. Está bien documentado el hecho de que los accidentes en las autopistas disminuyen cuando se mejora la iluminación. También en las fábricas se ha observado una correlación similar. Sin embargo, en la minería, las zonas de trabajo experimentan un cambio continuo y hay muy pocos informes que relacionen los accidentes en las minas con la iluminación, por lo que ésta sigue siendo un campo de investigación muy poco explorado. Las investigaciones sobre accidentes demuestran que una iluminación deficiente rara vez es la causa primera de los accidentes subterráneos, aunque sí un factor adicional. Las condiciones de iluminación influyen en muchos accidentes en las minas y de forma especial en los producidos por caídas, ya que una mala iluminación dificulta la observación de situaciones peligrosas que podrían haberse evitado.

Hasta comienzos del siglo XX los mineros sufrían, por lo general, de una afección ocular denominada nistagmus, para la que no existía curación. Esta enfermedad producía un movimiento incontrolado de los globos oculares, dolor de cabeza, vértigos y pérdida de la visión nocturna y estaba causada por el trabajo con niveles de luz muy bajos durante largos períodos de tiempo. Los mineros del carbón eran especialmente susceptibles a esta enfermedad, dado que el carbón refleja muy poca luz. Además, a menudo tenían que tumbarse de lado para poder trabajar en los filones de carbón más bajos, lo que también parece haber contribuido a esta enfermedad. Con la introducción en las minas de las lámparas eléctricas de casco esta enfermedad ha desaparecido y se ha eliminado el mayor riesgo para la salud asociado a la iluminación de las minas.

Con los últimos avances tecnológicos en materia de fuentes de iluminación se ha reavivado el interés por la iluminación y la salud. En la actualidad, es posible disponer en las minas de niveles de iluminación que hubieran sido extremadamente difíciles de alcanzar hace tiempo. Ahora, el principal problema es el deslumbramiento, aunque también existe cierta preocupación por la energía radiométrica que emiten las luces, que puede afectar a los trabajadores al actuar directamente sobre las células de la piel o activar ciertas respuestas, como los ritmos biológicos

que influyen en la salud física y mental. Una fuente de iluminación HID puede seguir funcionando aunque la parte exterior de vidrio que contiene la fuente esté rajada o rota, dando lugar a que los trabajadores reciban dosis superiores a los valores límite umbral, especialmente porque estas fuentes de iluminación a menudo tienen que instalarse a baja altura.

EQUIPOS DE PROTECCION INDIVIDUAL EN LAS MINAS

Peter W. Pickerill

Protección para la cabeza

En la mayoría de los países, los mineros deben tener y llevar cascos o sombreros de seguridad homologados por la jurisdicción en que opere la mina. Los sombreros se diferencian de los cascos en que tienen un ala completa en lugar de sólo la parte frontal, de forma que el agua escurre por ella cuando se trabaja en minas muy húmedas; por otro lado, al no llevar ranuras laterales, no se pueden montar en él los protectores de oídos, linternas, caretas para trabajos de soldadura, corte, molienda, picado y saneamiento u otros accesorios. En las minas, los sombreros de seguridad sólo se utilizan raramente para proteger la cabeza.

El casco o el sombrero de seguridad va equipado en la mayoría de los casos con una abrazadera y una cuerda para sujetar la lámpara.

El casco tradicional es de perfil muy bajo para reducir la posibilidad de golpearse la cabeza en las minas de carbón de capas bajas. Sin embargo, en las minas en que el espacio para la cabeza es suficiente, un perfil bajo del casco no tiene mucha utilidad. Además, el perfil bajo se consigue a costa de reducir el espacio libre entre la parte alta del casco y el cráneo del minero, de forma que estos tipos de casco rara vez cumplen las normas de seguridad industrial para impacto superior en la cabeza. En las jurisdicciones en que las normas son de obligado cumplimiento, el casco tradicional del minero está siendo sustituido por un protector industrial convencional para la cabeza.

Las normas de seguridad industrial para la cabeza han variado muy poco desde el decenio de 1960, aunque en el de 1990 el auge en el deporte de los protectores de cabeza (cascos para jugar al hockey, montar en bicicleta, etc.) ha permitido detectar los defectos de los mecanismos de seguridad industrial para la cabeza, especialmente la falta de protección frente a impactos laterales y la falta de sujeción en caso de impacto. Estos beneficios han servido de presión para actualizar las normas de los protectores industriales de cabeza, que en algunas jurisdicciones ya ha dado sus frutos. Actualmente, están apareciendo en el mercado industrial cascos de seguridad con relleno de espuma, suspensiones de trinquete y mentoneras, aunque su aceptación por los usuarios todavía no es muy amplia a causa de su alto coste y peso y su incomodidad de uso. Sin embargo, a medida que las nuevas normas vayan siendo incorporadas a la legislación del trabajo, este nuevo tipo de casco seguramente se irá abriendo paso en la industria minera.

Lámparas de casco

En las zonas de las minas en que no hay instalada una iluminación permanente, la lámpara de casco de los mineros es fundamental para poder moverse y trabajar de forma efectiva y segura. Los requisitos clave de una lámpara de casco es que sea resistente, de fácil manejo con los guantes puestos, que proporcione luz suficiente durante todo un turno de trabajo (con el nivel de

iluminación especificado por la normativa local) y sea lo más ligera posible sin sacrificar ninguno de los parámetros de rendimiento anteriores.

Recientemente, las bombillas halógenas están sustituyendo en gran medida a las de filamento incandescente de tungsteno. De este modo, se ha podido triplicar y hasta cuadruplicar el nivel de iluminación, cumpliendo las normas mínimas de iluminación especificadas en la legislación incluso al final de un turno prolongado de trabajo. Las baterías también son un factor importante en el rendimiento de una lámpara. En la mayoría de las aplicaciones mineras todavía predomina la batería ácida de plomo, aunque algunos fabricantes están introduciendo con éxito baterías de níquel-cadmio (nicad), con el mismo rendimiento y menor peso. Sin embargo, los aspectos de fiabilidad, duración y mantenimiento siguen siendo favorables a la batería ácida de plomo, razón por la que probablemente siguen dominando el mercado.

Ultimamente, las lámparas de casco, además de para iluminar, también se utilizan como sistemas de comunicación de seguridad en las minas. Los receptores de radio y la circuitería integrada en la cubierta de la batería permiten a los mineros recibir mensajes, avisos o instrucciones de evacuación a través de un transmisor de radio de muy baja frecuencia (VLF), con aviso de los mensajes entrantes mediante parpadeo de la lámpara del casco. Estos sistemas todavía se encuentran en su fase inicial de desarrollo, pero su potencial como sistema de alarma hace pensar que van a desplazar a los sistemas tradicionales de gas fétido en las minas en que sea posible instalar un sistema de comunicación por radio VLF.

Protección para ojos y cara

La mayoría de las explotaciones mineras disponen de programas de protección para los ojos, siendo obligatorio el uso de gafas de seguridad, mascarillas protectoras o escafandras autónomas, dependiendo de las operaciones que realice y los riesgos a los que esté expuesto el minero. En la mayoría de las operaciones mineras las gafas de seguridad con protectores laterales aportan una protección adecuada. El polvo y la suciedad en muchos entornos mineros, especialmente en la minería de roca dura, pueden ser muy abrasivos y causar rayaduras y un desgaste rápido en las gafas de seguridad con cristales de plástico (policarbonato). Por esta razón, en muchas minas todavía está permitido el uso de cristales de vidrio, aunque no tengan la misma resistencia a impactos y fracturas de los cristales de policarbonato e incluso a veces puedan incumplir la normativa local vigente en materia de protección ocular. En las gafas con cristales de plástico se sigue mejorando el tratamiento antiniebla y el endurecimiento de la superficie, tratamientos que al cambiar la estructura molecular de la superficie de la lente en lugar de aplicar simplemente una película o un recubrimiento, suelen ser más efectivos y duraderos y permiten sustituir el cristal en entornos de minería de efecto abrasivo.

Las gafas ajustadas no se suelen utilizar dentro de la mina salvo cuando la operación de que se trate conlleve un peligro de salpicadura de productos químicos.

La careta se suele utilizar cuando el minero necesita protegerse la cara de salpicaduras de metal fundido, residuos de molienda u otras partículas grandes que puedan saltar en operaciones de corte, picado o saneamiento. La careta puede ser de material especial, como en el caso de las soldaduras, o ser acrílica transparente o de policarbonato. Aunque puede llevar su propia sujeción de cabeza, en las minas normalmente se monta en las ranuras del casco de seguridad del minero. Las caretas están diseñadas de forma que puedan levantarse de forma

rápida y fácil para observar el trabajo y bajarse por delante de la cara para seguir realizando el trabajo.

Cuando se necesita también una protección respiratoria frente a una sustancia irritante de los ojos puede utilizarse una escafandra autónoma que aporte protección total a la cara. En las minas, este tipo de trabajo suele ser más común en el procesamiento a nivel de superficie que en la propia operación subterránea.

Protección respiratoria

La protección respiratoria más habitual en las operaciones mineras es la protección contra el polvo. El polvo de carbón, como la mayoría de los polvos ambientales, puede filtrarse de forma efectiva utilizando una mascarilla convencional. Entre las escafandras autónomas disponibles resulta eficaz el tipo que utiliza una protección elástica de nariz y boca y filtros desechables, mientras que el tipo de copa de fibra desechable se considera ineficaz.

Por ejemplo, las operaciones de soldadura, uso de disolventes, manejo de combustibles o voladura pueden producir contaminantes transportados por el aire que hagan necesario el uso de respiradores dobles de cartucho para eliminar las combinaciones de polvo, niebla, humos, vapores orgánicos y gases ácidos. En estos casos, el nivel de protección del minero vendrá dado por la medida de los contaminantes, realizada habitualmente de forma local con tubos de detección o instrumentos portátiles. El minero utilizará la escafandra hasta que el sistema de ventilación de la mina haya eliminado o reducido los contaminantes a un nivel aceptable.

Ciertos tipos de partículas habituales en las minas, como las fibras de amianto en las minas de este mineral, el polvo de carbón en las minas por tajos largos y los radionucleidos en las minas de uranio, pueden obligar a utilizar una escafandra de presión equipada con un filtro absoluto de alta eficiencia para partículas (HEPA), como las escafandras eléctricas de purificación del aire (PAPR) que envían el aire filtrado a una campana, a una mascarilla ajustada o a una mascarilla integrada en el casco.

Protección para los oídos

Los vehículos, la maquinaria y las herramientas eléctricas que se utilizan en el interior de las minas generan niveles elevados de ruido ambiental que a largo plazo pueden dañar la salud de las personas. Para evitarlo, se suelen utilizar protectores tipo orejeras que se montan en las ranuras del casco del minero y, como protección adicional, tapones de espuma. Los tapones de oídos, ya sean desechables de espuma o elastoméricos reutilizables, pueden utilizarse directamente en los oídos bien porque así se desee o porque las ranuras laterales del casco se hayan utilizado ya para una mascarilla facial o para otro accesorio.

Protección para la piel

Algunas operaciones mineras pueden causar irritación de la piel. Siempre que sea posible, se utilizarán guantes de trabajo en estas operaciones. Como protección adicional se utilizarán cremas barrera, especialmente cuando no se puedan utilizar guantes.

Protección para los pies

Las botas de trabajo en las minas pueden ser de piel o de goma, dependiendo de si la mina es seca o húmeda. Los requisitos mínimos que deben cumplir las botas incluyen una suela gruesa totalmente resistente a la perforación con una capa exterior

reforzada para evitar deslizamientos, una puntera de acero y con protección para el empeine. Aunque estos requisitos básicos no han variado a lo largo de los años, sí se ha conseguido que la estructura de las botas sea mucho menos pesada e incómoda que la de las utilizadas hace algunos años. Así, en lugar de las anillas y los antiguos enganches de acero, en la actualidad se utiliza la protección de empeine en fibra moldeada, que proporciona una protección equivalente pero más ligera y con menor riesgo de tropiezos. La forma de la bota de los mineros se ha hecho más anatómica y se han adoptado del calzado deportivo las suelas intermedias, que absorben energía, las barreras totales para la humedad y los materiales aislantes modernos.

Ropa

Los monos de algodón normal o ignífugo son de uso habitual en las minas. Por lo general, se les añaden tiras de material reflectante para que el minero sea más visible para los conductores de vehículos que trabajen en el interior de las minas. Los mineros que trabajan con trenes perforadores u otro tipo de equipo pesado pueden llevar impermeables encima de los monos para protegerse de líquidos ácidos o aceites hidráulicos o lubricantes que puedan gotear o salpicarles desde los equipos.

Como protección para las manos se utilizan guantes de trabajo. Los de uso universal están fabricados en lona de algodón reforzada con piel. Para funciones especiales pueden utilizarse guantes de otros tipos.

Cinturones y sujeciones

En la mayoría de las jurisdicciones, el cinturón de minero ya no se considera adecuado ni está homologado como protección frente a caídas. Sin embargo, todavía se sigue utilizando un cinturón de cincha o piel con o sin mecanismos de suspensión y con o sin soporte lumbar para llevar la batería de la lámpara y un autorrescatador con filtro o de tipo autocontenido (con generador de oxígeno), en caso necesario.

Actualmente en las minas, el único sistema recomendado de protección frente a caídas es un arnés de cuerpo completo con una anilla en D entre los homóplatos. Los mineros que trabajan en pozos, sobre trituradoras o cerca de aberturas o pozos abiertos deben llevar este arnés junto con una cuerda adecuada y un mecanismo amortiguador de choques. También pueden añadirse mosquetones al arnés o al cinturón del minero para permitir el posicionamiento en el trabajo o limitar sus movimientos dentro de unos márgenes seguros.

Protección contra el frío y el calor

En las minas a cielo abierto de regiones de clima frío, los mineros llevarán ropa de invierno con calcetines, ropa interior y guantes térmicos, calzoncillos o calzones resistentes al viento, un chaquetón guateado con capucha y un gorro de lana para debajo del casco de seguridad.

En las minas subterráneas suele ser más problemático el calor que el frío. La temperatura ambiente puede ser alta debido a la profundidad o por estar situada la mina en una región de clima cálido. Para protegerse de la fatiga calorífica y de un posible golpe de calor, se utilizarán trajes o ropa interior especiales en los que puedan introducirse paquetes de gel congelado o fabricados con una red de tubos de refrigeración con líquido refrigerante que circule por la superficie del cuerpo y después a través de un intercambiador de calor externo. Cuando la propia roca está caliente se utilizarán guantes, calcetines y botas resistentes al calor. Deberá disponerse de agua potable, preferentemente

con electrolitos, que se consumirá para sustituir los fluidos corporales eliminados.

Otros equipos de protección

Algunas normativas locales y algunos tipos de minas exigen la utilización por los mineros de un mecanismo de autorrescate, que es una protección respiratoria que ayuda al minero a escapar de la mina en caso de incendio o explosión y cuando la atmósfera resulte irrespirable por monóxido de carbono, humo u otros contaminantes tóxicos. El autorrescatador puede ser un mecanismo de tipo filtro con un catalizador para el monóxido de carbono o de tipo autocontenido, es decir, un respirador de circuito cerrado que regenera químicamente el oxígeno exhalado.

En las minas, los instrumentos portátiles para detectar y medir los gases y combustibles tóxicos (como tubos y bombas de tubo de detección) sólo son utilizados por los responsables de seguridad de la mina o por las personas designadas en los procedimientos de funcionamiento estándar, que comprueban la atmósfera de la mina periódicamente o antes de la entrada de los mineros.

Se ha comprobado que la comunicación con el personal que trabaja en las minas subterráneas produce enormes beneficios en materia de seguridad, por lo que cada vez se están implantando más en las explotaciones mineras modernas los sistemas de comunicación bidireccional, los buscapersonas y los mecanismos de localización.

INCENDIOS Y EXPLOSIONES EN MINAS

Casey C. Grant

Los incendios y las explosiones representan una amenaza constante para la seguridad de los mineros y para la capacidad productiva de las explotaciones mineras y figuran tradicionalmente entre las catástrofes industriales más devastadoras.

A finales del siglo pasado, los incendios y explosiones en la minería ocasionaron una cantidad de pérdidas personales y materiales no igualada por ningún otro sector industrial. En la actualidad, se ha avanzado notablemente en el control de estos peligros, como refleja la reducción del número de incendios y explosiones registradas en los últimos decenios en las minas.

En el presente artículo se describen los peligros básicos que presentan los incendios y las explosiones en la minería subterránea y las precauciones que deben observarse para minimizarlos. La información sobre la protección contra incendios de los mineros en explotaciones a cielo abierto puede encontrarse en esta misma *Enciclopedia* y en las normativas publicadas por organizaciones tales como la Asociación Nacional de Protección contra Incendios (National Fire Protection Association) de Estados Unidos (p. ej., NFPA 1996a).

Áreas de servicio permanente

Por su propia naturaleza, las áreas de servicio permanente requieren ciertas actividades peligrosas ante las que deben adoptarse precauciones especiales. Los talleres de mantenimiento subterráneos y demás instalaciones afines constituyen un peligro especial en la minería subterránea.

Los equipos móviles de los talleres de mantenimiento suelen ser una fuente frecuente de incendios. Los incendios en las máquinas con motor diesel suelen estar causados por pérdidas

en las conducciones hidráulicas a alta presión que vierten una mezcla caliente de líquido altamente combustible sobre un punto de ignición, como puede ser un colector caliente de escape o un turbosobrealimentador (Bickel 1987). Los incendios en este tipo de equipos se propagan rápidamente.

Gran parte de los equipos móviles empleados en las minas subterráneas no sólo cuentan con fuentes de combustible (p. ej., diesel y mecanismos hidráulicos), sino también con fuentes de ignición (p. ej., motores diesel y equipos eléctricos), por lo que representan en sí mismos un riesgo notable de incendio. Aparte de estos equipos, los talleres de mantenimiento disponen generalmente de numerosas herramientas, materiales y aparatos (p. ej., equipos para desengrasar) que constituyen un peligro en cualquier entorno de taller mecánico.

Las operaciones de soldadura y corte, sumamente habituales en cualquier zona de mantenimiento, son una causa primaria de incendios en la minería. Es preciso adoptar precauciones especiales para garantizar que estas actividades no constituyan una fuente potencial de ignición de incendios o explosiones. En esta misma *Enciclopedia* y en documentos como el NFPA 1994a puede encontrarse información sobre protección contra incendios y explosiones en relación con una práctica segura de la soldadura.

Hay que considerar la posibilidad de construir toda la zona de taller como una estructura totalmente cerrada y edificada con materiales ignífugos, aspecto que tiene especial interés en talleres con una vida prevista superior a los 6 meses. Cuando no resulte posible utilizar estos materiales, la zona deberá protegerse con un sistema automático de extinción de incendios. Esta medida resulta especialmente importante en la minería del carbón, donde es fundamental reducir al mínimo cualquier fuente potencial de incendio.

Otra consideración importante para cualquier zona de taller es que la ventilación esté conectada al retorno de aire, lo que reduce la propagación de los productos resultantes de la combustión en caso de incendio. Los requisitos para este tipo de instalaciones se encuentran claramente descritos en documentos tales como NFPA 122, *Normativa para la prevención y el control de incendios en minas subterráneas dedicadas a la extracción de minerales metálicos y no metálicos*, y NFPA 123, *Normativa para la prevención y control de incendios en minas subterráneas de carbón bituminoso* (NFPA 1995a, 1995b).

Depósitos y áreas de almacenamiento de combustibles

El almacenamiento, la manipulación y la utilización de líquidos inflamables y combustibles presentan un peligro especial de incendio en todos los sectores de la industria minera.

En muchas minas subterráneas los equipos móviles trabajan con motores diesel, y en un gran porcentaje de los incendios que se producen interviene el combustible utilizado por estas máquinas. En las minas de carbón, estos peligros de incendio se ven agravados por la presencia de carbón, polvo de carbón o metano.

El almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles es un problema especialmente importante, pues estas sustancias entran en combustión con más facilidad y propagan el fuego con más rapidez que los combustibles ordinarios. En las minas de carbón, tanto los líquidos inflamables como los combustibles se suelen almacenar bajo tierra y en cantidades variables. En algunas minas, las instalaciones principales de almacenamiento de gasóleo, lubricantes, líquidos de engrase y fluidos hidráulicos se encuentran bajo tierra. La gravedad de un incendio potencial en una zona subterránea de depósito de líquidos inflamables y combustibles exige un cuidado extremo a la hora de diseñar las

áreas de almacenamiento, además de la implantación y estricta observancia de procedimientos operativos de seguridad.

Todos los aspectos relativos a la utilización de líquidos inflamables y combustibles, incluido su transporte, almacenamiento, repostaje y utilización final en los equipos, constituyen un reto importante en materia de protección contra incendios. Los peligros y métodos de protección para los líquidos inflamables y combustibles en las minas subterráneas se recogen en esta *Enciclopedia* y en la normativa NFPA (p. ej., NFPA 1995a, 1995b, 1996b).

Prevención de incendios

La seguridad frente a incendios y explosiones en las minas subterráneas se basa en el principio general de prevención. Normalmente, esto requiere la aplicación de técnicas de seguridad de sentido común, como la prohibición de fumar, y la implantación de medidas intrínsecas de protección contra incendios a fin de evitar su propagación, como la instalación de extintores portátiles o sistemas de detección precoz de incendios.

Las técnicas de prevención de incendios y explosiones en la minería están basadas en la limitación de las fuentes de ignición, la limitación de las fuentes de combustible y la limitación de los contactos entre el combustible y la fuente de ignición.

La *limitación de las fuentes de ignición* tal vez sea la forma más elemental de prevenir incendios y explosiones. Las fuentes de ignición que no resulten esenciales para el proceso minero deberían eliminarse. Así, debería estar totalmente prohibido fumar o hacer fuego, especialmente en las minas subterráneas de carbón. Cualquier equipo automático o mecánico que pueda sufrir un aumento indeseado de calor, como las cintas transportadoras, debería disponer de conmutadores de goteo y de secuencia y disruptores térmicos en los motores eléctricos. Los explosivos constituyen un peligro evidente, pero también pueden actuar como fuentes de ignición del polvo en suspensión de gases peligrosos y sólo deberían utilizarse observando estrictamente la normativa especial sobre voladuras.

La eliminación de las fuentes eléctricas de ignición es una medida preventiva esencial contra explosiones. Cualquier equipo eléctrico que vaya a funcionar en lugares donde pueda existir metano, polvo de azufre o cualquier otro peligro de incendio debería estar diseñado, construido, comprobado e instalado de forma que su funcionamiento no pueda provocar incendios o explosiones en la mina. En las zonas de peligro se deberían usar cerramientos a prueba de explosiones, por ejemplo, para fusibles, cajetines e interruptores de circuitos. La utilización de equipos eléctricos intrínsecamente seguros se describe con más detalle en esta *Enciclopedia* y en documentos como NFPA 70, *Código eléctrico nacional* (NFPA 1996c).

La *limitación de las fuentes de combustible* empieza por un buen mantenimiento interno para evitar una acumulación peligrosa de basuras, trapos con aceite, polvo de carbón y demás materiales combustibles.

Siempre que sea posible, ciertas sustancias combustibles como pueden ser los fluidos hidráulicos, las bandas transportadoras, las mangueras hidráulicas y las conducciones de ventilación se sustituirán por otras más inocuas (Bureau of Mines 1978). La combustión de determinados materiales que desprenden productos altamente tóxicos se produce a menudo a partir de la combustión de otros considerados como menos peligrosos. Por ejemplo, muchos países han prohibido recientemente la espuma de poliuretano, que hasta hace poco se utilizaba mucho en las explotaciones subterráneas para sellar las instalaciones de ventilación.

Las explosiones en las minas subterráneas de carbón se deben, por lo general, a combustibles como el polvo de carbón

y el metano. También puede aparecer metano en minas no carboníferas, y normalmente se combate rebajándolo con aire de ventilación y aspirándolo de la mina (Timmons, Vinson y Kissell 1979). En cuanto al polvo de carbón, en los procesos de minería se hace todo lo posible por reducir al mínimo la producción de polvo, pero resulta casi imposible evitar cantidades tan pequeñas como las que bastan para provocar una explosión de polvo de carbón. Una capa de polvo sobre el suelo de apenas 0,012 mm de grosor es capaz de provocar una explosión si se halla en suspensión en el aire. Por consiguiente, para prevenir las explosiones de polvo de carbón, hay que pulverizar la roca con alguna sustancia inerte, como la caliza, la dolomita o el yeso.

Con la *limitación del contacto entre el combustible y la fuente de ignición* se trata de evitar la proximidad entre dichas fuentes y el combustible. Por ejemplo, si no es posible efectuar las operaciones de soldadura y corte en recintos a prueba de incendios, es conveniente humedecer bien la zona y cubrir los combustibles próximos con materiales ignífugos o cambiar su ubicación. Los extintores deberán estar fácilmente accesibles y habrá que vigilar los posibles fuegos latentes durante el tiempo que sea preciso.

Las zonas con gran densidad de materiales combustibles, como talleres y almacenes de vigas, explosivos o líquidos inflamables y combustibles, deberán diseñarse intentando minimizar las posibles fuentes de ignición. En los equipos móviles deberán reubicarse las conducciones de fluido hidráulico, combustible y lubricantes lejos de cualquier superficie caliente, equipo eléctrico o fuente de ignición. Se deberán instalar protectores contra salpicaduras para evitar que las salpicaduras de líquido combustible procedentes de conducciones defectuosas puedan alcanzar posibles fuentes de ignición.

Los requisitos de prevención de incendios y de explosiones en la minería están perfectamente descritos en los documentos NFPA (p. ej., NFPA 1992a, 1995a, 1995b).

Detección de incendios y sistemas de alarma

El tiempo transcurrido entre el comienzo de un incendio y su detección es crítico, ya que puede aumentar rápidamente en magnitud e intensidad. La forma más rápida y fiable de detectar un fuego es mediante sistemas de detección y de alarma que utilicen sensores de calor, llamas, humos y gases (Griffin 1979).

La detección de gases o humos es el planteamiento más económico de protección contra incendios en áreas extensas o en toda la mina (Morrow y Litton 1992). Los sistemas de detección térmica de incendios se instalan normalmente en equipos sin operador, como las cintas transportadoras. En zonas de mayor peligro, como almacenes de líquidos inflamables y combustibles, zonas de repostaje o talleres, es aconsejable instalar mecanismos de detección de incendios con mayor capacidad de reacción. En esas zonas a menudo se utilizan detectores ópticos de llamas capaces de percibir la radiación ultravioleta o infrarroja emitida por el fuego.

Una vez detectado un incendio, hay que alertar inmediatamente a todos los mineros. A veces se utilizan teléfonos o mensajeros, pero a menudo los mineros se encuentran lejos de los teléfonos o dispersos por la mina. En las minas de carbón, la forma más común de alertar de un incendio es cortar el suministro eléctrico y comunicarse después por teléfono y mensajeros. Esta medida no es aplicable a minas no carboníferas, en las que muy pocos equipos utilizan motor eléctrico. La notificación mediante olor fétido es un método muy común de aviso de emergencias en las minas subterráneas no carboníferas (Pomroy y Muldoon 1983). También se han utilizado de forma

satisfactoria sistemas especiales de comunicación por radiofrecuencia en explotaciones mineras de carbón y otros minerales (Bureau of Mines 1988).

La máxima preocupación en caso de incendio subterráneo debe ser la seguridad del personal dentro de la mina. Una detección y una alarma precoces permiten poner en marcha el plan de emergencia, que debe garantizar el desarrollo de las actividades necesarias, como la evacuación y la extinción del incendio. Para asegurar una ejecución fluida del plan de emergencia, los mineros deben recibir una formación exhaustiva y recordatorios periódicos de los procedimientos de emergencia. Han de realizarse simulacros de incendio con cierta periodicidad, activando incluso el sistema de alarma de la mina para reforzar el adiestramiento, así como para detectar fallos del plan de emergencia.

Más información sobre la detección de incendios y los sistemas de alarma puede encontrarse en esta *Enciclopedia* y en documentos NFPA (p. ej., NFPA 1995a, 1995b, 1996d).

Extinción de incendios

Los equipos de extinción de incendios de uso más común en las minas subterráneas son los extintores portátiles, las mangueras de agua, los sistemas de aspersores, el polvo de roca (aplicado manualmente o con una máquina especial) y los lanzadores de espuma. El tipo más usual de extintor portátil es el que emplea productos químicos secos de uso múltiple.

Los sistemas de extinción de incendios, ya sean manuales o automáticos, se utilizan cada vez más en equipos móviles, zonas de almacenamiento de líquidos combustibles, cintas transportadoras e instalaciones eléctricas (Grannes, Ackerson y Green 1990). La extinción automática de incendios es especialmente importante en equipos sin operador, automáticos o de control remoto, en los que no hay nadie para detectar el fuego, activar el sistema automático de extinción o poner en marcha el procedimiento de extinción.

La eliminación de explosiones constituye una variante de la extinción de incendios. En algunas minas de carbón europeas se utiliza a pequeña escala esta tecnología en forma de barreras pasivas o activas. Las barreras pasivas están formadas por una serie de filas de grandes recipientes llenos de agua o polvo de roca suspendidos del techo a la entrada de la mina. En caso de explosión, el frente de presión que precede la llegada del frente de llamas activa el vertido del contenido de los recipientes. La sustancia extintora vertida sofoca las llamas en el momento de atravesar la entrada protegida por el sistema de barrera. Las barreras activas disponen de un mecanismo de disparo eléctrico o neumático que es activado por el calor, las llamas o la presión de la explosión, liberando los agentes extintores almacenados en los recipientes a presión (Hertzberg 1982).

Los incendios de cierta magnitud sólo deben ser combatidos por equipos de extinción altamente adiestrados y dotados de material especial. Deberán adoptarse medidas especiales siempre que ardan grandes extensiones de carbón o madera en minas subterráneas o cuando la extinción del incendio se vea dificultada por grandes desprendimientos del techo, fallos de ventilación o acumulación de gases explosivos. Las únicas alternativas prácticas pueden ser inertizar con nitrógeno o dióxido de carbono los productos de combustión de un generador de gas inerte, inundar con agua o cerrar parte o toda la mina (Ramawatny y Katiyar 1988).

Más información acerca de la extinción de incendios puede encontrarse en esta *Enciclopedia* y en diversos documentos NFPA (p. ej., NFPA 1994b, 1994c, 1994d, 1995a, 1995b, 1996e, 1996f, 1996g).

Contención de incendios

La contención de incendios constituye un mecanismo fundamental de control en cualquier tipo de instalación industrial. La contención o limitación de un incendio en una mina subterránea puede garantizar una evacuación más segura y reducir los peligros de extinción del incendio.

En las minas de carbón subterráneas, el gasóleo y los aceites deberán almacenarse en recipientes cerrados e ignífugos y la construcción de las zonas de almacenamiento debe ser resistente al fuego. Las estaciones transformadoras, las estaciones de carga de baterías, los compresores de aire, las subestaciones, los talleres y demás instalaciones deberán estar alojados en zonas ignífugas o con estructuras a prueba de incendios. Los equipos eléctricos sin operario deberán ir montados sobre superficies no combustibles y separados del carbón o de cualquier otro combustible, o protegidos mediante un sistema de extinción de incendios.

Los materiales para construir tabiques y cierres, como maderas, telas, sierras, clavos, martillos, yeso o cemento y polvo de roca deben estar fácilmente accesibles en todas las zonas de trabajo. En las minas de carbón subterráneas, los aceites, las grasas y los combustibles diesel deberán almacenarse en recipientes herméticamente cerrados y en zonas ignífugas a una distancia de seguridad de los depósitos de explosivos, las instalaciones eléctricas y las estaciones de pozos. En determinadas áreas son necesarias barreras de control de ventilación y puertas cortafuegos para evitar la propagación de las llamas, el humo o los gases tóxicos (Ng y Lazzara 1990).

Almacenamiento de reactivos

Ciertas operaciones del tratamiento a que se somete el mineral extraído de la mina pueden provocar situaciones de peligro, como explosiones de polvo e incendios en operaciones de transporte.

El calor generado por la fricción entre la cinta transportadora y los rodillos motrices o de tensión puede constituir un problema; para atajarlo, se utilizarán conmutadores de goteo y de secuencia, que también pueden emplearse satisfactoriamente junto con los disyuntores térmicos en los motores eléctricos.

El peligro de explosión puede prevenirse eliminando las fuentes eléctricas de ignición. Los equipos eléctricos que funcionan en entornos en que puede existir metano, polvo de azufre o cualquier otra sustancia peligrosa se deben diseñar, construir, comprobar e instalar de forma que su funcionamiento no ocasione incendios ni explosiones.

Las reacciones de oxidación exotérmicas pueden producirse tanto en el mineral de carbón como en el de sulfuro metálico (Smith y Thompson 1991). Si no se disipa el calor generado en tales reacciones, aumentará la temperatura del estrato rocoso o del montón de mineral. Cuando la temperatura alcance un valor suficientemente elevado, puede producirse la combustión rápida del carbón, de los minerales sulfurados y de otras sustancias combustibles (Ninteman 1978).

Aunque los incendios por ignición espontánea se producen con una frecuencia relativamente baja, suelen causar daños considerables a la explotación y además son difíciles de extinguir.

El procesamiento del carbón presenta problemas especiales, pues por su naturaleza constituye una fuente de combustible. Más información sobre la protección contra incendios y explosiones en relación con una manipulación segura del carbón puede encontrarse en esta *Enciclopedia* y en diversos documentos NFPA (p. ej., NFPA 1992b, 1994e, 1996h).

DETECCION DE GASES

Paul MacKenzie-Wood

Todo el personal que trabaje en explotaciones mineras subterráneas debe tener conocimiento de las características de los gases de la mina y ser consciente de los peligros que pueden causar. De igual forma, es necesario que tenga un conocimiento básico de los instrumentos y sistemas para la detección de gases. Los encargados de la utilización de dichos instrumentos han de conocer en detalle sus limitaciones y los tipos de gases para los que están indicados.

El ser humano es capaz de detectar, incluso sin instrumento alguno, la aparición progresiva de los fenómenos químicos y físicos asociados a la combustión espontánea. El calor eleva la temperatura del aire de ventilación y lo satura de humedad superficial e integral por efecto del calentamiento. Cuando este aire entra en contacto con otro más frío en el ramal de ventilación, se produce una condensación que da lugar a una neblina y a la aparición de gotas en las superficies de las conducciones de retorno. El síntoma es la presencia de un característico olor a aceite o a petróleo, seguido a veces de humo y, finalmente, de llamas visibles.

El monóxido de carbono (CO), que es un gas inodoro, aparece en concentraciones medibles alrededor de 50-60°C antes de que se manifieste el característico olor de la combustión espontánea. Por consiguiente, la mayoría de los sistemas de detección de incendios se basan en el reconocimiento de este aumento de la concentración del monóxido de carbono por encima del nivel normal en una zona concreta de la mina.

A veces, un foco de calor es detectado por una persona capaz de percibir un ligero olor durante un breve instante. Otras, es necesario repetir la inspección exhaustiva de la zona varias veces antes de detectar un aumento notable y medible de la concentración de monóxido de carbono. Por consiguiente, el personal de la mina nunca debe descuidar la vigilancia y ha de poner en marcha el proceso de intervención preestablecido tan pronto como sospeche o detecte y notifique la presencia de cualquiera de los indicadores. Afortunadamente, gracias al notable avance de la tecnología de detección y control de incendios registrado desde el decenio de 1970 (válvulas detectoras, detectores electrónicos de bolsillo, sistemas informáticos fijos, etc.), ya no hay que depender exclusivamente de los sentidos humanos.

Instrumentos portátiles para la detección de gases

El detector de gases está diseñado para detectar y controlar la presencia de un amplio campo de tipos y concentraciones de gas resultantes de incendios, explosiones o cualquier ambiente deficitario de oxígeno, así como para alertar de forma inmediata sobre la aparición de una combustión espontánea. Entre los gases para los que utilizan estos detectores se encuentran: el CO, el dióxido de carbono (CO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y el dióxido de azufre (SO₂). Existen varios tipos de instrumentos, y la elección de cuál se ha de utilizar en una situación concreta dependerá de la respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Por qué se precisa detectar un gas o gases concretos?
- ¿Cuáles son las propiedades de dichos gases?
- ¿Dónde y en qué circunstancias se producen?
- ¿Qué instrumento o mecanismo de detección de gases resulta más adecuado para tales circunstancias?

- ¿Cómo funciona dicho instrumento?
- ¿Cuáles son sus limitaciones?
- ¿Cómo deben interpretarse los resultados obtenidos?

Los trabajadores deben estar adiestrados en la utilización correcta de los detectores portátiles de gas, que deberán conservarse siguiendo las indicaciones del fabricante.

Equipos universales de detección

El equipo de detección está compuesto por una bomba de tipo pistón o fuelle accionada por un muelle y un juego de tubos indicadores de cristal que contienen las sustancias químicas específicas para cada gas. La bomba tiene una capacidad de 100 cc y puede accionarse con una sola mano, de modo que pase una muestra de ese volumen a través del tubo indicador antes de pasar al fuelle. El indicador de alarma en la escala graduada corresponde al nivel mínimo de decoloración general y no al punto más profundo de penetración del color.

El aparato es fácil de manejar y no necesita calibrado. Sin embargo, hay que adoptar ciertas precauciones:

- los tubos indicadores (que deben estar fechados) suelen tener una vida de almacenamiento de dos años;
- un tubo indicador puede reutilizarse unas diez veces mientras no sufra ninguna decoloración;
- la precisión general de cada medida suele situarse en torno a $\pm 20\%$;
- los tubos para hidrógeno no pueden utilizarse en instalaciones subterráneas por el intenso calor generado;
- hay que utilizar un "tubo previo" relleno de carbón vegetal activado cuando se observen niveles bajos de monóxido de carbono en presencia de gases de escape diesel o de hidrocarburos superiores que pueden existir después de una explosión;
- los gases de escape deben pasar por un sistema de refrigeración para enfriarlos por debajo de 40°C antes de pasar por el tubo indicador;
- los tubos para oxígeno y metano no se deben utilizar en instalaciones subterráneas por su falta de precisión.

Metanómetros de tipo catalítico

El metanómetro de tipo catalítico se utiliza en explotaciones mineras subterráneas para medir la concentración de metano en el aire. Este aparato consta de un sensor basado en el principio de una red de cuatro arrollamientos espirales equilibrados en cuanto a resistencia, generalmente filamentos catalíticos, dispuestos de una forma simétrica conocida con el nombre de puente de Wheatstone. Normalmente, dos de los filamentos son activos y los otros dos pasivos. Los filamentos activos suelen ir recubiertos con un catalizador de óxido de paladio para provocar la oxidación del gas inflamable a temperaturas más bajas.

El metano flotante en la atmósfera llega a la cámara de muestreo bien por difusión a través de un disco sinterizado o bien siendo arrastrado por un aspirador o una bomba interna. Al pulsar el botón de funcionamiento del metanómetro se cierra el circuito y la corriente que fluye por el puente de Wheatstone produce la oxidación del metano en los filamentos catalíticos (activos) de la cámara de muestreo. El calor de esta reacción eleva la temperatura de los filamentos catalíticos, aumentando su resistencia eléctrica y provocando el desequilibrio del puente. La corriente eléctrica que circula es proporcional a la resistencia del elemento y, por consiguiente, a la cantidad de metano existente. El resultado se muestra en un indicador de salida graduado como porcentaje de metano presente. Los elementos de referencia del circuito del puente de Wheatstone sirven para

compensar las variaciones de las condiciones del entorno, como la temperatura ambiente y la presión barométrica.

Este instrumento presenta una serie de limitaciones importantes:

- para que el aparato funcione, tiene que haber presencia tanto de metano como de oxígeno. Si el nivel de oxígeno en la cámara de muestreo es inferior al 10% , no se oxidará la totalidad del metano que llegue al detector y se obtendrá una lectura anormalmente baja. Por esta razón, no debe utilizarse para medir niveles de metano después de una explosión o en zonas estancas en las que la concentración de oxígeno sea reducida. Si la cámara contiene metano puro no se producirá ningún tipo de lectura. De forma similar, hay que pulsar el botón de funcionamiento antes de introducir el instrumento en una previsible capa de metano para que penetre en la cámara aire rico en oxígeno. La presencia de dicha capa se verá confirmada por una lectura superior a la de la escala completa, seguida de un retorno a los límites de ésta a medida que se consuma el oxígeno;
- el metanómetro catalítico responde a gases inflamables distintos del metano, como el hidrógeno o el monóxido de carbono. Por consiguiente, pueden producirse lecturas ambiguas de gases existentes aún después de producirse incendios o explosiones;
- los instrumentos dotados de cabezales de difusión deberán protegerse de las corrientes fuertes de aire para evitar lecturas falsas, cubriéndolos con la mano o con cualquier otro objeto;
- los instrumentos con filamentos catalíticos pueden no responder al metano si el filamento entra en contacto con vapores de gases tóxicos en el momento de su calibrado o de su utilización (p. ej., siliconas de barnices de muebles, barnices y pinturas para suelos, ésteres de fosfato existentes en fluidos hidráulicos y carbonos fluorados empleados como impulsores en los vaporizadores de aerosol);
- los metanómetros basados en el principio del puente de Wheatstone pueden arrojar lecturas erróneas con distintos ángulos de inclinación. Esta imprecisión se puede minimizar sosteniendo el instrumento en un ángulo de 45° en el momento de su calibrado y de su uso;
- los metanómetros pueden arrojar lecturas erróneas a distintas temperaturas ambiente. Esta imprecisión puede reducirse al mínimo calibrando el instrumento en condiciones de temperatura similares a las existentes en la explotación subterránea.

Células electroquímicas

En las minas subterráneas se utilizan instrumentos con células electroquímicas para medir la concentración de oxígeno y de monóxido de carbono. Existen dos versiones: la célula de composición, que sólo responde a variaciones en la concentración de oxígeno, y la célula de presión parcial, que responde a los cambios de presión parcial del oxígeno en la atmósfera y, por tanto, del número de moléculas de oxígeno por unidad de volumen.

La célula de composición emplea una barrera de difusión capilar que frena la difusión del oxígeno a través de la célula de combustible de forma que la velocidad a la que el oxígeno puede alcanzar el electrodo depende únicamente del contenido de oxígeno de la muestra. La célula no se ve afectada por las variaciones de altitud (es decir, de presión barométrica), temperatura y humedad relativa. Sin embargo, la presencia de CO_2 en la mezcla altera la velocidad de difusión del oxígeno y provoca lecturas erróneas por exceso. Por ejemplo, la presencia de un

1 % de CO₂ llega a incrementar la lectura del oxígeno hasta en un 0,1 %. Aunque pequeño, este incremento puede resultar significativo e invalidar la lectura. Es particularmente importante tener en cuenta esta limitación siempre que el instrumento vaya a utilizarse después de una explosión o en ambientes donde se sepa que contienen CO₂.

La célula de presión parcial está basada en el mismo principio electroquímico que la célula de concentración, aunque carece de barrera de difusión y sólo responde al número de moléculas de oxígeno por unidad de volumen, dependiendo, por tanto, de la presión. Las concentraciones de CO₂ inferiores al 10 % no provocan ningún efecto a corto plazo sobre la lectura, pero a la larga, el dióxido de carbono destruye el electrolito y acorta la vida de la célula.

La fiabilidad de las lecturas de oxígeno de la célula de presión parcial se ve afectada por las siguientes circunstancias:

- *altitud y presión barométrica*: el desplazamiento desde la superficie hasta el fondo del pozo incrementa la lectura de oxígeno en un 0,1 % cada 40 m descendidos. Lo mismo vale para la inclinación, presente en las explotaciones subterráneas. Además, los 5 milibares de variación normal diaria en la presión barométrica pueden alterar la lectura de oxígeno hasta en un 0,1 %. La actividad tormentosa puede provocar una disminución de unos 30 milibares en la presión, lo que causaría una reducción del 0,4 % en la lectura de oxígeno;
- *ventilación*: la variación máxima de presión en el ventilador debería ser de unas 6-8 pulgadas de altura manométrica de agua o bien 10 milibares. Esto ocasionaría una caída de un 0,4 % en la lectura del oxígeno desde la entrada hasta el retorno del ventilador y una disminución del 0,2 % desde el frente más alejado del fondo del pozo;
- *temperatura*: la mayoría de los detectores disponen de un circuito electrónico que mide la temperatura de la célula e introduce la corrección pertinente debida al efecto de la misma sobre la medida del sensor;
- *humedad relativa*: un aumento de la humedad relativa desde la condición de sequedad hasta la saturación a 20°C ocasionaría aproximadamente una disminución de un 0,3 % en la lectura de oxígeno.

Otras células electroquímicas

Se han construido células electroquímicas capaces de medir concentraciones de CO desde 1 ppm hasta 4.000 ppm. Su funcionamiento se basa en la medida de la corriente eléctrica existente entre los cátodos sumergidos en un electrolito acidificado. El CO se oxida en el ánodo para formar CO₂ y la reacción libera electrones en proporción directa a la concentración de CO.

También existen células electroquímicas para el hidrógeno, el sulfuro de hidrógeno, el óxido nítrico, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, aunque adolecen de sensibilidad cruzada.

No existe en el mercado ninguna célula electroquímica para CO₂. Esta carencia se ha subsanado con el desarrollo de un instrumento portátil que contiene una minicélula de rayos infrarrojos sensible al dióxido de carbono en concentraciones por encima del 5 %.

Detectores de radiación infrarroja no dispersiva

Los detectores de radiación infrarroja no dispersiva son capaces de medir cualquier gas que contenga radicales químicos del tipo -CO, -CO₂ y -CH₃, los cuales absorben las frecuencias infrarrojas que son específicas de su configuración molecular. Tales sensores son caros pero proporcionan una lectura precisa para gases tales como CO, CO₂ y metano en un contexto variable de otros gases y con bajos niveles de oxígeno resultando, por consiguiente,

idóneos para controlar gases en reductos confinados. El O₂, N₂ y H₂ no absorben la radiación infrarroja por lo que no pueden detectarse con este método.

Otros sistemas portátiles con detectores basados en propiedades de conducción térmica y en el índice de refracción resultan de utilidad limitada en la minería del carbón.

Limitaciones de los instrumentos portátiles de detección de gases

La eficacia de los instrumentos portátiles de detección de gases está limitada por una serie de factores:

- Es necesario calibrarlos. Esto significa normalmente una puesta a cero y una comprobación del voltaje diarios, una comprobación semanal de la escala y una prueba de calibrado cada 6 meses a cargo de un organismo externo autorizado;
- Los sensores tienen una vida limitada. Si no vienen fechados por el fabricante, es aconsejable registrar la fecha de adquisición;
- Los sensores pueden llegar a contaminarse;
- Los sensores pueden verse afectados por sensibilidades cruzadas;
- Una exposición excesiva puede saturar el sensor y provocar una recuperación más lenta;
- La inclinación puede afectar a la lectura;
- Las baterías deben cargarse y descargarse periódicamente.

Sistemas centralizados de control

Con las inspecciones, la ventilación y los análisis con instrumentos portátiles se consigue a menudo detectar y localizar pequeños focos de calor que provocan cantidades reducidas de CO antes de que éste se propague por el sistema de ventilación o de que su nivel supere los límites permitidos. Sin embargo, estos controles no resultan adecuados en aquellos lugares en que exista un riesgo notable de combustión, cuando los niveles de metano en las galerías de retorno sobrepasen el 1 % o cuando se sospeche la posibilidad de ciertos peligros. En tales circunstancias, es necesario un control continuo en puntos estratégicos. Hay varios tipos de sistemas centralizados de supervisión continua.

Sistemas de grupos de tubos

El sistema de grupos de tubos, desarrollado en Alemania en el decenio de 1960 para detectar y controlar la evolución de combustiones espontáneas, consta de una serie de hasta 20 tubos de plástico fabricados en nylon o en polietileno con un diámetro de 1/4 o 3/8 de pulgada que se extienden desde un banco de analizadores en la superficie hasta puntos seleccionados en las galerías subterráneas. Los tubos van equipados con filtros, drenajes y parallas; los analizadores suelen ser de tipo infrarrojo para el CO, CO₂ y metano, y paramagnéticos para el oxígeno. Una bomba de barrido impulsa el paso simultáneo de una muestra a través de cada tubo y un temporizador secuencial va dirigiendo sucesivamente la muestra de cada tubo a través de los analizadores. El registro de datos recoge la concentración de cada gas en cada una de las ubicaciones y activa una alarma automática en cuanto se sobrepasan ciertos niveles fijados.

Este sistema presenta las siguientes ventajas:

- No se precisa instrumentación antideflagración;
- El mantenimiento es relativamente sencillo;
- No necesita alimentación eléctrica en áreas subterráneas;
- Cubre una amplia gama de gases;

- Los analizadores por infrarrojos suelen ser bastante estables y fiables; conservan sus características específicas en entornos cambiantes de gases procedentes de combustión y en atmósferas pobres en oxígeno (una elevada concentración de metano y/o de dióxido de carbono puede presentar sensibilidad cruzada a la lectura de monóxido de carbono en los bajos valores de ppm);
- Los instrumentos pueden calibrarse a la intemperie, aunque las muestras para calibrado deberían enviarse por los tubos para comprobar la integridad del sistema de recogida así como el sistema de identificación de las ubicaciones de donde proceden las diferentes muestras.

El sistema presenta asimismo algunos inconvenientes:

- Los resultados no se obtienen en tiempo real;
- Las fugas no se detectan de forma inmediata;
- Puede producirse condensación en los tubos;
- Los defectos del sistema no siempre se manifiestan de manera inmediata y su identificación puede entrañar ciertas dificultades;
- Los tubos pueden sufrir daños a causa de voladuras, incendios o explosiones.

Sistema telemétrico (electrónico)

El sistema telemétrico automático de supervisión de gases consta de un módulo de control en la superficie y una serie de cabezas sensoras de seguridad intrínseca colocadas en las áreas subterráneas y conectadas por línea telefónica o cables de fibra óptica. Hay sensores para metano, CO y velocidad del aire. El sensor para CO es similar al sensor electroquímico utilizado en los instrumentos portátiles y adolece de las mismas limitaciones. El sensor para metano se basa en la combustión catalítica del metano sobre los elementos activos de un circuito de un puente de Wheatstone que pueden estar contaminados por compuestos de azufre, ésteres fosfáticos o compuestos de silicio y que no funcionará a bajas concentraciones de oxígeno.

Entre las ventajas específicas de este sistema se encuentran:

- Los resultados se obtienen en tiempo real (es decir, existe una indicación inmediata de la existencia de fuego o de la aparición de metano);
- Permite trabajar con distancias apreciables entre las cabezas sensoras y la unidad de control sin afectar al comportamiento del sistema;
- Los fallos de los sensores se detectan inmediatamente.

Este sistema también presenta algunos inconvenientes:

- Precisa un alto nivel de mantenimiento;
- La gama del sensor para CO es limitada (0,4 %);
- La variedad de sensores es limitada; no existen para CO₂ ni para hidrógeno;
- El sensor para metano puede sufrir contaminación;
- Es necesario un calibrado *in situ*;
- La sensibilidad cruzada puede constituir un problema;
- Puede producirse una pérdida de potencia (p. ej., 1,25 % para el metano);
- La vida de los sensores está limitada entre 1 y 2 años;
- El sistema no resulta adecuado para ambientes pobres en oxígeno (p. ej., zonas estancas).

Cromatógrafo de gases

El cromatógrafo de gases es un equipo muy complejo capaz de analizar muestras con un elevado grado de precisión y que, hasta ahora, sólo podía ser utilizado por químicos o técnicos

especialmente cualificados y adiestrados. Las muestras de gas procedentes de un tubo o de un grupo de tubos se inyectan automáticamente en el cromatógrafo de gases o se introducen manualmente a partir de muestras embolsadas extraídas de la mina. Una columna con relleno especial sirve para separar los distintos gases y, con el correspondiente detector, normalmente de conductividad térmica o de ionización de llama, se mide cada gas a medida que sale de la columna. El proceso de separación proporciona un elevado grado de especificidad.

El cromatógrafo de gases presenta ventajas concretas:

- No tiene lugar la sensibilidad cruzada con otros gases;
- Es capaz de medir hidrógeno;
- Es capaz de medir el etileno y otros hidrocarburos superiores;
- Es capaz de medir con precisión concentraciones desde muy bajas hasta muy altas de la mayoría de los gases presentes o que puedan generarse en el interior a causa de un foco de calor o de un fuego;
- Está generalmente aceptado que los sistemas modernos contra incendios y focos de calor en las minas de carbón deben basarse en el análisis de gases procedentes de ubicaciones estratégicas de la mina. La obtención de resultados precisos, fiables y exhaustivos requiere un cromatógrafo de gases, y su interpretación, por personal cualificado, experto y perfectamente adiestrado.

Entre los inconvenientes cabe citar:

- Los análisis son relativamente lentos;
- Exigen un elevado grado de mantenimiento;
- El equipamiento y los controles son complejos;
- Se precisa una atención periódica esmerada;
- El calibrado debe realizarse con cierta frecuencia;
- Una elevada concentración de metano interfiere con la medida de niveles bajos de company

Elección del sistema

Los sistemas de grupos de tubos son los más indicados para controlar zonas en que no se esperan variaciones rápidas de la concentración del gas o, como en el caso de las zonas mal ventiladas, con un bajo nivel de oxígeno.

Los sistemas telemétricos resultan adecuados en lugares como las instalaciones de cintas transportadoras o el frente, donde pueden producirse cambios rápidos en la concentración del gas significativos.

La cromatografía de gases no sustituye los sistemas actuales de control, sino que viene a completar la amplitud, precisión y fiabilidad de los análisis. Este aspecto es especialmente importante cuando se trata de evaluar un riesgo de explosión o cuando un foco de calor está alcanzando una fase avanzada.

Consideraciones acerca del muestreo

- La ubicación de los puntos de muestreo en lugares estratégicos es de la máxima importancia. La información procedente de un punto aislado de muestreo alejado de la fuente sólo es indicativa y, sin una confirmación de otras ubicaciones, puede conducir a una valoración excesiva o deficiente de la gravedad de una situación. En consecuencia, los puntos de muestreo para detectar la aparición de una combustión espontánea deben ubicarse allí donde exista mayor probabilidad de que surjan focos de calor. Apenas debe existir disminución de los flujos entre el foco de calor y los detectores. Deberá tenerse en cuenta la posibilidad de formación de capas de metano y de gases de combustión calientes que pueden incrementar la inclinación en zonas mal ventiladas.

Preferiblemente, los puntos de muestreo deberán ubicarse en los entrantes de los paneles, detrás de los tabiques de ventilación y en los diques de cierre, así como en la corriente principal del circuito de ventilación. Deberán tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- El lugar de muestreo ha de situarse como mínimo a 5 m de una puerta de cierre, ya que éstos presentan un efecto de aspiración al aumentar la presión atmosférica;
- Las muestras deben extraerse de las perforaciones sólo cuando están expulsando el aire y pueda garantizarse que no hay fugas;
- Las muestras deben tomarse a una distancia superior a los 50 m corriente abajo de un fuego para garantizar la mezcla (Mitchell y Burns 1979);
- Las muestras deben tomarse en la parte ascendente del gradiente de un fuego cerca del techo, habida cuenta del ascenso de los gases calientes;
- Las muestras deben tomarse frente a una puerta de ventilación para evitar las fugas;
- Todos los puntos de muestreo deberán estar claramente indicados en los mapas esquemáticos del sistema de ventilación de la mina. La toma de muestras de gases para su análisis en cualquier otra ubicación de áreas subterráneas o de perforaciones de superficie es dificultosa y está sujeta a errores. La muestra contenida en la bolsa o en el envase debe representar fielmente la atmósfera en el punto de muestreo.

Actualmente, en la industria se están utilizando de forma generalizada las bolsas de plástico para la toma de muestras. El plástico minimiza los escapes y puede mantener adecuadamente una muestra durante 5 días. Si hay hidrógeno presente en la bolsa, se irá degradando con una pérdida diaria de un 1,5 % de su concentración original. Una muestra dentro de la cámara de un balón de fútbol cambia de concentración en media hora. Las bolsas son fáciles de llenar y la muestra puede expulsarse al interior de un instrumento de análisis o extraerse con una bomba.

En los tubos metálicos que se llenan a presión por medio de una bomba pueden almacenarse muestras durante largos períodos de tiempo, pero el tamaño de la muestra es limitado y es habitual que se produzcan pérdidas por fugas. El cristal es inerte a los gases, pero los recipientes de cristal son frágiles y es difícil extraer de ellos la muestra sin que se diluya.

Antes de recoger la muestra, hay que esterilizar el recipiente al menos tres veces para eliminar totalmente los restos de la muestra anterior. Cada recipiente debe llevar una etiqueta con información de interés, tal como la fecha y hora de recogida, la ubicación exacta, el nombre de la persona responsable de la recogida de la muestra, etc.

Interpretación de los datos de muestreo

La interpretación y el análisis de los resultados del muestreo de gases constituye una ciencia compleja y sólo debe ser practicada por personas con formación y experiencia específicas. Estos datos son vitales en muchas emergencias, pues proporcionan información sobre lo que está ocurriendo dentro de la mina, que son datos necesarios para planificar e implantar las acciones correctoras y preventivas oportunas. Durante un calentamiento, incendio o explosión subterráneos o inmediatamente después de ellos, deberán controlarse en tiempo real todos los parámetros ambientales posibles para que los responsables puedan evaluar con exactitud el estado de la situación y medir su evolución, a fin de poner rápidamente en marcha cualquier actuación de rescate necesaria.

Los resultados de los análisis de gases deben cumplir los siguientes criterios:

- *Precisión*: los instrumentos deben estar correctamente calibrados;
- *Fiabilidad*: hay que conocer la posibilidad de sensibilidades cruzadas;
- *Carácter global*: deben medirse todos los gases, incluidos el hidrógeno y el nitrógeno;
- *Atemporalidad*: si no existe la posibilidad de trabajar en tiempo real deberá efectuarse un análisis de tendencias;
- *Validez*: los puntos de muestreo deben situarse dentro y en torno al lugar del incidente.

Al interpretar los resultados de los análisis de gases hay que respetar las siguientes reglas:

- Deberán seleccionarse cuidadosamente algunos puntos de muestreo y reseñarse sobre plano. Para el análisis de tendencias, es más adecuado hacer ésto que tomar muestras de muchos puntos;
- Si un resultado se desvía de la tendencia, deberá confirmarse el valor repitiendo el muestreo o comprobarse el calibrado del instrumento antes de adoptar ninguna decisión. Las variaciones de las influencias externas, tales como ventilación, presión barométrica y temperatura o el funcionamiento de un motor diesel en la zona, suelen provocar desviaciones en los resultados;
- Deberá conocerse la composición o mezcla del gas en circunstancias ajenas a la minería y tenerlo en cuenta al efectuar los cálculos;
- No deberá aceptarse sin más ningún resultado de los análisis; los resultados deben ser válidos y comprobables;
- Hay que tener presente que las cifras aisladas no indican evolución; las tendencias proporcionan una imagen más exacta.

Cálculo de los resultados en aire libre

Los resultados en aire libre se obtienen eliminando en los cálculos el aire atmosférico de la muestra (Mackenzie-Wood y Strang 1990) para poder comparar adecuadamente muestras de una zona similar una vez eliminado el efecto de dilución del escape del aire.

La fórmula es como sigue:

$$\text{Resultado en aire libre} = \frac{\text{Resultado analizado}}{100 - 4,776 O_2}$$

que se obtiene de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{Aire atmosférico} &= O_2 + N_2 = \\ &= O_2 + \frac{79,1 O_2}{20,9} = \\ &= 4,776 O_2 \end{aligned}$$

Los resultados en aire libre son útiles cuando se necesita determinar la tendencia y ha existido riesgo de dilución del aire entre el punto de muestreo y la fuente, se ha producido un escape de aire en las líneas de muestreo o ha penetrado aire en las muestras de las bolsas. Por ejemplo, si se trata de hallar la tendencia de la concentración de monóxido de carbono en un incendio, una dilución del aire debida a un aumento de la ventilación podría ser interpretada erróneamente como una disminución del monóxido de carbono de la fuente. El cálculo de la tendencia de las concentraciones en aire libre proporcionaría un resultado correcto.

Un cálculo similar se necesita cuando en la zona de muestreo se esté generando metano: el aumento de la concentración de metano rebajaría la concentración de cualquier otro gas que estuviera presente. Por consiguiente, un nivel creciente de óxido de carbono puede presentarse como decreciente.

Los resultados en aire libre para el metano se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Resultados libre de metano} = \frac{\text{Resultado analizado}}{100 - CH_4\%}$$

Combustión espontánea

La combustión espontánea es un proceso por el cual una sustancia arde debido a su calor interno, que surge de forma espontánea a causa de ciertas reacciones que liberan calor a mayor velocidad de la que puede disiparse en la atmósfera. La combustión espontánea del carbón suele ser lenta hasta que la temperatura alcanza los 70 °C, lo que se conoce como “temperatura de transición”. Por encima de dicha temperatura, la reacción suele acelerarse. Pasados los 300 °C se liberan gases volátiles también denominados “gas de hulla” o “gas de craquin”. Estos gases (hidrógeno, metano y monóxido de carbono) entran en combustión de forma espontánea a temperaturas próximas a los 650 °C (se ha observado que la presencia de radicales libres puede dar lugar a la aparición de llamas en el carbón a unos 400 °C). En la Tabla 74.4 se ofrece el proceso de un caso típico de combustión espontánea (los resultados pueden variar según el tipo de carbón).

Monóxido de carbono

El CO se libera realmente unos 50 °C antes de que pueda percibirse el olor característico de la combustión. La mayoría de los sistemas diseñados para detectar la aparición de una combustión espontánea se basan en la detección del monóxido de carbono en concentraciones superiores a las normales en una determinada zona de la mina.

Una vez detectado un foco de calor, debe controlarse para determinar su estado (es decir, su temperatura y magnitud), el ritmo de aceleración, las emisiones tóxicas y la posibilidad de explosión de la atmósfera.

Control de focos de calor

Hay una serie de índices y parámetros que ayudan a los planificadores a determinar la extensión, la temperatura y el ritmo de progreso de un foco de calor y que generalmente están basados en las variaciones de la composición del aire que pasa por una zona en estudio. Son muchos los indicadores que se han descrito en la bibliografía publicada a lo largo de los años y la mayoría ofrecen un ámbito muy limitado de aplicación y son de escaso valor. Todos ellos son específicos de la ubicación y varían con los distintos tipos de carbón y las circunstancias concretas. Entre los más populares cabe citar: tendencias del monóxido de carbono; mezcla de monóxido de carbono (Funkemeyer y Kock 1989); coeficiente de Graham (Graham 1921); gases de traza (Chamberlain 1970); coeficiente de Morris (Morris 1988) y coeficiente de monóxido de carbono/dióxido de carbono. A partir del cerramiento de seguridad es difícil utilizar indicadores debido a la ausencia de un flujo definido de aire.

Ningún indicador proporciona un método preciso y seguro para medir el progreso de un incendio. Las decisiones han de basarse en la recogida, tabulación, comparación y análisis

de toda la información y en su interpretación a la luz de la formación y la experiencia.

Explosiones

Las explosiones constituyen el mayor peligro en la minería del carbón, ya que tienen potencial suficiente para acabar con la vida de todos los trabajadores de una galería, destruir el equipamiento y los servicios e impedir la explotación posterior de la mina, y todo ello tal vez en sólo 2 o 3 segundos.

En todo momento deberá controlarse el potencial deflagrante de la atmósfera de la mina, especialmente cuando los trabajadores están realizando tareas de rescate en una mina saturada de gases.

Como en el caso de los indicadores para evaluar un incendio, hay diferentes sistemas para calcular el potencial deflagrante de la atmósfera en una mina subterránea, entre los que se encuentran: el triángulo de Coward (Greuer 1974), el triángulo de Hughes y Raybold (Hughes y Raybold 1960), el diagrama de Elicott (Elicott 1981) y el coeficiente de Trickett (Jones y Trickett 1955).

Debido a la complejidad y variabilidad de las condiciones y circunstancias concretas, no existe una fórmula única a la que atenerse como garantía de que no se vaya a producir una explosión en un determinado momento y en una mina concreta. Hay que confiar en un nivel elevado e ininterrumpido de supervisión, un alto índice de sospecha y una puesta en marcha decidida de las acciones pertinentes en cuanto se aprecie el más mínimo indicio de posibilidad de explosión. Una interrupción temporal de la producción es un precio relativamente pequeño a cambio de evitar una deflagración.

Conclusión

En este artículo se ha ofrecido un resumen de la detección de los gases que pueden aparecer en incendios y deflagraciones en las minas subterráneas.

Otros aspectos de la salud y la seguridad relativos a la presencia de gases en las minas (p. ej., enfermedades producidas por el polvo, asfixia, efectos tóxicos, etc.) son objeto de estudio en otros artículos de este mismo capítulo y en otros apartados de esta *Enciclopedia*.

Tabla 74.4 • Calentamiento del carbón — jerarquía de temperaturas.

Temperatura a la cual el carbón absorbe O ₂ para formar un compuesto y producir calor	
30 °C	El compuesto se descompone produciendo CO/CO ₂
45 °C	Oxidación real del carbón para formar CO y CO ₂
70 °C	Temperatura de transición, aceleración del calentamiento
110 °C	Humedad, liberación de H ₂ y del olor característico
150 °C	Desorción de CH ₄ , liberación de hidrocarburos no saturados
300 °C	Liberación de gases de cracking (H ₂ , CO, CH ₄ , etc.)
400 °C	Llama abierta

Fuente: Chamberlain y cols. 1970.

● PREPARACION DE EMERGENCIAS

Gary A. Gibson

Las emergencias en las minas se producen con frecuencia debido a la ausencia de sistemas destinados a limitar, controlar o prevenir situaciones que, gestionadas de forma ineficaz, desembocan en catástrofes, o bien a fallos en los sistemas existentes. Así pues, una emergencia podría definirse como un suceso imprevisto que afecta a la seguridad y la salud de los individuos o a la continuidad de la explotación y que exige una respuesta eficaz y puntual para afrontar, controlar o aliviar la situación.

Todas las formas de explotación minera entrañan peligros y riesgos concretos capaces de provocar una situación de emergencia. Entre los riesgos de la minería subterránea del carbón se encuentran la liberación de metano, la generación de polvo de carbón, los sistemas de minería de gran potencia y la tendencia del carbón a la combustión espontánea. En las minas subterráneas dedicadas a la explotación de minerales metálicos pueden producirse emergencias por fallas de los estratos (estallidos debidos a la presión, desprendimientos de rocas, fallos del techo o de los pilares), detonaciones imprevistas de explosivos y presencia de polvo de mineral de azufre. Las explotaciones mineras a cielo abierto presentan riesgos relacionados con los equipos móviles de gran tamaño y alta velocidad, las detonaciones imprevistas de explosivos y la estabilidad de las rampas. En el procesamiento de los minerales, hay que considerar la exposición a sustancias químicas peligrosas, los vertidos o salpicaduras de éstas y los fallos de los embalses de relaves.

Con el tiempo, se han ido desarrollando buenas prácticas de minería y de explotación que incorporan medidas encaminadas a controlar o reducir estos riesgos. Sin embargo, en todo el mundo siguen produciéndose catástrofes mineras, aun cuando en algunos países se hayan adoptado técnicas concretas de gestión de riesgos, como estrategias preventivas para mejorar la seguridad en la mina y reducir la probabilidad y las consecuencias de las emergencias.

Las investigaciones y el análisis de los accidentes siguen poniendo de manifiesto la existencia de fallos a la hora de aplicar las enseñanzas del pasado y fallos en la confección de barreras y medidas de control eficaces para combatir determinados peligros y riesgos. Estos fallos a menudo se ven agravados por la ausencia de medidas adecuadas para atajar, controlar y gestionar la situación de emergencia.

En el presente artículo se expone un sistema de preparación de emergencias que puede utilizarse como referencia tanto para controlar y reducir los peligros y riesgos en la minería como para desarrollar medidas eficaces que garanticen el control de las emergencias y la continuidad de la explotación minera.

Sistema de gestión de prevención de emergencias

El sistema propuesto integra diversos sistemas de prevención y gestión de las emergencias, y comprende los puntos siguientes:

- propósito y compromiso por parte de la organización (política corporativa, compromiso y dirección por parte del equipo de gestión);
- gestión del riesgo (identificación, valoración y control de peligros y riesgos);
- definición de medidas para gestionar cualquier imprevisto, incidencia o emergencia;
- definición de la organización de emergencias (estrategias, estructura, personal, técnicas, sistemas y procedimientos);
- dotación de instalaciones, equipos, suministros y materiales;

- formación del personal en materia de identificación, contención y notificación de incidentes y papel del mismo en las actividades de movilización y despliegue, y durante la fase posterior al incidente;
- evaluación y perfeccionamiento del sistema global mediante la aplicación de procedimientos regulares de revisión y prueba;
- revisión periódica de riesgos y funcionalidades;
- crítica y evaluación de la capacidad de respuesta en caso de emergencia, junto a la necesaria mejora del sistema.

La integración de la preparación de emergencias en el esquema del sistema de gestión de calidad ISO 9000 aporta un enfoque estructurado para afrontar y controlar las situaciones de emergencia de forma precisa, eficaz y segura.

Propósito y compromiso por parte de la organización

Por lo general, sólo se considera necesario estar preparado ante una emergencia si alguna vez se ha detectado un peligro potencial o existe una amenaza directa, altamente probable y con posibilidad de ocurrir a corto plazo. Sin embargo, la naturaleza de las emergencias es tal que, por lo general, no existe posibilidad de reconocimiento previo o se las considera inofensivas. La ausencia de sistemas adecuados o los fallos en los existentes se traducen en accidentes o situaciones de emergencia.

El compromiso y la inversión en una preparación de emergencias eficaz aporta a la organización la facultad, la experiencia y los sistemas para crear un entorno seguro de trabajo, cumplir las obligaciones éticas y legales, y mejorar las expectativas de continuidad del negocio en caso de emergencia. Los incendios y explosiones en la minería, aun cuando no se trate de incidentes fatales, provocan unas pérdidas significativas por interrupción de la explotación dado el tipo y la naturaleza de las medidas de control utilizadas y el alcance de los daños, que puede llegar incluso a la destrucción de la mina. Las labores de investigación también tienen una repercusión notable. La ausencia de medidas para gestionar y controlar adecuadamente cualquier incidente puede incrementar el daño económico total.

El desarrollo y la puesta en marcha de un sistema eficaz de preparación de emergencias exige la dirección, el compromiso y el apoyo del equipo gestor. Por consiguiente, resulta necesario:

- asumir y garantizar el liderazgo, el compromiso y el apoyo ininterrumpidos por parte del equipo gestor;
- establecer unos objetivos y una finalidad a largo plazo;
- garantizar el apoyo económico;
- garantizar la disponibilidad de las personas, así como su acceso y participación en el proceso de formación;
- proporcionar los recursos organizativos apropiados para desarrollar, implantar y mantener el sistema.

El liderazgo y el compromiso necesarios pueden demostrarse mediante el nombramiento de un profesional experto, capaz y generalmente respetado como Coordinador de preparación de emergencias, con autoridad para promover la participación y la cooperación a todos los niveles y en todas las unidades de la organización. La creación de un Comité de planificación de la preparación de emergencias, sometido a la autoridad del Coordinador, facilitará la dotación de los recursos necesarios para planificar, organizar y poner en marcha un programa integrado y eficaz contra las emergencias en toda la organización.

Gestión del riesgo

El proceso de gestión del riesgo consiste en identificar y analizar los distintos tipos de riesgos que tiene que afrontar la organización para determinar su probabilidad y las posibles consecuencias si llegan a producirse. Se evalúan los riesgos tomando como base determinados criterios y se concluye si resultan aceptables o, en caso contrario, la forma de tratamiento que debe aplicarse para reducirlos (p. ej., reduciendo la probabilidad de que se produzcan, disminuyendo las consecuencias, transfiriendo la totalidad o parte de los riesgos o evitándolos). Después, será necesario desarrollar, implantar y gestionar planes concretos para controlar los riesgos identificados.

Tabla 74.5 • Elementos y subelementos críticos de preparación de emergencias.

Incendios	<ul style="list-style-type: none"> • Polvo • Productos químicos • Agentes explosivos • Petróleo • Nitrógeno • Explosión de gasoducto 	<ul style="list-style-type: none"> • Calor/frío • Ruidos • Vibraciones • Radiaciones • Sustancias químicas • Sustancias biológicas
<ul style="list-style-type: none"> • Subterráneos • En plantas y superficiales • Forestales • Comunidad • Vehículos 		
Derrames y fugas de productos químicos	Disturbios civiles <ul style="list-style-type: none"> • Huelgas • Manifestaciones • Amenazas de bomba • Secuestros/extorsiones • Sabotajes • Otras amenazas 	Medio ambiente <ul style="list-style-type: none"> • Contaminación atmosférica • Contaminación del agua • Contaminación del suelo • Residuos (problema de eliminación)
<ul style="list-style-type: none"> • Derrames de petróleo • Ruptura de conducción de gas • Contención del derrame • Remotos o locales • Capacidad de almacenamiento 	Fallo de suministro <ul style="list-style-type: none"> • Fallo eléctrico • Fallo de suministro de gas • Fallo de suministro de agua • Fallo de los sistemas de comunicación 	Hundimientos <ul style="list-style-type: none"> • Subterráneos • Superficiales • Fallo/deslizamiento de muros • Fallo de excavación superficial • Estructuras (edificios)
Daños	Inundación de agua <ul style="list-style-type: none"> • Barreno de exploración • Tabiques • Fallo de pilares • Perforación involuntaria de construcciones antiguas • Relaves • Ruptura de dique • Grieta en el suelo • Fallo en la conducción de agua 	Transporte <ul style="list-style-type: none"> • Accidente de automóvil • Accidente de tren • Accidente de barco/navegación • Accidente de avión • Materiales peligrosos en accidente de transporte
<ul style="list-style-type: none"> • Locales • Múltiples • Fatales • Críticos 		
Desastres naturales	Desescombro <ul style="list-style-type: none"> • Sistema/recursos • No planificado 	
<ul style="list-style-type: none"> • Inundaciones • Ciclones • Terremotos • Tormentas fuertes • Rupturas de presas • Avalanchas de lodo o tierra 		
Evacuación de la comunidad	Exposiciones	
<ul style="list-style-type: none"> • Planificada • No planificada 		
Explosiones/implosiones		

Fuente: Mines Accident Prevention Association, Ontario (Canadá) (sin fecha).

Este enfoque puede aplicarse asimismo para desarrollar planes de emergencia que contemplen la aplicación de controles eficaces llegado el caso. La identificación y análisis de los riesgos permite predecir situaciones análogas con un alto grado de precisión. Pueden determinarse así las medidas de control necesarias para afrontar cada una de las situaciones de emergencia detectadas, lo que constituye la base de una estrategia de preparación de emergencias.

Las situaciones más probables contendrán algunos o todos los factores enumerados en la Tabla 74.5. Por otra parte, ciertas normativas nacionales, como la norma australiana AS/NZS 4360: 1995—Gestión del riesgo, incluyen una enumeración de fuentes genéricas de riesgo y distintas clasificaciones del mismo, así como las áreas de impacto de los riesgos; se dispone así de un esquema exhaustivo para el análisis de peligros en la preparación de emergencias.

Medidas y estrategias para el control de emergencias

Dentro del sistema de preparación de emergencias hay que identificar, evaluar y desarrollar tres niveles de acciones de respuesta. La *respuesta individual o primaria* comprende las acciones de cada individuo una vez identificada una situación de peligro o un incidente, e incluye:

- la notificación a los supervisores, controladores o personal de gestión de la situación, de las circunstancias o del incidente;
- la contención (tareas básicas de extinción, primeros auxilios o despeje de la zona);
- la evacuación, huida o refugio.

La *respuesta secundaria* abarca las acciones posteriores a la notificación del incidente por parte de los responsables adiestrados, como equipos de bomberos, equipos de búsqueda y rescate y equipos especiales de intervención en accidentes (SCAT), cada uno de los cuales con sus conocimientos, facultades y equipos específicos.

La *respuesta terciaria* corresponde al despliegue de sistemas, equipos y tecnologías especializadas en situaciones en las que no pueden utilizarse de forma segura o eficaz las respuestas primaria y secundaria, e incluye:

- sistemas de localización de personas y detectores de fenómenos sísmicos;
- rescate mediante perforaciones de gran diámetro;
- inertización, precintado remoto o inundación;
- vehículos y sistemas de vigilancia/exploración (p. ej., cámaras de perforación y muestreo atmosférico).

Definición de la organización de emergencias

Las condiciones de emergencia se hacen más críticas cuanto más se prolonga la situación. El personal en el lugar del siniestro debe estar en condiciones de responder de forma adecuada a cualquier emergencia y son muchas las actividades que hay que coordinar y gestionar para garantizar un control rápido y eficaz de la situación.

La organización de emergencias de acuerdo con un enfoque estructurado define e integra las estrategias de emergencia, la estructura de gestión (o cadena de mando), los recursos personales, las funciones y responsabilidades, los equipos e instalaciones y los sistemas y procedimientos, abarcando todas las fases de la emergencia, desde la identificación inicial y las actividades de contención hasta la notificación, movilización, despliegue y recuperación (restablecimiento del funcionamiento normal).

La organización de emergencias debe contemplar una serie de elementos clave, como:

- la capacidad de respuesta primaria y secundaria ante una emergencia;
- la capacidad de gestionar y controlar una emergencia;
- la coordinación y las comunicaciones, incluida la recogida, comprobación y evaluación de datos, la toma de decisiones y su puesta en práctica;
- la magnitud de los procedimientos necesarios para un control eficaz, incluida la identificación, la contención, la notificación y la información inmediata, la declaración de emergencia, los procedimientos específicos de operación, la extinción, la evacuación, el despeje y los primeros auxilios, la supervisión y la revisión;
- la identificación y asignación de responsabilidades clave;
- los servicios de control, asesoría, técnicos, de administración y apoyo;
- el tránsito de un funcionamiento normal a otro de emergencia en cuanto a líneas de comunicación, niveles de autoridad, responsabilidad, cumplimiento, coordinación y política;
- la disponibilidad y capacidad para mantener el procedimiento de emergencia durante un período prolongado y la gestión de los cambios de turno;
- la repercusión de los cambios organizativos en una situación de emergencia, incluida la supervisión y el control del personal, la reubicación o reasignación de trabajadores, la motivación, el compromiso y la disciplina, las funciones de los expertos y los especialistas, los organismos externos y los mandos corporativos;
- las medidas de emergencia para afrontar situaciones como las que pueden surgir al cabo de algunas horas o cuando ciertos miembros clave de la organización no están disponibles o se han visto afectados por la propia emergencia;
- la integración y el despliegue de los sistemas, equipos y tecnologías de respuesta terciaria.

Instalaciones, equipos y materiales de emergencia

La naturaleza, dimensiones y alcance de las instalaciones, equipos y materiales necesarios para controlar y mitigar las emergencias

se determinarán durante la aplicación y ampliación del proceso de gestión de riesgos y la definición de las estrategias de control de emergencias. Por ejemplo, un elevado riesgo de incendio exige una dotación y un equipo de extinción de incendios adecuados. La distribución se efectuará de acuerdo con el perfil del riesgo. La dotación, equipo y material necesarios para cubrir de forma eficaz tareas de salvamento y primeros auxilios o de evacuación, escape y rescate se muestran en la Tabla 74.6.

Otras medidas y equipos que pueden resultar necesarios en caso de emergencia son: gestión de incidentes e instalaciones de control, zonas de reunión para trabajadores, zonas de rescate, seguridad de los edificios y controles de acceso, instalaciones para los familiares y los medios de información, materiales y consumibles, transporte y logística. La dotación de estas instalaciones y equipos debe realizarse previamente a cualquier incidente. Las últimas emergencias en la minería han venido a destacar la necesidad de centrarse en tres aspectos concretos de la infraestructura: refugios, comunicaciones y control atmosférico.

Refugios

Los refugios se están utilizando cada vez más como medio para mejorar la escapatoria y rescate de los trabajadores en la mina. Algunos de estos refugios están diseñados de forma que los individuos pueden ponerse a salvo por sí solos y comunicarse con la superficie con total seguridad; otros pretenden servir de refugio eficaz durante cierto tiempo para permitir el rescate desde el exterior.

La decisión de instalar refugios depende de los sistemas globales de escape y refugio de la mina. A la hora de ponderar la necesidad y el diseño de los refugios hay que evaluar los siguientes factores:

- la probabilidad de quedar atrapado;
- el tiempo que se tarda en evacuar a las personas que se encuentren bajo tierra por las vías normales de salida, y que puede resultar excesivo en explotaciones mineras con largas galerías o en condiciones difíciles tales como techos bajos o pendientes pronunciadas;
- la capacidad de las personas que se encuentren bajo tierra para escapar por sí mismas (considerando, p. ej., enfermedades o problemas previos y daños sufridos durante el incidente);

Tabla 74.6 • Instalaciones, equipos y materiales de emergencia.

Emergencia	Nivel de respuesta		
	Primario	Secundario	Terciario
Incendio	Extintores, tomas de agua y mangueras instaladas cerca de las zonas de alto riesgo, como cintas transportadoras, estaciones de repostaje, transformadores y subestaciones eléctricas, y en equipos móviles	Escafandras autónomas y ropa de protección almacenados en lugares centralizados para permitir la respuesta por parte de un "equipo contraincendios" con aparatos especiales, como generadores de espuma y mangueras múltiples	Medios de sellado o inertización a distancia.
Salvamento y primeros auxilios	Salvamento, respiración y circulación	Primeros auxilios, clasificación, estabilización y desescombro	Paramédica, forense y legal
Evacuación, escape y rescate	Medios de sistemas de alarma o notificación, salidas de emergencia seguras, autorrescatadores con oxígeno, cuerdas de seguridad y sistemas de comunicación, disponibilidad de vehículos de transporte	Disponibilidad de refugios convenientemente equipados, equipos de rescate minero debidamente entrenados y equipados, sistemas de localización de personas	Sistemas de rescate mediante perforación de gran diámetro, inertización, vehículos especiales para rescate

- la disciplina necesaria para mantener y utilizar refugios;
- los medios de que disponen las personas para encontrar los refugios en situaciones de visibilidad extremadamente baja y/o de obstrucción;
- la resistencia necesaria para hacer frente a explosiones e incendios;
- el tamaño y la capacidad necesarios;
- los servicios previstos (p. ej., ventilación/renovación del aire, refrigeración, comunicaciones, medidas sanitarias y de supervivencia);
- la aplicación potencial de la inertización como estrategia de control;
- las opciones para el rescate final de las personas (p. ej., equipos de rescate en la mina y perforaciones de gran diámetro).

Comunicaciones

En todas las minas suele existir una infraestructura de comunicaciones para facilitar la gestión y el control de las operaciones, así como para contribuir a la seguridad de la explotación minera al hacer posible las llamadas de ayuda. Por desgracia, la infraestructura no suele ser suficientemente sólida para resistir un incendio o una explosión importantes, interrumpiéndose las comunicaciones cuando más necesarias son. Además, los sistemas tradicionales incorporan auriculares que no pueden utilizarse de manera segura con la mayoría de las máscaras de respiración y que además suelen estar instalados en las vías principales de entrada de aire próximas a la planta fija, en vez de en los pasillos de escape.

La necesidad de disponer de comunicaciones después de un incidente debe evaluarse con detenimiento. Aunque es preferible que el sistema de comunicaciones tras el incidente forme parte del sistema anterior al mismo con el fin de mejorar el mantenimiento, el coste y la fiabilidad, debería instalarse un sistema independiente de comunicaciones de emergencia como parte de la estrategia global de gestión de escape, rescate y emergencia.

Supervisión atmosférica

El conocimiento de las condiciones en el interior de la mina después de cualquier incidente es esencial para identificar y aplicar las medidas más adecuadas con el fin de controlar la situación, así como para ayudar a evacuar a los trabajadores y proteger al equipo de salvamento. La necesidad de una supervisión atmosférica posterior al incidente deberá evaluarse con detenimiento, habilitándose sistemas que cubran las necesidades específicas de la explotación minera, entre los que se encuentran:

- la ubicación y el diseño de puntos de muestreo atmosféricos y de ventilación para situaciones atmosféricas normales y potencialmente anormales;
- el mantenimiento de equipos para analizar, detectar e interpretar la atmósfera de la mina, concretamente allí donde puedan existir mezclas explosivas tras un incidente;
- la disposición modular de sistemas de grupos de tubos alrededor de las perforaciones a fin de reducir al mínimo los retrasos en el muestreo y mejorar la solidez del sistema;
- la dotación de mecanismos para comprobar la integridad de los sistemas de grupos de tubos después de un incidente;
- la utilización de la cromatografía de gases en los lugares en que puedan existir mezclas explosivas tras un incidente y cuando sea preciso que el equipo de rescate penetre en la mina.

Facultades, competencias y formación para la preparación de emergencias

Las facultades y competencias necesarias para hacer frente con eficacia a una emergencia pueden determinarse rápidamente

mediante el reconocimiento de los riesgos básicos y de las medidas de control de emergencias, el desarrollo de la organización y los procedimientos de emergencia, así como la identificación de la dotación y el equipamiento necesarios.

Las facultades y competencias para la preparación de emergencias no sólo comprenden la planificación y gestión de una emergencia, sino también una amplia gama de funciones básicas asociadas a las iniciativas de respuesta primaria y secundaria que deben incorporarse en una estrategia exhaustiva de formación y que incluyen:

- la identificación y contención del incidente (p. ej., extinción, salvamento, evacuación y desescombro);
- notificación (p. ej. por radio o teléfono);
- actividades de movilización y despliegue (p. ej., equipos de búsqueda y rescate, extinción, gestión de accidentes y recuperación).

El sistema de preparación de emergencias proporciona una estructura para el desarrollo de una estrategia eficaz de formación al identificar la necesidad, la magnitud y el alcance de consecuencias específicas, predecibles y fiables en un lugar de trabajo y de las competencias complementarias subyacentes. El sistema incluye:

- una declaración de intenciones, en la que se exponga la razón por la que deben desarrollarse la experiencia, las facultades y las competencias necesarias y que representa el compromiso y la dirección de la organización para una puesta en práctica satisfactoria;
- la gestión del riesgo y las medidas para gestionar emergencias que identifiquen los elementos clave (p. ej., incendios, deflagraciones, materiales peligrosos, movimientos y descargas no planificados, sabotaje, amenazas de bomba, fallos de seguridad, etc.);
- una definición de la organización de emergencias (estrategias, estructura, personal, conocimientos, sistemas y procedimientos) que identifique las personas que deben formarse, su función en caso de emergencia y los conocimientos y facultades necesarios;
- la identificación de los recursos de formación para determinar la ayuda, equipos, instalaciones y personas necesarios;
- la formación de personas en las actividades de identificación, contención, notificación, movilización, despliegue y actividades posteriores al incidente, para desarrollar la base necesaria de facultades y competencias;
- la comprobación, evaluación y mejora rutinarias del sistema global, junto con la comprobación periódica de riesgos y capacidad de respuesta para completar el proceso de aprendizaje y garantizar la existencia de un sistema eficaz de preparación de emergencias.

La formación para la preparación de emergencias puede estructurarse en una serie de categorías (véase la Tabla 74.7).

Auditoría, revisión y evaluación

Para comprobar y evaluar la eficacia global de los sistemas, procedimientos, instalaciones, programas de mantenimiento, equipos, formación y competencias individuales de emergencia es necesario incorporar procesos de auditoría y revisión. La realización de una auditoría, o una simulación de la misma, brinda, sin excepciones, una oportunidad para la mejora, la crítica constructiva y la comprobación del nivel de prestaciones de las actividades clave.

Toda organización debería comprobar su plan global de emergencia al menos una vez al año para cada turno de trabajo. Los elementos críticos del plan, como los sistemas de

Tabla 74.7 • Matriz de formación para preparación de emergencias.

Nivel de respuesta de formación		
Educación/primario	Procedimientos/secundario	Funciones/terciario
<p>Diseñado para que los trabajadores comprendan la naturaleza de las emergencias en las minas y la forma en que aspectos específicos del plan global de emergencia pueden requerir su participación o afectarles, incluidas las medidas de respuesta primaria.</p>	<p>Habilidades y competencias para aplicar satisfactoriamente procedimientos específicos definidos en los planes de respuesta a emergencias y las medidas de respuesta secundaria para situaciones de emergencia específicas.</p>	<p>Desarrollo de las habilidades y competencias necesarias para gestionar y controlar una emergencia.</p>
Elementos de conocimiento y competencia		
<ul style="list-style-type: none"> • Conocimiento de los indicadores clave de los accidentes en las minas • Condiciones ambientales posteriores a un accidente (p. ej., temperatura, visibilidad y gases) • Capacidad de respuesta ante un cambio adverso de las condiciones ambientales (p. ej., humo, interrupción de la ventilación) • Capacidad para proceder a la notificación y las comunicaciones necesarias tras un accidente • Conocimiento de las opciones de respuesta adecuadas ante una emergencia ambiental • Conciencia del uso y las limitaciones de aparatos, rutas y sistemas de escape • Conocimiento de las funciones y responsabilidades del personal de la mina en el marco del plan de respuesta de emergencia, incluidas sus funciones y responsabilidades específicas • Posesión de habilidades y competencias de respuesta primaria para situaciones específicas de emergencia (p. ej., extinción, salvamento, escape y refugio a nivel básico) • Conocimientos sobre salvamento y otros servicios de emergencia en minas • Participación en simulacros de emergencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Conocimiento de los indicadores clave de los accidentes en las minas • Capacidad para detectar, supervisar y evaluar las condiciones ambientales después de un accidente (p. ej., gases en la mina, ventilación, humo) • Capacidad para analizar e interpretar cambios en los sistemas de ventilación de la mina (p. ej., destrucción de tabiques de ventilación, obturaciones y cruces de ventilación, daños en los ventiladores principales) • Conocimiento de las medidas de respuesta utilizables para controlar y mitigar la situación de emergencia (p. ej., extinción, búsqueda y rescate, restablecimiento de la ventilación, primeros auxilios, clasificación y desescombro) • Conocimiento de las funciones y responsabilidades del personal de la mina en el marco de los planes de respuesta de emergencia y de su capacidad para desempeñar el cometido asignado • Conciencia del uso y la limitación de aparatos, rutas y sistemas de escape (p. ej., autorrescate, refugios, escafandras autónomas) • Capacidad para establecer comunicaciones y protocolos internos de emergencia • Conciencia del uso y limitaciones de aparatos y sistemas de escape y rescate (p. ej., autorrescate, refugios, respiradores) • Capacidad de rescate y otros servicios de emergencia en minas • Iniciación en los esquemas de petición de ayuda y asistencia mutua • Participación en simulacros de ejercicios y emergencias 	<ul style="list-style-type: none"> • Conocimiento de los indicadores clave de las emergencias en las minas y conocimiento detallado de los sucesos que activan una respuesta ante una emergencia • Conocimiento detallado del diseño y la ventilación de la mina y de los sistemas de supervisión • Capacidad para analizar e interpretar los sistemas de información de la mina (p. ej., datos de control de la ventilación y ambientales) • Conciencia de las medidas de control utilizables para gestionar y mitigar una situación de emergencia • Capacidad para cumplir y controlar los planes y procedimientos de respuesta de emergencia mediante la realización de emergencias simuladas • Capacidad para establecer comunicaciones y protocolos de emergencia, tanto en el plano interno como en el externo • Capacidad de los servicios de rescate de la mina y de otros servicios de emergencia, apoyo de acceso por parte de estos servicios • Capacidad para crear y apoyar equipos de trabajo para accidentes críticos • Conocimiento de la capacidad de los sistemas de respuesta terciaria y despliegue de los mismos (p. ej., sistemas de localización, inertización, sellado a distancia, rescate mediante perforaciones de gran diámetro, laboratorios móviles) • Capacidad para utilizar recursos de especialistas (p. ej., paramédicos, forenses, legales, tecnológicos, declaraciones tras accidentes críticos) • Gestión y dirección de situaciones críticas

alimentación de emergencias o de alarma remota, deberían comprobarse individualmente y con mayor frecuencia.

Hay dos formas básicas de auditoría. La *auditoría horizontal* consiste en la comprobación de pequeños elementos concretos del plan global de emergencia para detectar deficiencias. Deficiencias aparentemente sin importancia pueden ser críticas en caso de emergencia real. En la Tabla 74.8 se ofrecen algunos ejemplos de este tipo de elementos. En una *auditoría vertical* se comprueban simultáneamente un conjunto de elementos del

plan mediante la simulación de una emergencia. De esta forma, pueden auditarse actividades como la activación del plan, los procedimientos de búsqueda y rescate, salvamento y extinción de incendios, así como la logística relacionada con una respuesta de emergencia en una mina o explotación remota.

En los simulacros pueden participar trabajadores de más de un departamento, personas de otras empresas o de organizaciones de ayuda mutua o incluso servicios de emergencia, como el cuerpo de policía y el parque de bomberos. La intervención

Tabla 74.8 • Ejemplos de auditoría horizontal de planes de emergencia.

Elemento	Fallo
Indicadores de alerta de accidente o incidente	No se reconocen los indicadores de alerta de accidente o incidente
Procedimientos de alerta/evacuación	Los trabajadores no están familiarizados con los procedimientos de evacuación
Colocación de escafandras autónomas de emergencia	Los trabajadores no están familiarizados con las escafandras autónomas
Equipos de extinción de incendios	Los extintores están descargados, los aspersores están recubiertos de pintura, las tomas de agua están ocultas o enterradas
Alarmas de emergencia	Se hace caso omiso de las alarmas
Instrumentos de comprobación de presencia de gases	No se efectúa de forma regular su mantenimiento, servicio o calibración

de organizaciones externas proporciona a todos los participantes una oportunidad inestimable para mejorar e integrar operaciones, procedimientos y equipos de preparación de emergencias y adecuar la capacidad de respuesta ante riesgos o peligros de mayor envergadura en determinadas instalaciones.

Tan pronto se pueda, se procederá a una crítica formal, si es posible inmediatamente después de la auditoría o el simulacro. Es importante hacer público el reconocimiento a aquellas personas y equipos que hayan tenido un comportamiento destacado. Los puntos débiles deberán describirse con la mayor concreción posible y será necesario revisar los procedimientos para incorporar las mejoras necesarias. Se introducirán asimismo los cambios pertinentes y se supervisará el funcionamiento a fin de perfeccionarlo.

Un programa que haga especial hincapié en los elementos de planificación, práctica, disciplina y trabajo en equipo es un elemento necesario de cualquier simulacro y entrenamiento bien diseñados. La experiencia demuestra una y otra vez que cualquier simulacro es bueno y positivo, y ofrece la oportunidad de demostrar los puntos fuertes y de identificar los aspectos mejorables.

Revisión periódica de riesgos y capacidades de respuesta

Pocos son los riesgos que permanecen invariables. En consecuencia, hay que supervisar y controlar los riesgos y la funcionalidad de las medidas de control y de preparación de emergencias para garantizar que circunstancias cambiantes (individuos, sistemas, procesos, instalaciones, equipos, etc.) no alteren la prioridad de los riesgos ni reduzcan la capacidad del sistema.

Conclusiones

A menudo, las emergencias se consideran sucesos imprevistos. Sin embargo, en esta época de comunicaciones y tecnologías tan avanzadas, son pocos los sucesos que realmente pueden calificarse de imprevistos y muy pocas las desgracias que no hayan ocurrido ya alguna vez. Los periódicos, las alertas de peligro, las estadísticas de accidentes y los informes técnicos proporcionan una sólida base histórica de datos e imágenes sobre lo que el futuro puede deparar a quienes no estén bien preparados.

En cualquier caso, la naturaleza de las emergencias cambia a medida que lo hace la industria. Confiar en técnicas y medidas

de emergencia adoptadas sobre la base de experiencias del pasado no ofrece el mismo grado de seguridad para sucesos futuros.

La gestión de riesgos aporta un enfoque amplio y estructurado para comprender los peligros y riesgos de la minería y desarrollar capacidades y sistemas eficaces de respuesta ante las emergencias. Hay que entender y aplicar de forma continua el proceso de gestión de riesgos, sobre todo cuando se envía personal de rescate a entornos potencialmente peligrosos o explosivos.

El sistema de preparación de emergencias debe apuntalarse en la formación de todo el personal de la mina acerca de la detección de peligros básicos, el reconocimiento y la rápida notificación de cualquier inicio de incidente o sucesos desencadenantes, la respuesta primaria y las habilidades de escape. También es crítica la formación preventiva sobre condiciones de calor, humedad, humo o escasa visibilidad. A menudo, la formación en estas disciplinas básicas marca la diferencia entre un accidente y una catástrofe.

De la formación depende la operatividad de la organización y la planificación de emergencias. La integración de la preparación de emergencias en un entorno de sistemas de calidad, junto con la práctica rutinaria de auditorías y simulacros, constituye el mecanismo para su permanente mejora y perfeccionamiento.

El Convenio sobre salud y seguridad en la minería de la OIT, 1955 (N° 176), y la posterior Recomendación, 1995 (N° 183), proporcionan un marco global para la mejora de la seguridad y la salud en la minería. El sistema propuesto de preparación de emergencias aporta una metodología para alcanzar los objetivos descritos en el Convenio y en la Recomendación.

Agradecimiento: Deseamos agradecer sinceramente el apoyo prestado por Paul MacKenzie-Wood, Director de los Servicios técnicos de la minería del carbón (Mines Rescue Service NSW, Australia) en la elaboración y crítica de este artículo.

PELIGROS PARA LA SALUD EN LA MINERÍA Y LAS CANTERAS

James L. Weeks

Entre los principales *riesgos de transmisión a través del aire* que presenta la industria minera se encuentran varios tipos de partículas, los gases libres, los escapes de motores y ciertos vapores químicos, y entre los principales *riesgos físicos*, el ruido, la vibración por segmentos, el calor, los cambios de presión barométrica y la radiación ionizante. Todos ellos se producen en distintas proporciones dependiendo de la mina o de la cantera, de su profundidad, de la composición del mineral y de las rocas circundantes y del método de explotación. Los grupos de personas que viven juntas en lugares aislados corren también un riesgo de transmisión de algunas enfermedades infecciosas, como la tuberculosis, la hepatitis (B y E) y el virus del SIDA. La exposición de cada individuo depende de su trabajo, su proximidad a la fuente del peligro y la efectividad de los métodos de control.

Peligros de las partículas transmitidas por el aire

La *silice cristalina libre* es el compuesto más abundante en la superficie terrestre y, por consiguiente, el polvo más común transportado por el aire al que están expuestos los mineros y los trabajadores de las canteras. La silice libre es dióxido de silicio que no está unido químicamente a ningún otro compuesto en forma de silicato. La forma más común de silice es el cuarzo,

aunque también puede presentarse como tridimita o cristobalita. Las partículas respirables se forman al someter rocas que contienen sílice a procesos de perforación, voladura, trituración o molienda o por cualquier otra técnica, dando lugar a partículas muy finas. La proporción de sílice en las distintas variedades de roca es variable, pero no constituye un indicador fiable de la cantidad de polvo de sílice que puede contener una muestra del aire respirable. No es extraño, por ejemplo, hallar un 30 % de sílice libre en una roca y sólo un 10 % en la muestra, y viceversa. La arenisca puede contener hasta un 100 % de sílice, el granito hasta un 40 % y la pizarra un 30 %, siendo menor esta proporción en otros minerales. El peligro de exposición puede producirse en cualquier explotación minera, ya sea a cielo abierto o subterránea, pues puede haber sílice en la capa de cobertura de una mina a cielo abierto o en el techo, el suelo o el yacimiento de mineral de una explotación subterránea. La dispersión del sílice puede estar producida por el viento, el tráfico rodado o las máquinas de movimiento de tierras.

Debido a una exposición excesiva, la sílice produce silicosis, una neumoconiosis típica que se desarrolla internamente tras muchos años de exposición. Un grado excepcionalmente elevado de exposición puede causar silicosis aguda o acelerada en el plazo de algunos meses, provocando un deterioro significativo o incluso la muerte en el transcurso de pocos años. La exposición a la sílice también va asociada a un riesgo mayor de tuberculosis, cáncer de pulmón y determinadas enfermedades de autoinmunidad, incluido el escleroderma, el lupus sistémico eritematoso y la artritis reumática. El polvo de sílice recién triturado parece más activo y perjudicial que el formado hace tiempo, lo que puede deberse a que las partículas recién formadas presentan una carga superficial relativamente mayor.

Los procesos más habituales que generan polvo respirable de sílice en las minas y canteras son la perforación, la voladura y el corte de rocas que contienen sílice. La mayoría de los barrenos que se taladran para las voladuras están hechos con máquinas de aire comprimido montadas sobre una oruga. El barreno se taladra mediante una combinación de movimientos de rotación, percusión y empuje del trépano. A medida que va profundizando el taladro, se van añadiendo barras de acero que conectan el trépano con la parte motriz. El aire comprimido no sólo actúa de fuerza motriz de la perforadora, sino que va expulsando las partículas y el polvo de la vía perforada, lo cual, si no se controla, supone la proyección de una gran cantidad de polvo a la atmósfera. El martillo o la taladradora manual funcionan de forma análoga, aunque a menor escala. Esta herramienta transmite una cantidad considerable de vibración al operario, con el consiguiente riesgo de falta de riego en las manos (dedos blancos). Esta dolencia se ha detectado en mineros de India, Japón, Canadá y otros países. La perforadora de oruga y el martillo de picar también se utilizan en proyectos de obra civil en los que hay que taladrar o volar rocas para construir una carretera, triturar rocas para cimientos, efectuar reparaciones o cualquier otro tipo de trabajo.

Para estas operaciones de perforación se han desarrollado controles eficaces del polvo. Uno de ellos consiste en inyectar vapor de agua, a veces mezclado con una sustancia detergente, en el aire comprimido, lo que produce la coalescencia de las partículas de polvo y su desprendimiento. Un exceso de agua provoca la formación de un puente o collar entre la varilla de acero de la perforadora y la pared del taladro, que a menudo es necesario romper para sacar el trépano, mientras que un defecto de agua resulta ineficaz. Los problemas que presenta este tipo de control son la reducción de la velocidad de perforación, la ausencia de un suministro fiable de agua y la sustitución del aceite, que origina un desgaste mayor de las piezas lubricadas.

Otro sistema de control del polvo en las perforadoras consiste en la ventilación local de los gases de escape. Un flujo inverso de aire que atraviesa la varilla de acero de la perforadora extrae parte del polvo, y un collar alrededor del trépano dotado de conducciones y un ventilador eliminan el polvo. Este sistema es más funcional que el húmedo anteriormente descrito, ya que los trépanos duran más y la velocidad de perforación es mayor, aunque, por otro lado, es más costoso y exige un mantenimiento mayor.

Otros controles de protección son cabinas con filtrado de aire y, a veces, aire acondicionado para los operarios de perforadoras y máquinas oruga así como para los conductores de vehículos. Puede utilizarse una máscara de protección, debidamente ajustada, como solución temporal o en caso de que todas las demás opciones resulten ineficaces.

La exposición al sílice también se produce en las canteras de piedra donde se cortan rocas de determinadas dimensiones. La técnica más común en la actualidad consiste en utilizar un soplete de chorros múltiples alimentado con gasoil y aire comprimido, lo que da lugar a la difusión de partículas de sílice. El problema más significativo de este tipo de sopletes es el ruido: en el momento del encendido inicial y al extraerlo del corte, el nivel de ruido puede superar los 120 dBA y cuando está introducido en el corte el nivel es de unos 115 dBA. Una técnica alternativa de corte de la piedra es mediante inyección de agua a alta presión.

Junto a la cantera o en sus proximidades suele existir una instalación para tallar los bloques y darles el acabado. A menos que dispongan de una ventilación local de calidad, en estas instalaciones la exposición suele ser elevada, ya que para tallar la piedra se utilizan herramientas manuales con mecanismos de vibración o rotación que dispersan el polvo.

El *polvo que se respira en una mina de carbón* constituye un peligro tanto en las minas subterráneas como en las explotaciones a cielo abierto y en las instalaciones de procesamiento del carbón. Es una mezcla compuesta en su mayor parte por carbón, pero también puede contener sílice, arcilla, piedra caliza y otros polvos minerales. La composición del polvo de una mina de carbón varía dependiendo del filón, de la composición de los estratos adyacentes y de los métodos de extracción. El polvo de carbón se genera en las operaciones de voladura, perforación, tallado y acarreo del mineral.

En la minería mecanizada se produce mayor cantidad de polvo que en la manual y algunos métodos de la primera generan más cantidad de polvo que otros. Las máquinas de cortar que arrancan el carbón con tambores rotatorios dentados, que pueden ser, entre otros, de tipo continuo o de tajos largos, son la fuente principal de polvo en las operaciones mineras mecanizadas. Las máquinas de tajos largos son normalmente las que más polvo generan. En la minería por tajos largos la dispersión del polvo puede deberse también al movimiento de los escudos, así como al trasvase del carbón desde los vehículos o cintas transportadoras a otras formas de transporte.

El polvo de las minas de carbón provoca la enfermedad denominada neumoconiosis minera y contribuye a la aparición de dolencias crónicas en las vías respiratorias, como bronquitis crónica o enfisemas pulmonares. El carbón de alta calidad (con alto contenido en carbono, como la antracita) presenta un riesgo más elevado de neumoconiosis. Además, el polvo de carbón provoca reacciones de tipo reumático.

Puede reducirse la producción de polvo de carbón modificando las técnicas de cortado, y controlar su dispersión mediante una ventilación adecuada y agua vaporizada. Si se disminuye la velocidad de rotación de los tambores de extracción y se aumenta la velocidad a que el tambor va penetrando en la veta de carbón, es posible reducir la generación de polvo

sin pérdida de productividad. En la minería de tajos largos, el polvo disminuye si se corta el carbón en una sola pasada (en lugar de dos) a lo largo del frente, retrocediendo sin cortar o realizando un corte de rectificación. La dispersión del polvo en secciones de tajos largos puede reducirse mediante la minería homotrópica (es decir, el transportador de cinta en el frente y el cabezal cortador y la corriente de aire desplazándose en la misma dirección). Una nueva forma de cortar carbón, que consiste en utilizar un cabezal excéntrico que trabaja de forma continua en sentido perpendicular al grano de la veta, parece generar menos cantidad de polvo que el tradicional cabezal cortador circular.

La instalación de una ventilación mecánica, que primero pase por las personas y después en dirección hacia y a lo largo del frente, reduce la exposición. Una ventilación auxiliar local en el frente de trabajo, compuesta por ventilador, conducciones y depuradora, es otro factor reductor del grado de exposición al proporcionar una ventilación local de aspiración.

La colocación estratégica de vaporizadores de agua, dispuestos cerca de los cabezales cortadores para alejar el polvo de los mineros impulsándolo hacia el frente, también ayudan a reducir el grado de exposición. Los tensioactivos contribuyen asimismo a reducir la concentración de polvo de carbón.

La *exposición al amianto* se produce entre los mineros que trabajan en minas de este mineral y en explotaciones de minerales que contienen amianto. Entre la población minera, la exposición al amianto ha incrementado el riesgo de cáncer de pulmón y de mesotelioma, así como de asbestosis (otro tipo de neumoconiosis) y dolencias de las vías respiratorias.

Los *gases de escape de los motores diesel* están formados por una mezcla compleja de gases, vapores y partículas. Los más peligrosos son el monóxido de carbono, el monóxido de nitrógeno, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Hay numerosos compuestos orgánicos volátiles (COV), como los aldehídos y los hidrocarburos, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y los compuestos HAP nitrogenados (N-HAP). Los compuestos HAP y N-HAP también se encuentran absorbidos en las partículas diesel. Los óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre y los aldehídos son agentes irritantes agudos de las vías respiratorias. Muchos de los compuestos HAP y N-HAP son cancerígenos.

Las partículas diesel están formadas por partículas de carbono de pequeño diámetro (<1 mm de diámetro) que se condensan de los gases de escape y que a menudo se agrupan en el aire formando aglomerados o cadenas. Estas partículas son respirables. Las partículas diesel y otras partículas de diámetro similar son cancerígenas en animales de laboratorio y parece que aumentan el riesgo de cáncer de pulmón en los trabajadores expuestos a concentraciones superiores a 0,1 mg/m³. Los mineros de explotaciones subterráneas se exponen a estas partículas en concentraciones notablemente más altas. La Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) tiene catalogadas las partículas diesel como posible agente cancerígeno.

La generación de los escapes diesel puede reducirse mediante un diseño adecuado de los motores y la utilización de combustible de alta calidad, limpio y con bajo contenido en azufre. Los motores con reducción de potencia y el combustible de bajo índice de cetano y bajo contenido en azufre producen muchas menos partículas. El consumo de combustible de bajo contenido en azufre reduce la generación de SO₂ y partículas. El empleo de filtros es eficaz y práctico, y permite eliminar más del 90 % de las partículas diesel del flujo de escape. Hay filtros para motores sin depuración y para motores con depuración húmeda o seca. El monóxido de carbono puede reducirse de manera notable utilizando convertidores catalíticos. Los óxidos de nitrógeno se forman cuando el nitrógeno y el oxígeno se encuentran

en condiciones de alta presión y temperatura (p. ej., en el interior del cilindro diesel) y, por consiguiente, resultan más difíciles de eliminar.

Es posible reducir la concentración de partículas diesel dispersas en las minas subterráneas mediante una adecuada ventilación mecánica y la restricción del uso de equipos diesel. Cualquier vehículo u otro tipo de máquina con motor diesel exige un mínimo de ventilación para diluir y eliminar los productos de escape. La intensidad de la ventilación dependerá del tamaño de la máquina y de su utilización. Si se utiliza más de un equipo con motor diesel en una corriente de aire, habrá que aumentar la ventilación para diluir y eliminar los escapes.

Los equipos con motor diesel pueden aumentar el riesgo de incendio o de deflagración ya que expulsan gas de escape caliente mezclado con llamas y chispas, y su elevada temperatura superficial es capaz de iniciar la combustión del polvo de carbón acumulado o de cualquier otra sustancia combustible. La temperatura superficial de los motores diesel debe mantenerse por debajo de los 305 °F (150 °C) en el interior de las minas de carbón con el fin de evitar la combustión del mismo. Las llamas y chispas de los gases de escape pueden controlarse mediante un depurador para evitar la combustión del polvo de carbón o del metano.

Gases y vapores

En la Tabla 74.9 se indican los gases que se encuentran normalmente en las explotaciones mineras. Los más importantes que aparecen de forma natural son el *metano* y el *sulfuro de hidrógeno* en las minas de carbón, y el radón en las de uranio y otros metales. En ambos casos puede existir escasez de oxígeno. El metano es un gas combustible y la mayoría de las deflagraciones en minas de carbón se deben a su inflamación, que a menudo va seguida de deflagraciones de carácter aún más violento provocadas por el polvo de carbón que queda en suspensión debido a la onda expansiva de la primera deflagración. Durante toda la historia de la minería del carbón, los incendios y las deflagraciones han ocasionado la muerte de miles de mineros. Puede reducirse el riesgo de deflagración diluyendo el metano por debajo de su límite inferior de deflagración y mediante la erradicación de posibles fuentes de incendio en las zonas del frente, donde suele darse la máxima concentración. Las deflagraciones pueden prevenirse espolvoreando las paredes, el suelo y los techos de la mina con

Tabla 74.9 • Denominación común de los gases nocivos existentes en las minas de carbón y sus efectos sobre la salud.

Gas	Nombre común	Efectos sobre la salud
Metano (CH ₄)	Grisú	Inflamable, explosivo; asfixia simple
Monóxido de carbono (CO)	Gas metífico	Asfixia química
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	Sulfuro de hidrógeno	Irritación de ojos, nariz, garganta; depresión respiratoria aguda
Falta de oxígeno	Mofeta	Anoxia
Productos secundarios de voladura	Gases deletéreos	Irritación respiratoria
Gases de escape de motores diesel	Idem	Irritación respiratoria; cáncer de pulmón

pedra caliza incombustible (o con cualquier otro polvo de roca incombustible que no contenga sílice); si el polvo que queda en suspensión a causa de una deflagración de metano no es combustible no se originará una segunda deflagración.

El radón es un gas radioactivo de aparición espontánea que existe en las minas de uranio, estaño y otros minerales aunque no se ha detectado en las minas de carbón. El principal peligro asociado al radón es que constituye un foco de radiación ionizante, tal como se describe más adelante.

Entre los gases peligrosos cabe citar los agentes irritantes de las vías respiratorias que se encuentran en los escapes de los motores diesel y en los subproductos de las explosiones. El *monóxido de carbono* aparece no sólo en los escapes de los motores sino también como consecuencia de los incendios en las minas, durante los cuales el CO puede alcanzar concentraciones letales, además de convertirse en un peligro potencial de deflagración.

Los *óxidos de nitrógeno* (NO_x), principalmente el NO y el NO₂, proceden de los escapes de los motores diesel y de las voladuras. En los primeros, el NO_x se genera como subproducto implícito al someter el aire, formado en un 79 % por nitrógeno y un 20 % por oxígeno, a condiciones de temperatura y presión elevadas, condiciones necesarias para el funcionamiento de cualquier motor diesel. La producción de NO_x puede reducirse hasta cierto punto manteniendo refrigerado el motor en la medida de lo posible y aumentando la ventilación para diluir y eliminar los gases de escape.

El NO_x es también un subproducto de las voladuras, durante las cuales se procura alejar a los trabajadores de la zona afectada. Como norma general, a fin de evitar una exposición excesiva a los óxidos de nitrógeno, conviene esperar hasta que la ventilación de la mina haya eliminado un volumen suficiente de subproductos de la voladura antes de volver a entrar en una zona de entrada de aire.

La *escasez de oxígeno* puede originarse de diversas formas. El oxígeno puede ser desplazado por otro gas, como el metano, o ser consumido por combustión o por microbios en un espacio carente de ventilación.

Hay numerosos peligros derivados de las materias transportadas por el aire a los que pueden verse expuestos determinados grupos de mineros. Los mineros de explotaciones auríferas y de mercurio corren un riesgo de exposición al vapor de mercurio, y por tanto de envenenamiento por este metal. Los trabajadores de las minas de oro y de plomo pueden verse expuestos al arsénico y sufrir cáncer de pulmón. En las minas de níquel la exposición a este mineral conlleva un riesgo de cáncer de pulmón y alergias de piel.

También se han comenzado a utilizar en las minas determinados plásticos como los *formaldehídos ureicos* y las *espumas de poliuretano*, que se fabrican in situ y sirven para taponar agujeros y mejorar la ventilación, así como para proporcionar un mejor anclaje para los soportes del techo. Los formaldehídos y los isocianatos, dos materiales básicos de estas espumas, son agentes irritantes de las vías respiratorias y pueden causar reacciones alérgicas que lleguen incluso a impedir a los trabajadores afectados trabajar en contacto con tales sustancias. El formaldehído es un agente cancerígeno (IARC Grupo 1).

Peligros físicos

El *ruido* es un fenómeno omnipresente en la minería debido al uso de potentes máquinas y ventiladores, y a las voladuras y el transporte del mineral. Por lo general, las explotaciones subterráneas disponen de un espacio limitado que crea un campo de reverberación. La exposición al ruido en un recinto cerrado es mayor que en un espacio abierto.

La exposición al ruido puede reducirse utilizando los medios tradicionales de control de ruidos en la maquinaria minera. Las transmisiones pueden ser más silenciosas, los motores pueden protegerse y la maquinaria hidráulica también puede hacerse menos ruidosa. Es posible aislar o proteger las chimeneas con material absorbente del ruido. A menudo resultan necesarios los protectores de oídos, junto con un muestreo audiométrico regular, para proteger la facultad auditiva de los mineros.

La *radiación ionizante* constituye un peligro en la industria minera. El radón puede liberarse de las rocas durante el proceso de voladura, pero también puede penetrar en la mina a través de corrientes subterráneas. Es un gas y, por tanto, se transporta por el aire. El radón y los productos resultantes de su desintegración emiten radiación ionizante, parte de la cual posee suficiente energía para producir células cancerígenas en los pulmones. Por consiguiente, las tasas de mortalidad por cáncer de pulmón entre los mineros de uranio son elevadas y entre los mineros fumadores aún mucho más.

El *calor* constituye un peligro tanto para los trabajadores de minas subterráneas como para los de explotaciones a cielo abierto. En las minas subterráneas la principal fuente de calor es la propia roca. La temperatura de la roca aumenta aproximadamente en 1 °C por cada 100 m de profundidad. Otros factores que influyen en la cantidad de calor son la actividad física que desarrollan los trabajadores, la cantidad de aire en circulación, la temperatura y la humedad del aire ambiente y el calor generado por los equipos de minería, sobre todo las máquinas con motores diesel. Las explotaciones muy profundas (superiores a los 1.000 m) pueden presentar importantes problemas de calor, con temperaturas en las galerías próximas a los 40 °C. Las principales fuentes de calor en las minas a cielo abierto son la actividad física, la proximidad a máquinas calientes, la temperatura del aire, la humedad y la radiación solar.

La presión térmica puede rebajarse refrigerando las máquinas, limitando la actividad física de los mineros y suministrándoles cantidad suficiente de agua potable, protección solar y una ventilación adecuada. En el caso de la maquinaria a cielo abierto, las cabinas con aire acondicionado proporcionan protección a los operadores. En algunas minas profundas de Sudáfrica, por ejemplo, se utilizan equipos subterráneos de aire acondicionado para aliviar el calor y existen equipos de primeros auxilios para combatir el calor.

Muchas explotaciones mineras trabajan a gran altitud (p. ej., a más de 4.600 m), por lo que los mineros pueden padecer el mal de altura; esta enfermedad se agrava si los mineros tienen que desplazarse entre la mina a una gran altitud y un lugar con presión atmosférica más baja.

Referencias

- Agricola, G. 1950. *De Re Metallica*, traducido por HC Hoover y LH Hoover. Nueva York: Dover Publications.
- Bickel, KL. 1987. Analysis of diesel-powered mine equipment. En *Proceedings of the Bureau of Mines Technology Transfer Seminar: Diesels in Underground Mines*. Information Circular 9141. Washington, DC: Bureau of Mines.
- Bureau of Mines. 1978. *Coal Mine Fire and Explosion Prevention*. Information Circular 8768. Washington, DC: Bureau of Mines.
- . 1988. *Recent Developments in Metal and Nonmetal Fire Protection*. Information Circular 9206. Washington, DC: Bureau of Mines.
- Chamberlain, EAC. 1970. The ambient temperature oxidation of coal in relation to the early detection of spontaneous heating. *Mining Engineer* (octubre) 130(121):1-6.
- Ellicott, CW. 1981. Assessment of the explosibility of gas mixtures and monitoring of sample-time trends. *Proceeding of the Symposium on Ignitions, Explosions and Fires*. Ilawara: Australian Institute of Mining and Metallurgy.
- Environmental Protection Agency (Australia). 1996. *Best Practice Environmental Management in Mining*. Canberra: Environmental Protection Agency.
- Funkemeyer, M, FJ Kock. 1989. Fire prevention in working rider seams prone to spontaneous combustion. *Gluckauf* 9-12.
- Graham, JI. 1921. The normal production of carbon monoxide in coal mines. *Transactions of the Institute of Mining Engineers* 60:222-234.
- Grannes, SG, MA Ackerson, GR Green. 1990. *Preventing Automatic Fire Suppression Systems Failure on Underground Mining Belt Conveyers*. Information Circular 9264. Washington, DC: Bureau of Mines.
- Greuer, RE. 1974. *Study of Mine Fire Fighting Using Inert Gases*. USBM Contract Report No. S0231075. Washington, DC: Bureau of Mines.
- Griffin, RE. 1979. *In-mine Evaluation of Smoke Detectors*. Information Circular 8808. Washington, DC: Bureau of Mines.
- Hartman, HL (ed.). 1992. *SME Mining Engineering Handbook*, 2ª edición. Baltimore, MD: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Hertzberg, M. 1982. *Inhibition and Extinction of Coal Dust and Methane Explosions*. Report of Investigations 8708. Washington, DC: Bureau of Mines.
- Hoek, E, PK Kaiser, WF Bawden. 1995. *Design of Support for Underground Hard Rock Mines*. Rotterdam: AA Balkema.
- Hughes, AJ, WE Raybold. 1960. The rapid determination of the explosibility of mine fire gases. *Mining Engineer* 29:37-53.
- International Council on Metals and the Environment (ICME). 1996. *Case Studies Illustrating Environmental Practices in Mining and Metallurgical Processes*. Ottawa: ICME.
- Jones, JE, JC Trickett. 1955. Some observations on the examination of gases resulting from explosions in collieries. *Transactions of the Institute of Mining Engineers* 114: 768-790.
- Mackenzie-Wood P, J Strang. 1990. Fire gases and their interpretation. *Mining Engineer* 149(345):470-478.
- Mines Accident Prevention Association Ontario. Sin fecha. *Emergency Preparedness Guidelines*. Technical Standing Committee Report. North Bay: Mines Accident Prevention Association Ontario.
- Mitchell, D, F Burns. 1979. *Interpreting the State of a Mine Fire*. Washington, DC: US Department of Labor.
- Morris, RM. 1988. A new fire ratio for determining conditions in sealed areas. *Mining Engineer* 147(317):369-375.
- Morrow, GS, CD Litton. 1992. *In-mine Evaluation of Smoke Detectors*. Information Circular 9311. Washington, DC: Bureau of Mines.
- Naciones Unidas (NU) Departamento de Cooperación Técnica para el Desarrollo y la German Foundation for International Development. 1992. *Mining and the Environment: The Berlin Guidelines*. Londres: Mining Journal Books.
- National Fire Protection Association (NFPA). 1992a. *Fire Prevention Code*. NFPA 1. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1992b. *Standard on Pulverized Fuel Systems*. NFPA 8503. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1994a. *Standard for Fire Prevention in Use of Cutting and Welding Processes*. NFPA 51B. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1994b. *Standard for Portable Fire Extinguishers*. NFPA 10. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1994c. *Standard for Medium and High Expansion Foam Systems*. NFPA 11A. Quincy, Maryland: NFPA.
- . 1994d. *Standard for Dry Chemical Extinguishing Systems*. NFPA 17. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1994e. *Standard for Coal Preparation Plants*. NFPA 120. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1995a. *Standard for Fire Prevention and Control in Underground Metal and Nonmetal Mines*. NFPA 122. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1995b. *Standard for Fire Prevention and Control in Underground Bituminous Coal Mines*. NFPA 123. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1996a. *Standard on Fire Protection for Self-propelled and Mobile Surface Mining Equipment*. NFPA 121. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1996b. *Flammable and Combustible Liquids Code*. NFPA 30. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1996c. *National Electrical Code*. NFPA 70. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1996d. *National Fire Alarm Code*. NFPA 72. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1996e. *Standard for the Installation of Sprinkler Systems*. NFPA 13. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1996f. *Standard for the Installation of Water Spray Systems*. NFPA 15. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1996g. *Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems*. NFPA 2001. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- . 1996h. *Recommended Practice for Fire Protection in Electric Generating Plants and High Voltage DC Converter Stations*. NFPA 850. Quincy, Massachusetts: NFPA.
- Ng, D, CP Lazzara. 1990. Performance of concrete block and steel panel stoppings in a simulated mine fire. *Fire Technology* 26(1):51-76.
- Ninteman, DJ. 1978. *Spontaneous Oxidation and Combustion of Sulfide Ores in Underground Mines*. Information Circular 8775. Washington, DC: Bureau of Mines.
- Organización Internacional del Trabajo (OIT). 1994. *Recent Developments in the Coalmining Industry*. Ginebra: OIT.
- Pomroy, WH, TL Muldoon. 1983. A new stench gas fire warning system. En *Proceedings of the 1983 MA-PAO Annual General Meeting and Technical Sessions*. North Bay: Mines Accident Prevention Association Ontario.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 1991. *Environmental Aspects of Selected Non-ferrous Metals (Cu, Ni, Pb, Zn, Au) in Ore Mining*. París: PNUMA.
- Ramaswamy, A, PS Katiyar. 1988. Experiences with liquid nitrogen in combating coal fires underground. *Journal of Mines Metals and Fuels* 36(9):415-424.
- Smith, AC, CN Thompson. 1991. Development and application of a method for predicting the spontaneous combustion potential of bituminous coals. Presentado en la 24th International Conference of Safety in Mines Research Institutes, Makeevka State Research Institute for Safety in the Coal Industry, Makeevka, Federación Rusa.
- Timmons, ED, RP Vinson, FN Kissel. 1979. *Forecasting Methane Hazards in Metal and Nonmetal Mines*. Report of Investigations 8392. Washington, DC: Bureau of Mines.

Otras lecturas recomendadas

- Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC). 1989. *Diesel and Gasoline Engine Exhausts and Some Nitroarenes*. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 46. Lyon: IARC.
- American Geological Institute. 1992. *Planning for Field Safety*. Alexandria, Virginia: American Geological Institute.
- Banks, DE (dir.). 1993. The mining industry. *Occ Med: State Art Rev* 8(1).
- Bieniawski, YT. 1984. *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*. Rotterdam: AA Balkema.
- Brady, BHG, ET Brown. 1993. *Rock Mechanics for Underground Mining*, 2ª edición. Londres: Chapman & Hall.
- British Columbia and Yukon Chamber of Mines Safety Committee. *Safety Manual: Mineral Exploration in Western Canada*. Vancouver, Columbia Británica: British Columbia and Yukon Chamber of Mines.
- Dunnicliff, J, GE Green. 1988. *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Franklin, J (dir.). 1990. *Mine Monitoring Manual*. Vol. 42. Etobocoke, Ontario: Canadian Institute of Mining and Metallurgy.
- Franklin, JA, MB Dusseault. 1989. *Rock Engineering*. Nueva York: McGraw-Hill.
- García, MM. 1989. *Mining and Milling: In-plant Practices for Job-related Health Hazards Control, Volume 1: Production Processes*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Gilchrist, JD. 1989. *Extraction Metallurgy*, 3ª edición. Oxford: Pergamon Press.
- Hedley, DGF. 1992. *Rockburst Handbook for Ontario Hardrock Mines*. CANMET Special Report SP92-1E. Ottawa: Supply and Services Canada.
- Jennings, NS. 1995. *Productivity, Employment and Industrial Relations in Coal Mines: Three Case Studies from China, India and Zimbabwe*. Ginebra: OIT.
- . 1995. *Productivity, Employment and Industrial Relations in Coal Mines: Three Case Studies from Australia, United Kingdom, United States*. Ginebra: OIT.
- . 1995. *Productivity, Employment and Industrial Relations in Coal Mines: Two Case Studies from the Czech Republic and the Russian Federation*. Ginebra: OIT.
- Kaiser, PK, DR McCreath, DD Tannant. 1996. *Canadian Rockburst Support Handbook*. Sudbury, Ontario: Geomechanics Research Centre.
- Kelly, EG, DJ Spottiswood. 1982. *Introduction to Mineral Processing*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Keystone, JS (dir.). 1995. *Don't Drink the Water*. Toronto: Canadian Public Health Association.

- Kural, O. (dir.). 1994. *Coal: Resources, Properties, Utilization, Pollution*. Estambul: Istanbul Technical University.
- Laskowski, JS, AD Walters. 1987. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. Nueva York: Academic Press.
- Merry, W. 1994. *The official Wilderness First Aid Guide*. Toronto: McClelland & Stewart.
- Organización Internacional (OIT). 1990. *Coal Mineworkers' Charter: Collection of Conclusions and Resolutions*. Ginebra: OIT.
- . 1991. *Safety and Health in Opencast Mines: A Code of Practice*. Ginebra: OIT.
- . 1994. *Productivity and Its Impact on Employment and Labour Relations in the Coalmining Industry*. Ginebra: OIT.
- . 1995. *Note on the Proceedings of the 13th Session of the ILO's Coal Mines Committee*, 1995.
- Osborne, DG. 1988. *Coal Preparation Technology*. Londres: Graham & Trotman.
- Peters, WC. 1987. *Exploration and Mining Geology*, 2ª edición. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Reedman, JH. 1979. *Techniques in Mineral Exploration*. Nueva York: Applied Science Publishers.

