

APLICACION DE LAS TECNICAS DE EMISION ACUSTICA O ACTIVIDAD MICROSISMICA EN LA MINERIA DEL CARBON

L. M. SUAREZ DEL RIO, y M. MONTOTO

TRABAJOS DE GEOLOGIA Suárez del Río, L. M. y Montoto, M. (1982).—Aplicación de las técnicas de emisión acústica o actividad microsísmica en la minería del carbón. *Trabajos de Geología*. Univ. de Oviedo, 12, 125-132.



Las técnicas de emisión acústica o actividad microsísmica están siendo utilizadas en la actualidad en muy diversos campos de la Minería y de la Ingeniería Civil. En la minería del carbón se inició a finales de los años 60, tanto en Norte América como en Europa (Polonia, Alemania, Checoslovaquia, etc.) y sus aplicaciones se centran en el estudio de la estabilidad de las operaciones mineras subterráneas, tales como rotura de pilares, golpes de techo, etc., así como en la localización de zonas de concentración de esfuerzos y en el control de la eficacia de las medidas tomadas en las zonas inestables. En este trabajo se expone una introducción a esta técnica así como los aspectos más generales sobre su aplicación en minas de carbón.

The acoustic emission, or microseismic activity techniques are used, at present, in very different Mining and Civil Engineering applications. At the end of the 60's they were initially applied to coal mining problems, in U.S.A. and Europe (Poland, Germany, Czechoslovakia, etc.) to solve underground stability mining operations, like rockbursts, rock falls, etc., to localize dangerous stress concentration areas, to control the effectiveness of the measures taken in unstable zones, etc. An introduction to this technique and a short review on general applications of the acoustic emission to coal mining problems are presented.

L. M. Suárez del Río y M. Montoto; Departamento de Petrología y Geoquímica de la Facultad de Geología. Universidad de Oviedo. Manuscrito recibido el 14 de abril de 1982.

La emisión acústica o actividad microsísmica (A.E./M.A.) fue descubierta por Obert (Obert, 1939, 1940, 1941) al realizar un experimento en una mina de plomo y zinc del NE de Oklahoma (U.S.A.). El experimento tenía por objeto determinar si la propagación de ondas sísmicas inducidas, a través de los pilares de las minas dependía de la carga que soportaban. Para ello se colocaron dos geófonos en el pilar a una distancia conocida; se pretendía que cuando llegase una onda, producida por impacto, al primer geófono se disparase un temporizador, y cuando dicha onda llegase el segundo, se parase. Conociendo el tiempo y la distancia entre los geófonos se calcularía la velocidad de la onda. Sin embargo, inexplicablemente, el temporizador se disparaba prematuramente, llegándose a la conclusión de que la roca, bajo condiciones tensionales, generaba ondas elásticas. Posteriormente Obert y Duval (1942, 1945a

1945b) observaron el mismo fenómeno en otras minas, pero en esta ocasión no fue difícil identificar las fuentes de estas señales, que evidenciaban los altos esfuerzos presentes, y que se manifestaban por frecuentes derrumbamientos.

Este tipo de ondas elásticas, generadas en el seno del medio rocoso, se denomina emisión acústica, y suele citarse en la bibliografía bajo las denominaciones de «acoustic emission», «microseismic activity», «rock noise», «subaudible noise», «stress wave emission», «elastic shock», «elastic radiation», etc. Su origen parece ser consecuencia de la liberación repentina de una energía de deformación elástica almacenada en la roca, que genera ondas elásticas que, partiendo del punto de origen, atraviesan la roca hasta la superficie, donde se pueden captar mediante transductores (Hardy, 1972).

Como ejemplos familiares de emisión acústica podemos citar el crujido de la madera sometida

a cargas cercanas a la fractura y el ruido producido por la rotura de una roca, ya que se trata de vibraciones audibles fácilmente sin ayuda de ningún aparato amplificador. Pero con la ayuda de instrumentación apropiada se pueden captar también ondas de frecuencia subaudible y que forman parte también de la emisión acústica. Por esto, el término de «emisión acústica» ha sido aceptado en todo el mundo para describir sonidos de bajo nivel u ondas de presión en materiales.

Como medida de la A.E. se utiliza la velocidad de emisión acústica («noise rate» o «A.E. rate») expresada en sucesos por segundo, siendo un suceso cada uno de los cambios físicos producidos en el material y que es capaz de generar emisión acústica. Cada suceso está formado por un número variable de «counts» (cuentas), definiéndose un «count» como cada uno de los máximos del tren de ondas, por encima del umbral de ruido de fondo del registro, originado en cada suceso.

La A.E. es muy sensible a inestabilidades locales transitorias. Cuando un material se somete a nuevos estados tensionales, desarrollará condiciones inestables locales antes de que se haga inestable toda la masa. Estas condiciones dan como resultado movimientos dinámicos, tales como la formación de bandas de deslizamiento (slipbands), propagación de cracks, reorientación repentina de bordes de grano, etc.

En los materiales geológicos aún no se conoce completamente el significado de la emisión acústica, si bien parece estar relacionada con los procesos de deformación y rotura, como pueden ser dislocaciones de las redes cristalinas, o, a nivel superior, maclaciones mecánicas, movimientos entre los contactos de los granos o iniciación y propagación de fracturas inter e intracristalinas (Hardy 1959, 1972; Montoto et al 1981 a, b; Suárez del Río 1982).

Entre las aplicaciones muy diversas que han encontrado las técnicas de emisión acústica pueden citarse: observar la integridad estructural de cámaras de presión para industrias nucleares y petrolíferas, cajas de motores de cohetes, puentes, edificios, etc., ya que la presencia de cracks en sus estructuras modifica el nivel de carga al que comienza la deformación plástica, alterando, por tanto, las observaciones de A.E. a medida que se carga la estructura.

En el campo de los materiales geológicos, la auscultación de la emisión acústica es una

buena técnica para investigar su comportamiento deformacional y su rotura. De esta manera, además de las investigaciones de laboratorio, se ha utilizado en la predicción de hundimientos de minas (Leighton y Steblay 1975, llegaron a detectar pequeños derrumbes del techo de una mina con una precisión de ± 25 m y con un adelanto de 2 horas respecto al hundimiento), estabilidad de taludes y presas, almacenamiento de gases en rocas porosas y almacenamiento de fluidos en cavernas naturales profundas, almacenamiento de residuos radiactivos, etc. Más concretamente, en la minería del carbón, esta técnica ha sido utilizada para la predicción de explosiones de roca y gas y golpes de techo (Grezl et al 1981; Leighton 1981; etc.), control de la eficacia de voladuras para la liberación de esfuerzos («destressing blasting») (Zuberek 1973), localización de mineros atrapados (National Academy of Engineering 1969), etc.

En la bibliografía española consultada se trata de una técnica reciente, ya que sólo Granda (1978), Calleja (1981), Montoto et al (1981 a y b) y Suárez del Río (1982) hacen uso de ella en la investigación geomecánica.

No obstante, la posible aplicación de las técnicas de emisión acústica a problemas de obra no ha hecho más que empezar, lo cual hace suponer que, en el futuro, su utilización se incrementará notablemente.

INSTRUMENTACION

El equipo básico necesario para la detección y registro de la A.E. es relativamente simple en su concepción. Consta de un sistema de captación (o transductor), que transforma la onda elástica recibida en una señal eléctrica, un sistema de amplificación para aumentar el nivel de esta señal y un sistema monitor para registrar las señales detectadas (Fig. 1).

Los sistemas de detección y registro de la A.E. pueden ser monocanales o multicanales, según que registren información de uno o más transductores; el primer sistema, aunque es el más antiguo y no permite la localización precisa de la zona geomecánicamente perturbada, fuente de dicha emisión acústica, es sin duda el más utilizado hoy en día y constituye, en la mayoría de las ocasiones, una más sencilla introducción a esta técnica. Los multicanales, con

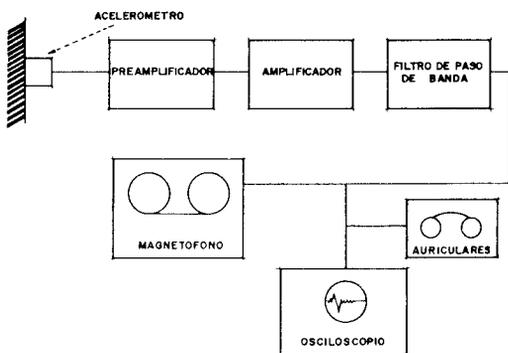


Fig. 1.—Bloque diagrama del sistema básico de captación y registro de la emisión acústica.

una mayor complejidad instrumental e interpretativa, proporcionan una visión más real del medio geológico en estudio, siempre que la ubicación de sus captadores responda a criterios geoestructurales y de obra.

TRANSDUCTORES

Para describir el movimiento a que está sometido el medio rocoso en contacto con el transductor, a causa de la llegada de la onda elástica, pueden utilizarse tres criterios de medición: desplazamiento, velocidad o aceleración del citado microvolumen de roca; según sea el criterio seleccionado, así será el tipo de captador utilizado. En términos generales, los medidores de velocidad y acelerómetros son más recomendables para el análisis de señales de alta frecuencia, mientras que para bajas frecuencias son más sensibles los medidores de desplazamiento.

Esta cuestión de las frecuencias significativas en la A.E. producida en medios geológicos no ha sido aún motivo de acuerdo entre los distintos autores que desde antiguo investigan en este campo. Así, Blake y Leighton (1970) consideran que estas señales contienen muchos componentes de altas frecuencias, y también Suzuki et al (1964) encontraron concentración de frecuencias en el rango 16-32 KHz. Por el contrario, Cook (1963) observó que la mayor parte de los sucesos se situaban entre 20 y 50 Hz. Por consiguiente, el proceso previo a seguir en un área desconocida consistirá en un análisis preliminar de la distribución de frecuencias generadas.

Debe recordarse, desde el punto de vista físico, que los diferentes componentes de fre-

cuencia contenidos en una onda elástica atravesarán el material rocoso bajo diferentes velocidades, por lo que existirá un retraso tanto en el espacio como en el tiempo. A su vez, la atenuación de la señal aumenta rápidamente con su frecuencia, por lo que, en la práctica, muchas de las frecuencias originadas en la zona de perturbación no llegarán a los captadores.

Blake et al (1974) recomiendan medidores de velocidad para rocas blancas y bajos niveles de carga, en los que los ruidos generados poseen frecuencias inferiores a 500 Hz, y acelerómetros para rocas resistentes y/o altos esfuerzos (frecuencias por encima de 500 Hz).

AMPLIFICADORES

La señal eléctrica procedente del captador es de alta impedancia y de un nivel del orden de micro o milivoltios; es por ello que requiere una inmediata amplificación, mediante un preamplificador (a menudo instalado en el propio captador) que proporciona una señal de baja impedancia con una adecuada relación señal/ruido que permita su transmisión sin pérdida de la información. Otras veces el captador se conecta al sistema de amplificación (externo) mediante cable de baja impedancia y corta longitud a fin de evitar perturbaciones por eventuales campos magnéticos en la zona. Esta es la razón por la que ambos (transductor y preamplificador) se insertan conjuntamente, en especial en localizaciones profundas o lejanas como las que se plantean a lo largo de una perforación de sondeo.

El preamplificador va conectado a un sistema amplificador, instrumental y funcionalmente más complejo, y cuya ubicación ya no es tan crítica, por lo que suele instalarse en una laboratorio más o menos permanente en la zona en estudio. La misión de este amplificador es proporcionar la adecuada información a los equipos de tratamiento y registro. Se le exige una alta planeidad en su respuesta y una anchura de banda del orden de varias veces superior a la del captador. Por otra parte, se le exigirá una correcta variación en la ganancia, aspecto de gran interés en A.E. donde suelen situarse en el rango 40-100 db.

Acoplado al sistema amplificador deberá incluirse un equipo de filtros que permitan seleccionar la banda de frecuencias que se desee

analizar, y que a su vez sirva para eliminar el denominado «ruido cultural» producido por la actividad humana (maquinaria, transportes, etc.), el cual se sitúa en el entorno 20 Hz - 20 KHz. Este aspecto del filtrado es crucial, en cuanto que puede eliminar información muy significativa desde el punto de vista geomecánico, y su tratamiento, así como el de toda la información de ondas elásticas que estamos comentando, suele tenderse a realizar mediante procedimientos informáticos de proceso de señales (Mowrey 1980).

REGISTROS

Los procedimientos y posibilidades en este punto son muy variables y, desde luego, enfocados a las propias necesidades del tema problema.

a) *Monitor visual y auditivo.*—Es el sistema más rudimentario y que permite una inmediata constatación de la actividad; en esencia consta de unos auriculares y un osciloscopio conectados al amplificador. Permite conocer las características de la señal recibida, pero pierde constantemente información al no permitir su almacenamiento.

b) *Registro de baja velocidad.*—Los registros oscilográficos, así como los registros gráficos, permiten visualizar y registrar mayor cantidad de información, tal como el momento de generación de la A.E., número de sucesos, transductor que ha captado un determinado suceso, etc.

c) *Registro de alta velocidad.*—Para un óptimo almacenamiento de la información proporcionada por los equipos ubicados en el terreno y su posterior análisis en laboratorio, se requiere una grabadora magnética en FM, o convertidores analógico-digitales conectados a un ordenador. En este caso, se obtiene la misma información que la comentada en los casos anteriores, más otra más sofisticada, como los tiempos de llegada de ondas P y S, precisa localización de las perturbaciones, magnitud de éstas, etc.

Por contrapartida, estos sistemas exigen una mayor infraestructura investigadora e inversión económica. En ocasiones se trata de auténticas estaciones de recogida, transmisión y proceso de señales a lo largo de las 24 horas del día, involucrándose emisoras de FM que transmiten la información desde el terreno al propio laboratorio (Hardy 1980).

EMISION ACUSTICA EN LA MINERIA DEL CARBON

La realización de operaciones mineras de avance de galerías y explotación impone al macizo rocoso unas nuevas condiciones tensionales que dan lugar a reajustes internos en su seno. Esta nueva situación puede producir concentraciones de esfuerzos en algunas zonas, llegando a superar la resistencia de la roca, originando las denominadas «explosiones de roca» (rock bursts) y los «golpes de techo» (rock falls), que son causa de los accidentes más importantes que ocurren en la minería del carbón. Estas concentraciones de esfuerzos son, lógicamente, más acusadas en las minas más profundas (p. ej. las europeas) que en las más superficiales (las minas de carbón en U.S.A. no suelen sobrepasar los 200 m), con lo cual en aquellas existirá un mayor peligro de accidentes.

Frecuentemente se ha mencionado que las explosiones de roca van precedidas por señales audibles en el área de fractura unos 5 ó 10 segundos antes de producirse. Lógicamente, este tiempo es insuficiente para permitir a los trabajadores protegerse contra los efectos de la explosión. Estos ruidos audibles han sido atribuidos a la formación de grandes cracks durante los últimos estadios del proceso de rotura. No obstante, la rotura de un material rocoso no es un proceso instantáneo, sino que, por el contrario, se inicia con la generación de pequeñas fisuras aisladas, en zonas generalmente localizadas, cuyo crecimiento y coalescencia conduce al colapso total de la roca. Por tanto, la emisión acústica generada durante dicho proceso de concentración tensional y fisuración interna puede utilizarse, con suficiente antelación, como un indicador previo a la explosión de roca o golpe de techo.

Dado que el incremento en energía liberada durante la formación de cracks se traduce en una mayor velocidad de sucesos o «counts», debe utilizarse este criterio como premonitorio del peligro de accidente. Esto no quiere decir que sólo se vaya a registrar A.E. en las zonas de peligro de accidentes, sino que también en las zonas estables puede haber generación de micro-ruidos. La diferencia existente es que, en las zonas ya estabilizadas o en las áreas que se adaptan favorablemente a los nuevos esfuerzos, se generan micro-ruidos a una velocidad de A.E. constante, y que, en ocasiones, puede

disminuir, mientras que en las zonas inestables cambia esta velocidad radicalmente (Leighton y Steblay 1977).

Así, Trombik y Zuberek (1977), por ejemplo, en unas minas de carbón polacas, observaron que unas horas antes de suceder una explosión de roca, se originaba un aumento de la actividad microsísmica que excedía notablemente el nivel medio anterior. Utilizando estas medidas preventivas, junto con otras de distinta naturaleza, se ha conseguido una disminución desde 300 explosiones de roca por año, hace algún tiempo, hasta unas 20 explosiones anuales en la actualidad.

Respecto a las explosiones de roca, hay que tener en cuenta que, además de las concentraciones locales de esfuerzos, va a tener una gran importancia la presión de los gases existentes en las capas de carbón. Las concentraciones tensionales van a producir fracturaciones locales de dichas capas, con lo cual se producirá una saturación de gas libre a altas presiones en la zona fracturada que va a favorecer la aparición de explosiones de roca y gas. Teniendo en cuenta estos mecanismos, se han desarrollado diversas técnicas para liberar la concentración de esfuerzos y la presión del gas. Una de ellas, de resultados muy satisfactorios consiste en realizar una serie de sondeos paralelamente o ligeramente oblicuos a la dirección de avance de los trabajos mineros.

Nakajima et al (1981), colocando dos transductores tres metros por debajo de la capa de carbón, en sendos sondeos, han podido estimar la relajación de esfuerzos producida mediante este método, así como la localización de las zonas de concentración de tensiones, mediante la auscultación de la emisión acústica. Así se llegó a la conclusión de que la actividad microsísmica relacionada con el avance del sondeo se mantenía a niveles bajos en las zonas relajadas y a niveles altos en las regiones con concentraciones locales de esfuerzos (Fig. 2).

LOCALIZACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN ACÚSTICA

Para la localización espacial de la zona en la que se están generando los micro-ruídos es necesario, como previamente se ha mencionado, un sistema de registro multicanal que reciba la

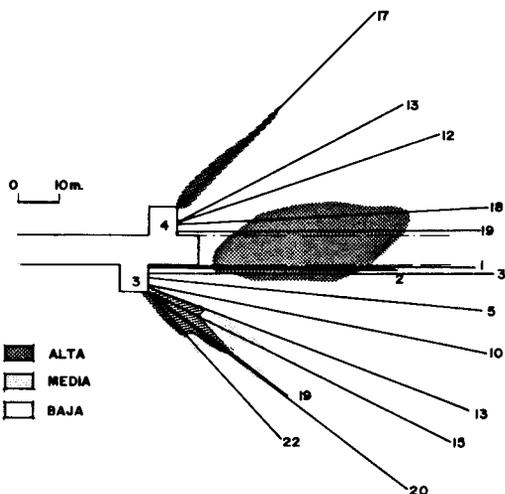


Fig. 2.-Zonas de concentraciones locales de esfuerzos determinadas a partir de su emisión acústica (según Nakajima et al 1981).

información captada por los distintos transductores.

El sistema de instalación de los transductores es condicionante para la correcta captación de las señales y es una exigencia ineludible el conseguir un perfecto contacto entre los transductores y la roca. Estos captadores pueden ir colocados en el interior de sondeos realizados en las capas de carbón o en las rocas encajantes, e incluso cementados en el techo de las galerías de la mina.

Hardy (1977) presenta cuatro modos de instalación de éstos, desde la superficie (Figs. 3 y 4), (con las ventajas de que no existen limitaciones eléctricas sobre el sistema monitor y, además, el control no produce interferencias en las operaciones mineras normales), indicando que el montaje en superficie (A) es el menos satisfactorio, mientras que el montaje mediante sondeo profundo (D) es el más aconsejable, si bien el más costoso.

La localización de las fuentes de la emisión acústica se basa en que la distancia de la fuente a cada captador puede determinarse por métodos geométricos y por métodos sísmicos. Las ecuaciones básicas para el cálculo de la distancia son:

$$d_i = [(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2 + (z - c_i)^2]^{1/2}$$

$$d_i = V_i \cdot t_i$$

siendo

a_i, b_i, c_i = coordenadas del transductor i

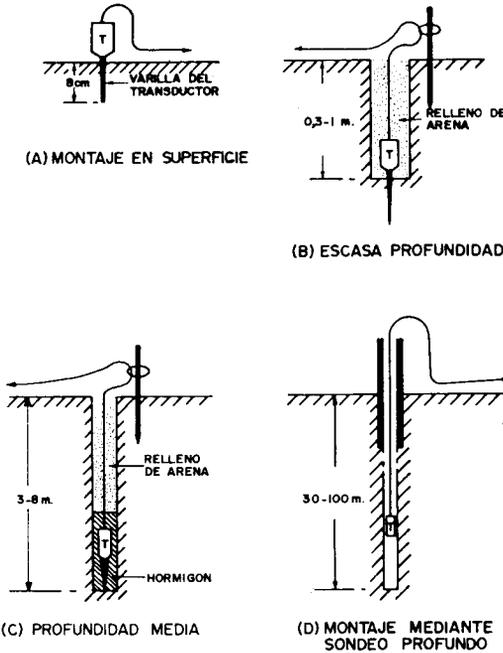


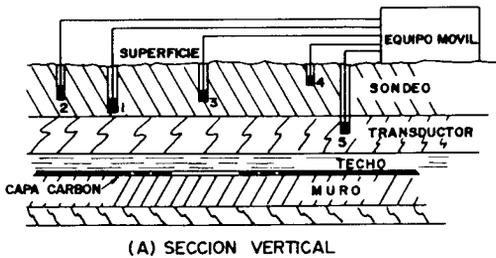
Fig. 3.—Diversos métodos de instalación de los transductores en investigaciones de campo (según Hardy 1977).

x, y, z = coordenadas de la fuente
 d_i = distancia de la fuente al transductor i
 t_i = tiempo de tránsito de la onda desde la fuente al transductor i
 V_i = velocidad de las ondas sísmicas desde la fuente al transductor i

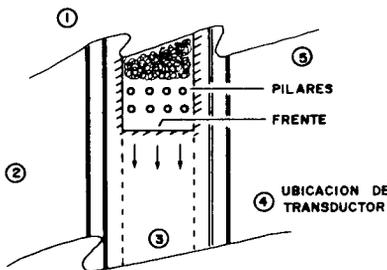
Sustituyendo en estas ecuaciones los datos de localización de los transductores, calculados previamente, y los suministrados por el sistema de registro para un suceso dado, pueden calcularse las coordenadas espaciales de la fuente.

Teniendo en cuenta que en estas ecuaciones existen cuatro incógnitas (x, y, z, t_i) se necesita haber registrado el suceso al menos en cuatro captadores. Sin embargo, debido a los posibles errores de exactitud del resto de los valores que se incluyen en las ecuaciones (p. ej., localización exacta de los captadores, velocidad de las ondas sísmicas, diferencias del tiempo de llegada de las ondas a los diferentes captadores), se recomienda que la señal sea recibida por cinco o más captadores, con el fin de minimizar los errores de localización de las fuentes (Mowrey 1977).

En términos generales, debe resaltarse la dificultad que entraña en ocasiones la exacta localización de las fuentes de la emisión acústica debido a la anisotropía de propagación de las ondas sísmicas que poseen la mayor parte de los materiales rocosos. Esta dificultad se puede solventar, en mayor o menor grado, haciendo detonar, una vez colocados los transductores en el terreno, una carga de explosivos y calculando la velocidad de propagación de las ondas producidas desde el punto de explosión hasta los diferentes transductores, construyendo, de este modo, un modelo anisótropo de propagación de las ondas elásticas.



(A) SECCION VERTICAL



(B) SECCION EN PLANTA

Fig. 4.—Sección vertical y en planta (simplificada) de la galería de una mina de carbón, y disposición, desde la superficie, de los captadores de la emisión acústica (según Hardy 1977).

REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS

Los datos obtenidos pueden representarse gráficamente, suministrando información espacial respecto a las zonas potencialmente inestables y también expresando la predicción en el tiempo de posibles accidentes.

1) *Gráficos de localización de las fuentes.*—Consiste en representar sobre un mapa de la mina la localización de las fuentes de emisión acústica, anotando el número de sucesos en un cierto período de tiempo (generalmente un día).

De esta manera puede controlarse diariamente la estabilidad de la zona, teniendo en cuenta que las áreas de rotura pueden localizarse comparando los registros diarios. Los ruidos producidos por las operaciones mineras se reconocen por su proximidad a las zonas de trabajo, y, si el área es estable, van avanzando con las labores mineras. Por este motivo es aconsejable comparar estos registros con los trabajos de expansión minera realizados en la zona objeto de estudio. Los criterios de discriminación de A.E. de tipo «cultural» mediante análisis de frecuencias se han expuesto en el apartado «Instrumentación».

Un modo más efectivo de controlar las zonas inestables consiste en representar la localización de las fuentes en gráficos acumulativos, es decir, durante un período más largo de tiempo, sumando los sucesos diarios.

No obstante, estos gráficos, si bien indican las posibles áreas de rotura, no proporcionan información efectiva respecto a cuándo puede suceder el accidente.

2) *Gráficos de determinación de la emisión acústica.*—Este diagrama se basa en representar el número de sucesos en un área dada respecto al tiempo, con lo cual nos permite predecir con anterioridad la posible aparición de zonas inestables.

Numerosos autores (Frantti 1977; Trombik y Zuberek 1977; Leighton y Steblay 1977; etc) han observado que la emisión acústica aumenta dramáticamente minutos antes (e incluso horas) de producirse un golpe de techo o una explosión de roca, sucediendo momentos después del clímax de la emisión acústica (Fig. 5).

3) *Gráficos de energía de la emisión acústica.*—Consiste en determinar la energía relativa

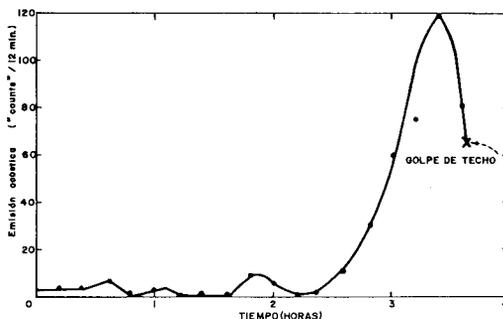


Fig. 5.—Emisión acústica respecto al tiempo antes de producirse un golpe de techo (según Leighton y Steblay 1977).

liberada por el material rocoso en forma de impulsos microsísmicos. Esta energía se calcula con el cuadrado de la amplitud de los sucesos registrados durante un tiempo dado.

Trombik y Zuberek (1977) observaron que la curva acumulativa de la energía liberada en un área determinada es normalmente una recta cuya pendiente es más o menos constante. Las desviaciones de esta recta, durante un cierto tiempo, se pueden utilizar como indicativos de la inminencia de una explosión de roca.

CONCLUSIONES

Las ondas elásticas (emisión acústica o actividad microsísmica) generadas en un medio rocoso sometido a tensiones están producidas por la repentina liberación de energía de deformación elástica almacenada en la roca y constituyen un excelente criterio premonitorio utilizado con éxito en la minería del carbón para la predicción y localización de inestabilidades geomecánicas tales como golpes de techo, explosiones de roca, etc.

BIBLIOGRAFIA

- Blake, W y F. Leighton (1970).—Recent developments and applications of the Microseismic method in deep mines. *Proc. 11th. Symp. on Rock Mechanics*, (Berkeley 1969), 429-443, AIME, New York.
- Blake, W.; F. Leighton y W. I. Duvall (1974).—Microseismic techniques for monitoring the behaviour of rock structures. *USBM Bulletin* 665, 65 pp.
- Calleja, L. (1981).—*Estudio petrofísico de materiales graníticos gallegos: Emisión Acústica*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, Univ. de Oviedo.
- Cook, N.G.W. (1963).—The seismic location of rockbursts. In: C. Fairhurst (Ed.), *Rock Mechanics, Proc. 5th. Symp. on Rock Mechanics*, 493-516, Pergamon Press, New York.
- Frantti, G. E. (1977).—Seissions and surface waves related to geologic structures. *Proc. Ist. Conf. on AE/MA in Geologic structures and Materials* (Pennsylvania State University, Junio 1975), Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany.
- Granda, J. R. (1978).—*Valoración cuantitativa de la fisuración interna de las rocas en función de los esfuerzos compresivos uniaxiales*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, Univ. de Oviedo.
- Grezl, K.; L. Leung y M. Ahmed (1981).—Development of seismoacoustic monitoring techniques for underground coal mines in Australia. *Proc. 3rd. Conf. on AE/MA in Geologic structures and Materials* (Pennsylvania State

- University, Octubre 1981), Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany.
- Hardy, H.R., Jr. (1959).—Time-dependent deformation and failure of Geological materials. *Proc. 3rd. Symp. Rock Mechanics, Quarterly Colorado School of Mines*, 54, 134-175.
- Hardy, H. R., Jr. (1972).—Application of acoustic emission techniques to rock Mechanics research. *Acoustic Emission*, ASTM, STP 505, 41-83.
- Hardy, H. R., Jr. (1977).—Monitoring the stability of Geologic structures using near-surface microseismic transducers. *Proc. 1st. Conf. on AE/MA in Geologic structures and Materials* (Pennsylvania State University, Junio 1975), Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany.
- Hardy, H. R., Jr. (1980).—Stability monitoring of an underground gas storage reservoir. *Proc. 2nd. Conf. on AE/MA in Geologic structures and Materials* (Pennsylvania State University, Noviembre 1978), Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany.
- Leighton, F. (1981).—Microseismic activity associated with outbursts in coal mines. *Proc. 3rd. Conf. on AE/MA in Geologic structures and Materials* (Pennsylvania State University, Octubre 1981), Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany.
- Leighton, F. y B. F. Steblay (1975).—Coal mine bounce and roof fall research. *Proc. 1st. Symp. Underground Mining* (Louisville, octubre 1975), 2, 104-119.
- Leighton, F. y B. F. Steblay (1977).—Applications of microseismics in Coal mines. *Proc. 1st. Conf. on AE/MA in Geologic structures and Materials* (Pennsylvania State University, Junio 1975), Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany.
- Mowrey, G. L. (1977).—Computer processing and analysis of microseismic data. *Proc. 1st. Conf. on AE/MA in Geologic structures and Materials* (Pennsylvania State University, Junio 1975), Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany.
- Mowrey, G. L. (1980).—Computer processing of low-level microseismic signals. *Proc. 2nd. Conf. on AE/MA in Geologic structures and Materials* (Pennsylvania State University, noviembre 1978), Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany.
- Montoto, M., L. M. Suárez del Río, A. W. Khair y H. R. Hardy, Jr. (1981 a).—Acoustic emission behaviour of sound to weak granites: petrographic interpretation. *Proc. Int. Symp. on Weak Rocks* (Tokyo), Balkema, Rotterdam.
- Montoto, M., L. M. Suárez del Río, A. W. Khair y H. R. Hardy, Jr. (1981 b).—A. E. in uniaxially granitic rocks in relation to their petrographic character. *Proc. 3 rd. Conf. on AE/MA in Geologic structures and Materials* (Pennsylvania State University, octubre 1981), Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
- Nakajima, I., Y. Watanabe y T. Fuka (1981).—Acoustic emission during advance boring associated with the prevention of coal and gas outbursts. *Proc. 3rd. Conf. on AE/MA in Geologic structures and Materials* (Pennsylvania State University, octubre 1981), Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany.
- National Academy of Engineering (1969).—*Mines rescue and survival. Committee on Mine rescue and Survival Techniques*. National Technical Information Service, PB 191 691.
- Obert, L. (1939).—*Measurement of pressures on rock pillars in underground mines* (Part I). U. S. Bureau of Mines, RI 3444.
- Obert, L. (1940).—*Measurement of pressures on rock pillars in underground mines* (Part II). U. S. Bureau of Mines, RI 3521.
- Obert, L. (1941).—*Use of subaudible noise for prediction of rock bursts* (Part I). U. S. Bureau of Mines, RI 3555.
- Obert, L. y W. I. Duvall (1942).—*Use of subaudible noise for prediction of rock bursts* (Par II). U. S. Bureau of Mines, RI 3654.
- Obert, L. y W. I. Duvall (1945 a).—*Microseismic method of predicting rock failure in underground mining* (Part I, General Method). U. S. Bureau of Mines, RI 3797.
- Obert, L. y W. I. Duvall (1945 b).—*Microseismic method of predicting rock failure in underground mining* (Par II, Laboratory experiments). U. S. Bureau of Mines, RI 3803.
- Suárez del Río, L. M. (1982).—*Estudio petrofísico de materiales graníticos geomecánicamente diferentes*. Tesis Doctoral. Facultad de Geología, Universidad de Oviedo.
- Suzuki, T., K. Sasaki, Z. Siohara y T. Hirota (1964).—A new approach to the prediction of failure by rock noise. *4th. Int. Conf. on Strata control and Rock Mechanics*. Henry Krumb School of Mines, Columbia University, New York, 99-107.
- Trombik, M. y W. Zuberek (1977).—Microseismic research in Polish coal mines. *Proc. 1st. Conf. on AE/MA in Geologic structures and Materials* (Pennsylvania State University, junio 1975). Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany.
- Zuberek, W. (1973).—Microseismic characteristic of solid coal failure under the effect of destressing blasting. *Prace GIG Komunikat*, 595, Katowice.