



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

PROYECTO DE INVESTIGACION DE DERRABES DE CARBON

ANEJO IX

Utilización de las técnicas geofísicas en la prevención de derrabes

Geocontrol, S.A - Proyecto de derrabes de carbón



MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA

01115

**UTILIZACION DE LAS
TECNICAS GEOFISICAS EN LA
PREVENCION DE DERRABES**

UTILIZACION DE LAS TECNICAS GEOFISICAS EN LA PREVENCION DE DERRABES

1.- INTRODUCCION.

2.- TECNICAS APLICABLES.

3.- ESTADO ACTUAL DE LAS TECNICAS APLICABLES.

3.1. Geo-radar.

3.1.1. Fundamentos.

3.1.2. Aplicaciones típicas.

3.1.3. Aplicaciones a la minería del carbón.

3.1.4. Posible aplicación a la detección de derrabes.

3.2. Tomografías sísmicas.

3.2.1. Fundamentos.

3.2.2. Equipos utilizados.

3.2.3. Aplicaciones típicas.

3.2.3.1. Evaluación del estado de una presa de hormigón.

3.2.3.2. Geofísica en capa.

3.2.3.3. Detección de capas.

3.2.4. Posible aplicación a la detección de derrabes.

3.3. Microsísmica.

3.3.1. Fundamentos.

3.3.2. Equipos.

3.3.3. Experiencias en la minería del carbón.

3.3.3.1. Hulleras de Provenza.

3.3.3.2. Mina de Cynheidre, Gales.

3.3.3.3. Cuenca del Aller, HUNOSA.

3.3.4. Posible aplicación a la detección de derrabes.

3.4. Emisión acústica.

3.4.1. Fundamentos.

3.4.2. Equipos.

3.4.3. Aplicaciones típicas.

3.4.3.1. Sistema CAMAC.

3.4.3.1.1. Hardware de adquisición de datos

3.4.3.1.2. Hardware de cálculo

3.4.3.1.3. Software

3.4.3.2. Experiencias en la cuenca de Hokkaido.

3.4.3.3. Experiencias en España.

3.4.3.3.1. Definición de equipos.

3.4.3.3.2. Ensayos de campo.

3.4.3.3.3. Ensayos en mina.

3.4.4. Posibilidad de aplicación a la detección de derrabes.

4.- POSIBLES LINEAS DE INVESTIGACION.

4.1. Posibilidades de las distintas técnicas.

4.2. Planteamientos futuros.

5.- BIBLIOGRAFIA.

UTILIZACION DE LAS TECNICAS GEOFISICAS EN LA PREVENCIÓN DE DERRABES

1.- INTRODUCCION.

El fenómeno del derrabe puede considerarse como una pérdida súbita de cohesión de una masa de carbón producido por la liberación de tensiones previamente acumuladas en una zona de una capa de carbón.

En estas condiciones, parece que el derrabe de carbón es un fenómeno producido en el seno de una masa de carbón de dimensiones importantes; aunque sus consecuencias físicas, volumen de la masa derrabada, sea en general de reducidas dimensiones.

De acuerdo con este planteamiento parece razonable pensar que la masa de carbón, en la que se debe generar el fenómeno de derrabe, debe estar sometida a cambios tensionales que, en razón de su intrínseca heterogeneidad, deben producir una disipación discontinua de energía en las etapas anteriores a la formación del derrabe.

De lo expuesto hasta ahora parece que tanto la detección de los fenómenos de **concentración de tensiones** como del proceso de **liberación de energía** deberían ser un camino válido para prevenir la posible formación de los derrabes.

En este orden de ideas las técnicas geofísicas, que en esencia se basan en la medición de la distribución de una cierta magnitud física en el interior de un cuerpo, parece que podrían ser muy útiles tanto para detec-

tar concentración de tensiones, debido a los evidentes cambios en las propiedades mecánicas de las zonas sometidas a fuertes compresiones, como para detectar la liberación de energía que debe proceder a la degradación mecánica del macizo de carbón antes del derrabe.

En este documento GEOCONTROL, S.A. presenta, en su opinión, el estado actual de desarrollo de las técnicas geofísicas que se podrían utilizar en la prevención de los derrabes y las líneas de investigación que podrían seguirse para aprovechar las posibilidades que actualmente existen.

2.- TECNICAS APLICABLES.

La producción de los derrabes está siempre asociada a zonas de la capa de carbón que están afectadas por los trabajos de explotación; por ello las técnicas geofísicas que se podrían aplicar a la prevención de los derrabes serán aquellas que se puedan emplear sin impedir los trabajos habituales de explotación.

De acuerdo con esto las técnicas que, "a priori", se consideran con más posibilidades son:

- * Geo-radar**
- * Sísmica de refracción**
- * Microsísmica**
- * Emisión acústica**

En los apartados siguientes se presenta el estado actual de desarrollo de estas técnicas y su previsible evolución.

3.- ESTADO ACTUAL DE LAS TECNICAS APLICABLES.

Las técnicas geofísicas, que se han señalado en el apartado anterior, han tenido una utilización muy intensa durante las dos décadas anteriores y, particularmente, en los últimos cinco años han vivido un relanzamiento espectacular debido a la revolución tecnológica que ha supuesto la microinformática, por lo que ha significado en cuanto a capacidad de cálculo y disminución de costes.

En los apartados siguientes se presenta el estado actual de conocimientos en cada una de las técnicas geofísicas indicadas.

3.1. Geo-radar.

Las técnicas del geo-radar han sido intensamente utilizadas durante los últimos diez años como herramienta para la detección de discontinuidades en el subsuelo.

En los apartados siguientes se exponen los fundamentos de esta técnica, los equipos utilizados y las aplicaciones más frecuentes haciendo mención especial a las que se han desarrollado en la minería del carbón.

3.1.1. Fundamentos.

La técnica del geo-radar consiste en registrar y analizar el eco que emite el terreno ante un impulso electro-magnético, cuya frecuencia está comprendida entre 30 y 600 MHz, que previamente se ha transmitido al terreno.

En la Figura N° 1 se presentan esquematizados los componentes para la aplicación de las técnicas de geo-radar que, básicamente, están constituidos por:

- **Unidad transmisora**
- **Unidad receptora**
- **Equipo de control**
- **Registro de señales**

Los impulsos electromagnéticos emitidos penetran en el terreno y cada vez que se encuentran con un material que presenta un contraste en sus propiedades electromagnéticas, respecto al anterior, producen una reflexión que es captada por el receptor. Este proceso continúa, en profundidad, hasta que se amortiguan los impulsos emitidos de tal forma que la señal reflejada no puede ser captada por el receptor.

Si se desplazan el emisor y receptor sobre la superficie del terreno a investigar, se obtiene una señal continua del eco producido por cada material existente en el terreno, tal como se ilustra en la Figura N° 2.

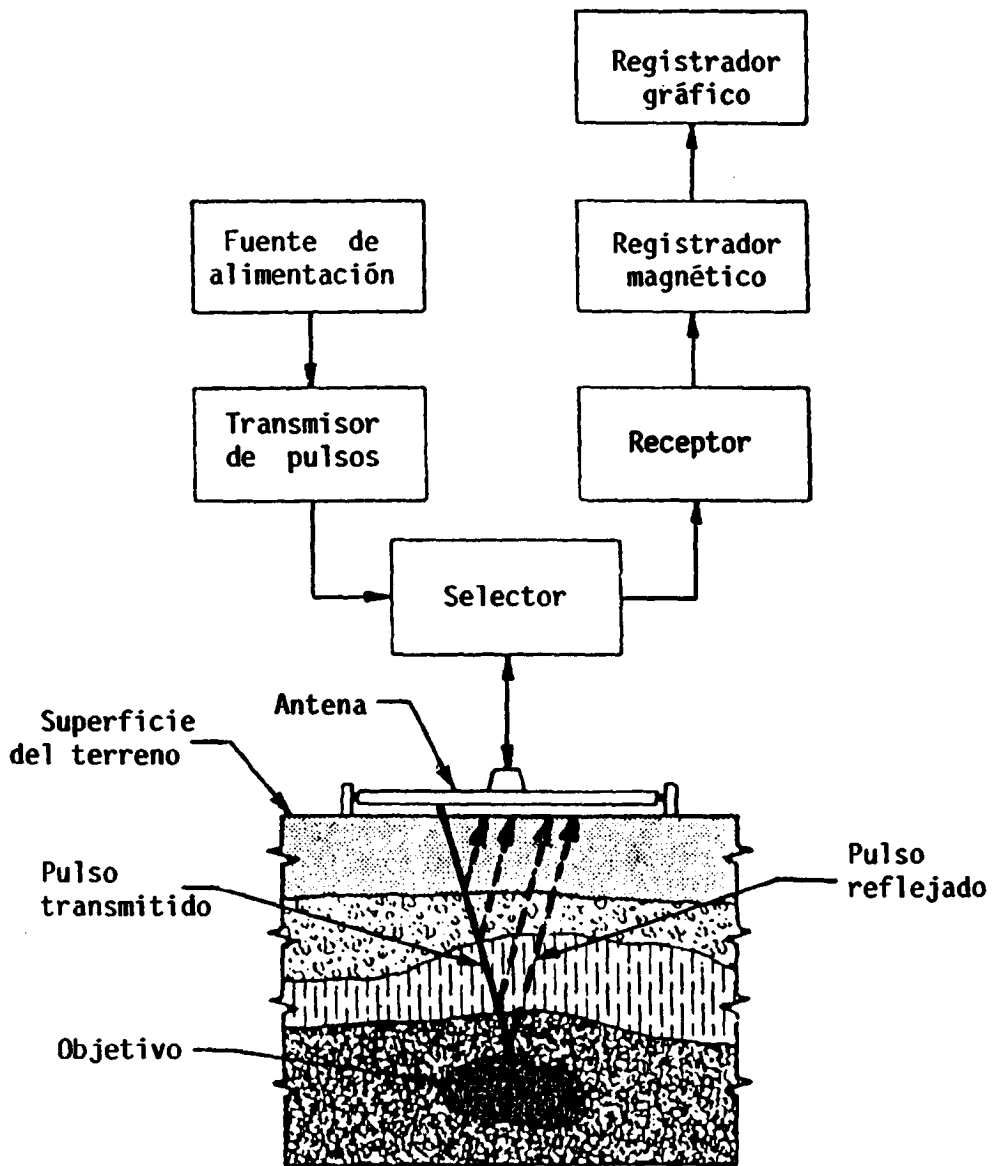


FIGURA Nº 1. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL GEO-RADAR

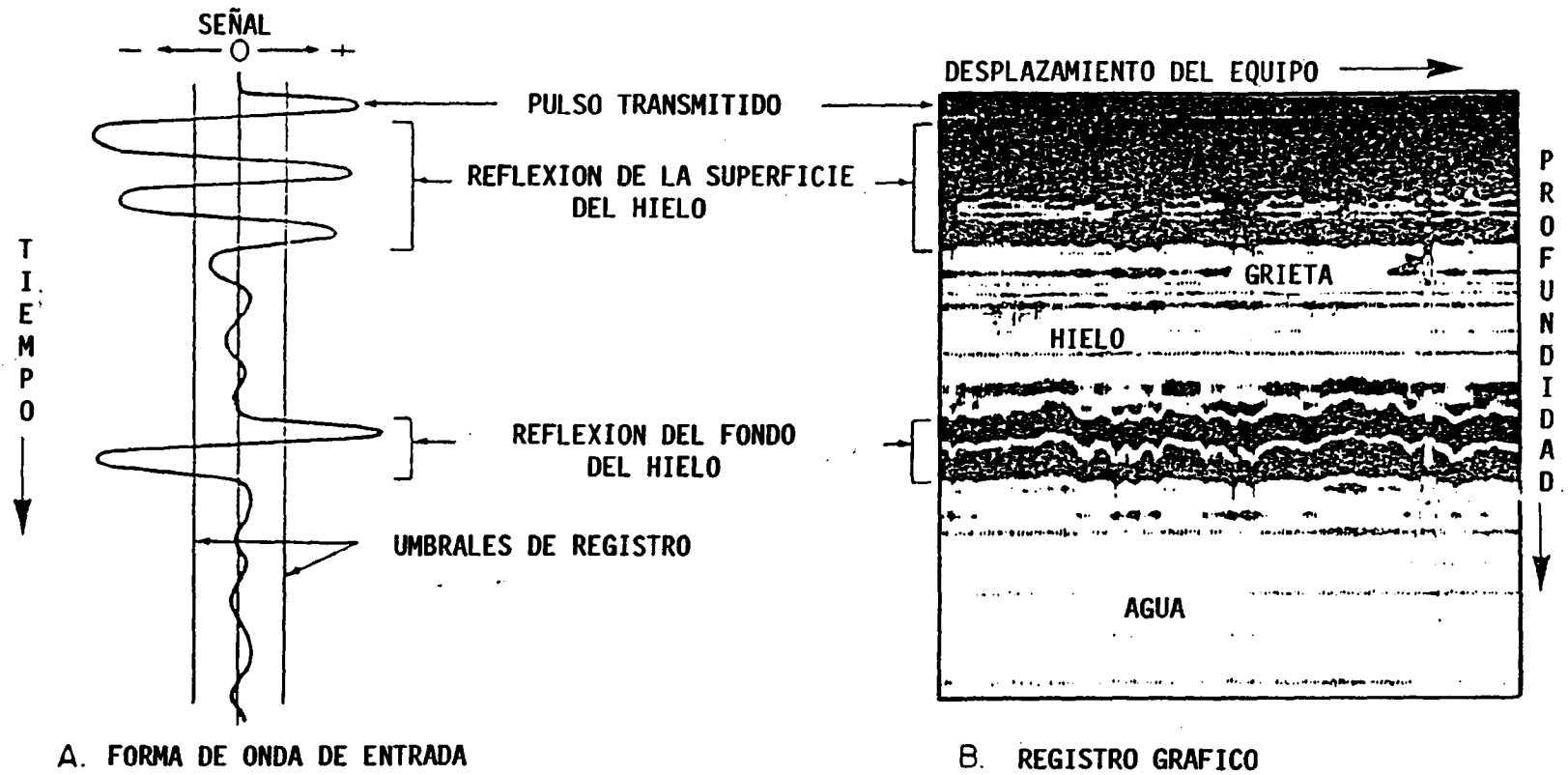


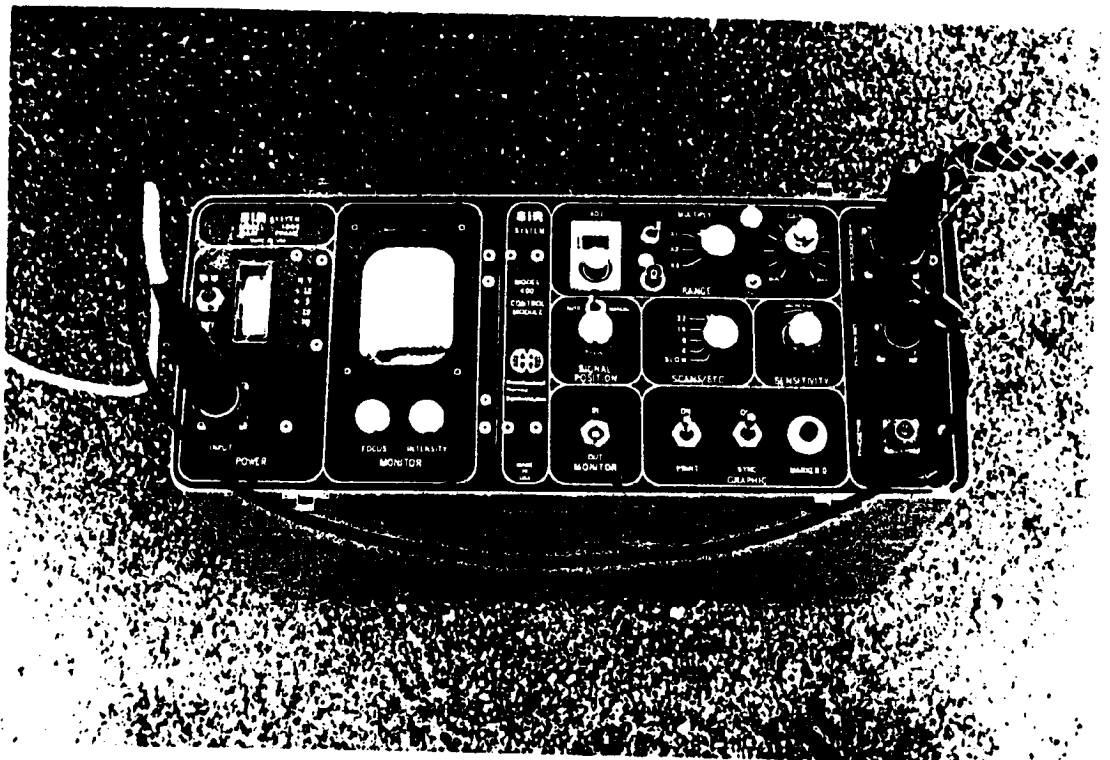
FIGURA N° 2. SEÑAL Y REGISTRO DEL GEO-RADAR

Habitualmente el transmisor y receptor constituyen una unidad física, que se desplaza en contacto con la superficie del terreno a investigar, mientras que el equipo de control y de registro son unidades independientes que pueden permanecer estacionarias y unidas por cable a la unidad emisora-receptora. En la Fotografía N° 1 se muestra un equipo de georadar utilizado recientemente en España y en la N° 2 uno de los registros típicos obtenidos.

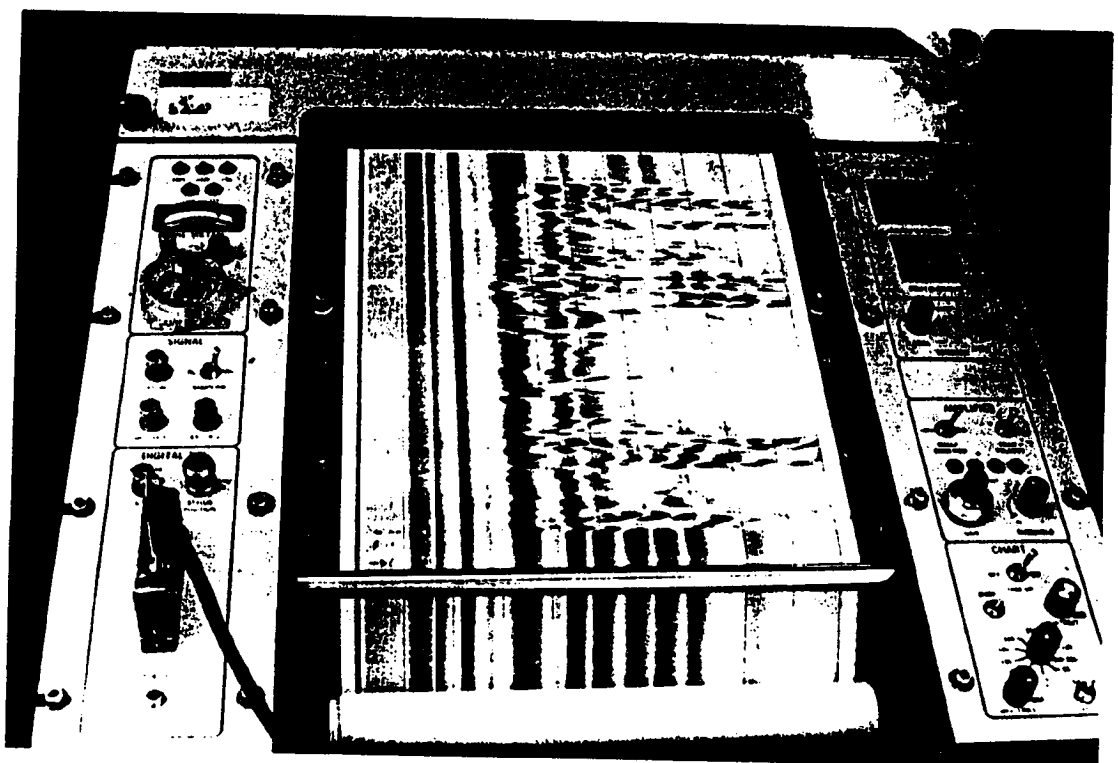
Teóricamente las posibles aplicaciones del geo-radar son muy amplias y, consecuentemente, ya que existen numerosas referencias sobre aplicaciones concretas en las que se llega a tener información suficiente sobre el terreno a profundidades notables. En el Simposio sobre Caracterización Geométrica y Geomecánica de Paneles de Explotación de Carbón en la Minería Subterránea, celebrado en Oviedo en Julio de 1.989, se afirmaba que utilizando frecuencias de 100 MHz las ondas se propagan hasta unos 50 m y que con frecuencias de 50 MHz o menores se puede llegar a distancias mucho mayores.

Sin embargo hay que tener presente que cuanto más baja es la frecuencia de la antena de radar tanto mayor es su tamaño y su peso lo cual limita, desde un punto de vista práctico, las posibles aplicaciones del radar.

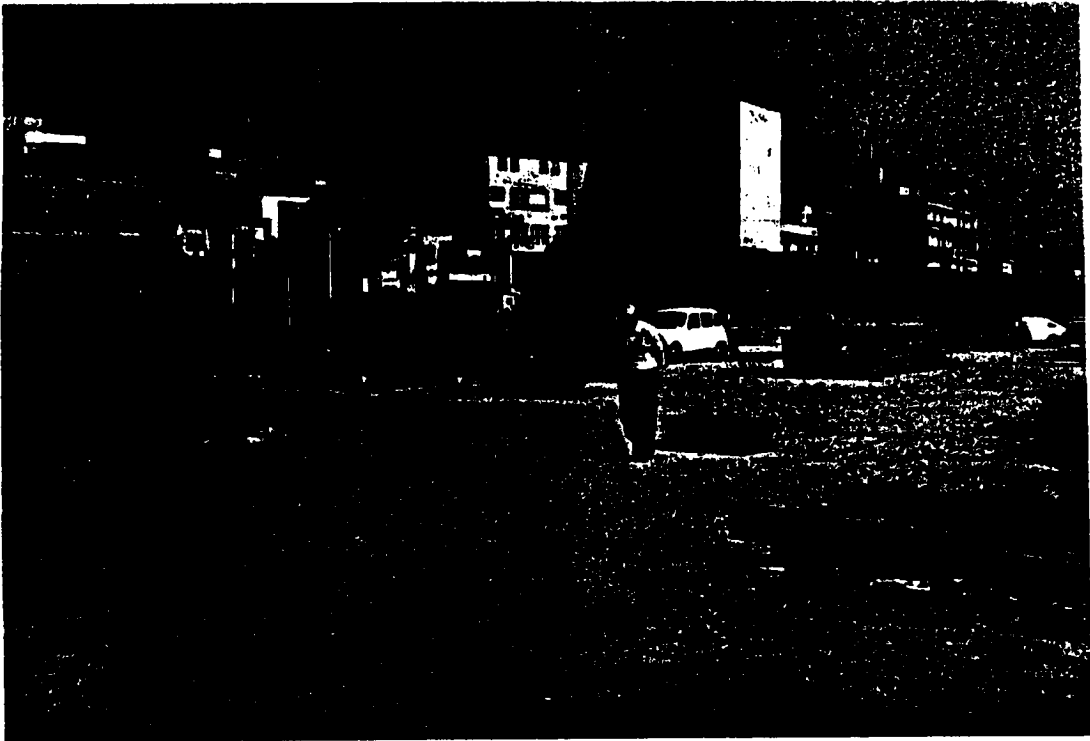
A título indicativo se puede afirmar que las antenas de 200 MHz, 100 MHz y 50 MHz miden respectivamente 0,5 m; 1 m y 1,5 m. En la Fotografía N° 3 se presenta una vista de la utilización real de una antena de radar de 120 MHz.



FOTOGRAFIA N° 1. UNIDAD DE CONTROL DEL GEO-RADAR SIR-4



FOTOGRAFIA N° 2. REGISTRO TIPICO DEL GEO-RADAR



FOTOGRAFIA N° 3. UTILIZACION DE UNA ANTENA DE 120 MHz.

Por todo ello teniendo en cuenta, además, que en las aplicaciones mineras se trabaja habitualmente en condiciones de saturación y que el contraste dieléctrico de los materiales no es muy acusado, hay que afirmar que las distancias en las que el geo-radar se puede considerar efectivo se sitúa entorno a los 10 m dependiendo de la frecuencia con que se trabaje.

3.1.2. Aplicaciones típicas.

Las aplicaciones más usuales de los equipos de geo-radar están orientadas a detectar la existencia de materiales de fuerte contraste de propiedades electromagnéticas a pequeña profundidad de la superficie libre del terreno.

Los ejemplos más típicos de utilización lo constituyen:

- * Detección de tuberías enterradas**
- * Detección de armaduras en estructuras hormigonadas**
- * Detección de cavidades próximas a la superficie.**
- * Detección de la posición del nivel freático.**
- * Detección de fracturas en macizos rocosos.**
- * Determinación de la posición del macizo del terreno en fondos marinos.**

En las Figuras Nº 3, 4 y 5 se presentan los resultados obtenidos en tres aplicaciones típicas del geo-radar.

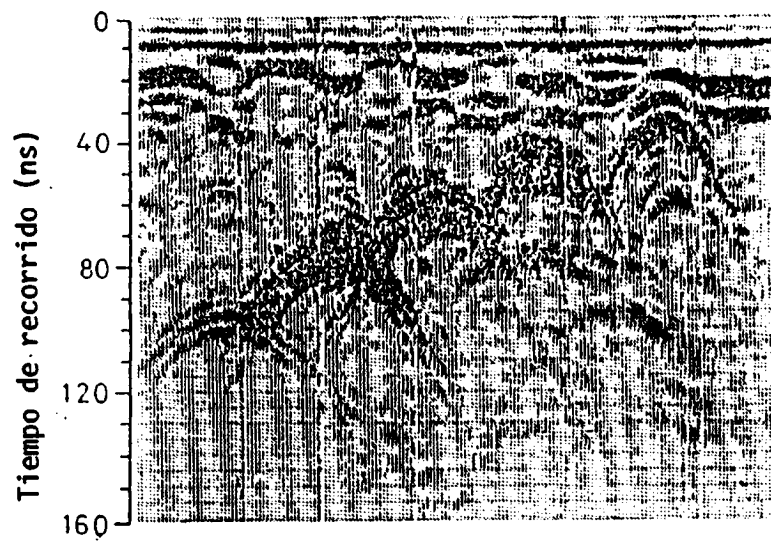
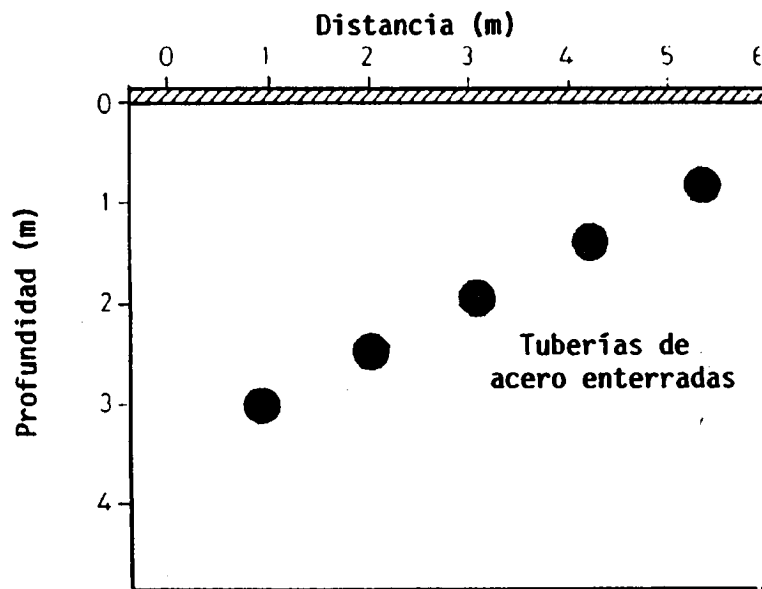


FIGURA Nº 3. DETECCION DE TUBERIAS ENTERRADAS CON EL GEO-RADAR

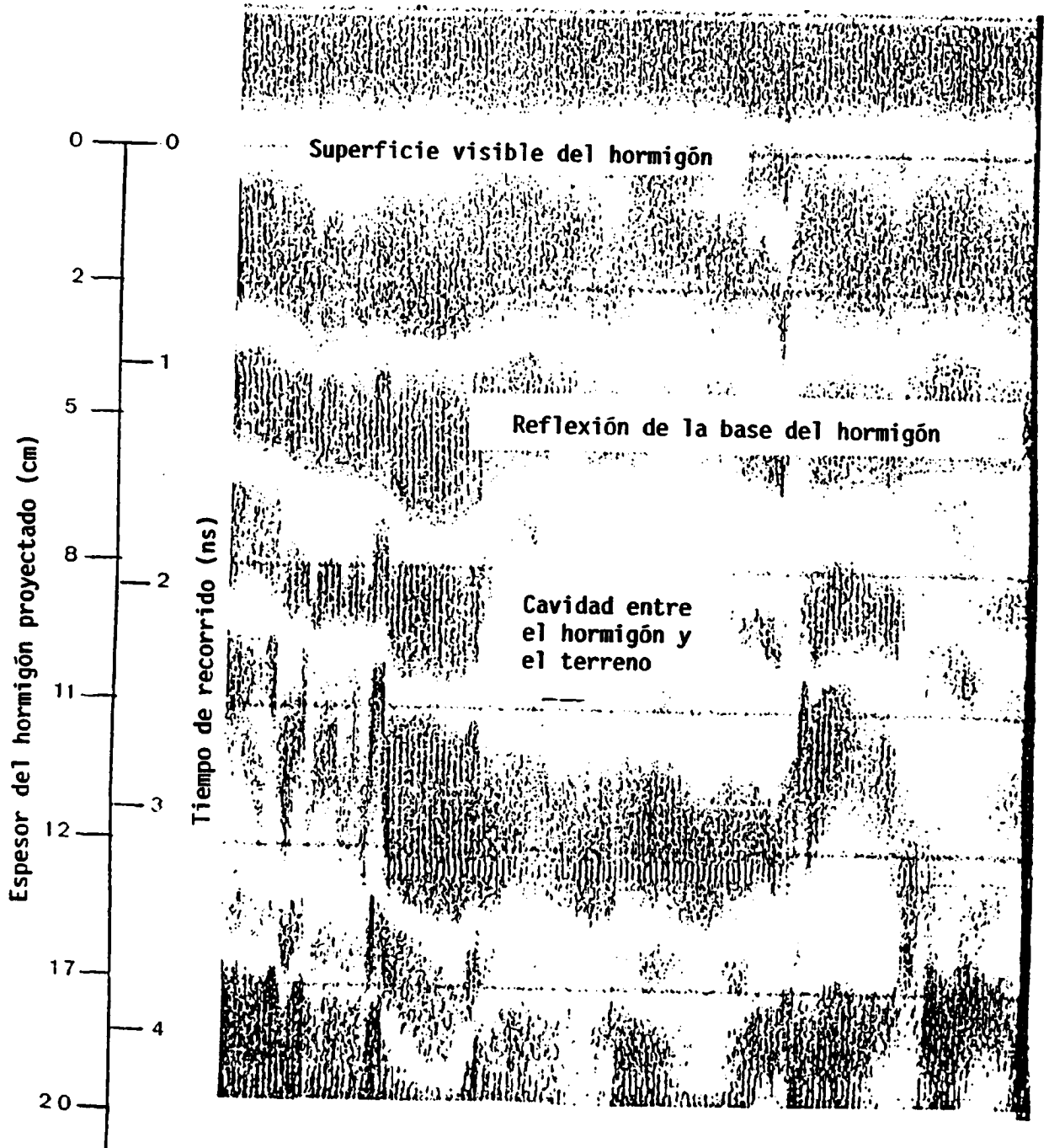
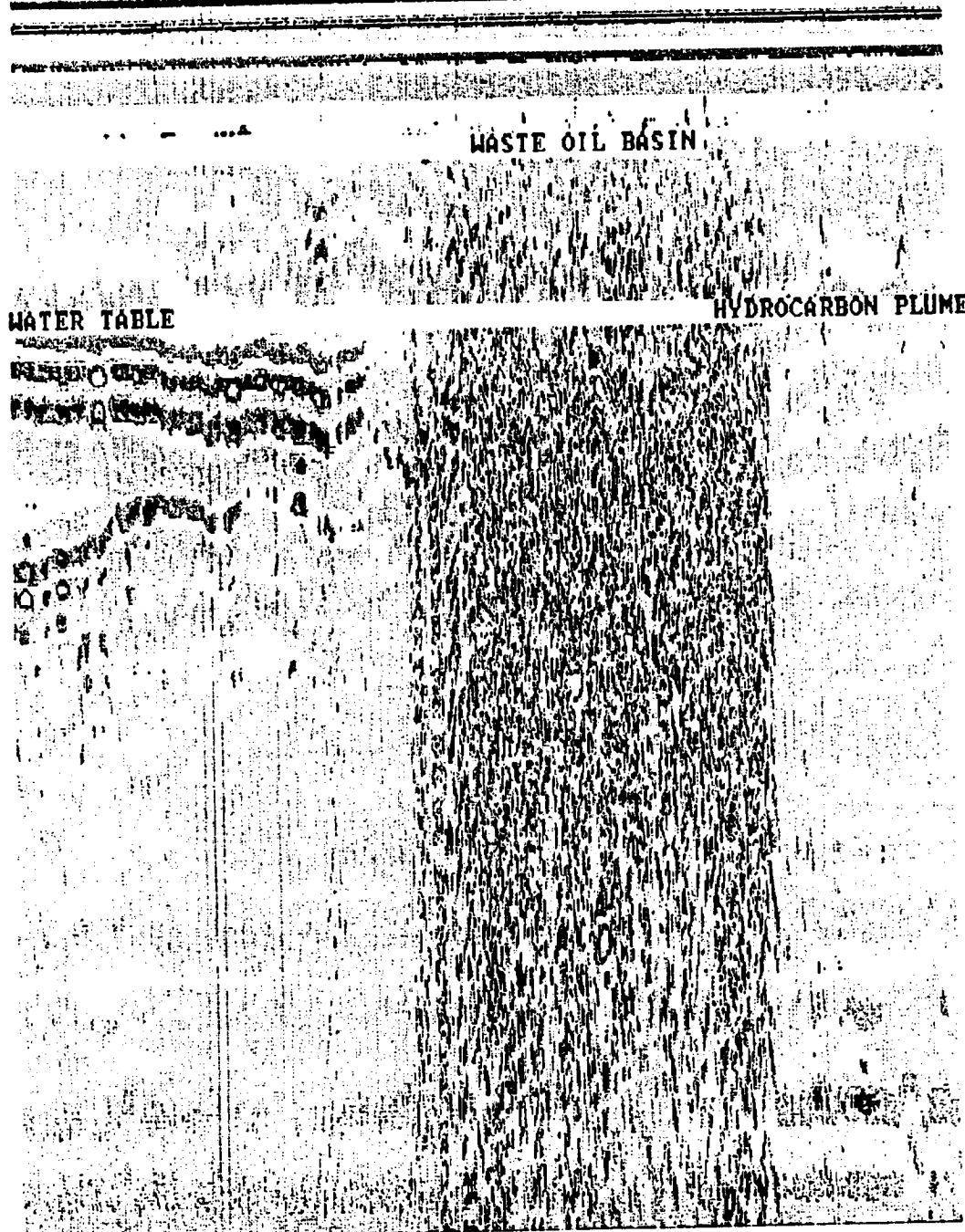


FIGURA Nº 4. DETECCIÓN DE HUECOS EN EL HORMIGÓN PROYECTADO DE UN TUNEL



Perched Water Table and Buried Waste Oil Basin
Aiken, South Carolina
Marker Interval: 50 Feet
RANGE: 120 NS.
120 MHz T/R



May 26, 1988 10:45:35

FIGURA N° 5. DETECCION DE UN DEPOSITO DE RESIDUOS DE ACEITES

3.1.3. Aplicaciones a la minería del carbón.

En la bibliografía que se ha podido consultar se han encontrado dos aplicaciones específicas del geo-radar en la minería del carbón. La primera está presentada por MOREY y se refiere a la determinación del espesor de carbón abandonado y la orientación de los taladros en una minería por el método AUGER; mientras que la segunda está presentada por COON et al. y hace mención a la localización de sondeos en el interior de pilares de carbón.

Los trabajos realizados por MOREY se desarrollaron en una mina de carbón, situada cerca de BLUEFIELD, Virginia Oeste, USA, en la que la capa tenía una potencia comprendida entre 0,45 y 0,90. Esta capa se había explotado previamente a cielo abierto y al llegar al fondo de corta se empleó el método AUGER para explotar las reservas marginales.

El objeto de este trabajo se concretaba en determinar la posición real de los sondeos realizados por los equipos AUGER, midiendo el espesor del pilar de carbón entre dos sondeos, y establecer el espesor de carbón que se dejaba en el techo o muro de la capa.

En estos trabajos se utilizaron tres tipos de antenas con frecuencias respectivas de 325; 625 y 910 MHz de las cuales la que mejores resultados dio fue la que trabajaba con una frecuencia de 625 MHz, que permitió detectar espesores mínimos de carbón de 7,5 cm.

El trabajo realizado por COON et al. tenía por objeto establecer las condiciones más favorables de transmisión de impulsos electromagnéticos en capas de carbón.

En este trabajo se emplearon antenas que permitían recibir ecos electromagnéticos en la gama de frecuencias comprendidas entre 20 y 500 MHz.

Las conclusiones más importantes que se han obtenido en este trabajo han sido las siguientes:

- * Los impulsos electromagnéticos del geo-radar, en la gama de frecuencias comprendida entre 40 y 500 MHz, pueden transmitirse y ser registrados satisfactoriamente, en capas de carbón, a profundidades de hasta 30 m.
- * Empleando impulsos electro-magnéticos, en el rango de frecuencias comprendido entre 10 y 160 MHz, se han podido detectar cavidades en la capa de carbón situadas a una profundidad de 15 m.
- * Un sondeo, no entubado, de unos 150 mm de diámetro que atravesaba un macizo de carbón perpendicularmente a la capa pudo ser detectado a una distancia de 8,5 m.

3.1.4. Posible aplicación a la detección de derrabes.

Actualmente el método más desarrollado para la utilización del geo-radar exige poner en contacto el emisor-receptor con la superficie libre del macizo a investigar. Esto supone prácticamente que las técnicas del geo-radar no puedan ser aplicadas en las capas inclinadas de carbón debido a las enormes dificultades que supone acceder a los frentes con estos equipos.

La posibilidad de utilizarlos desde las guías de los talleres tampoco parece viable debido a la escasa penetración de los impulsos del geo-radar que, en los casos más favorables, llega como mucho a los 30 m.

De acuerdo con la bibliografía consultada y las experiencias habidas en España parece que la utilización del geo-radar debe estar orientada a la detección de elementos, con fuerte contraste de propiedades electromagnéticas, situados en las proximidades de la superficie del terreno. De esta forma se aprovecha la alta definición que produce la extremadamente pequeña longitud de onda de los impulsos del geo-radar, que lleva consigo una escasa penetración en el terreno debido a su rápida atenuación.

Probablemente la aplicación del geo-radar que actualmente resulta más atractiva es la tomografía. Esta técnica consiste en colocar el emisor y receptor en dos sondeos distintos y obtener la respuesta del terreno en el plano definido por los dos sondeos. En este caso las condiciones de emisión y transmisión son óptimas a costa de tener que perforar los sondeos.

Por otro lado habría que investigar si las propiedades electromagnéticas del carbón altamente tensionados son sensiblemente distintas de las del carbón en estado normal; ya que, si no lo son, las zonas de concentración de tensiones serían prácticamente invisibles al geo-radar. Esta debería ser la línea fundamental de investigación si se desea obtener un conocimiento más preciso sobre la utilidad del radar en la detección de zonas comprimidas en una capa de carbón.

3.2. Tomografías sísmicas.

Las técnicas de sísmicas, tanto de reflexión como de refracción, han sido muy utilizadas para la caracterización del terreno; siendo la sísmica de refracción muy usada en investigaciones superficiales mientras que la de reflexión se utiliza, fundamentalmente, en investigaciones petrolíferas.

En este caso el parámetro discriminante de los distintos terrenos es su impedancia acústica que es el producto de su densidad por la velocidad de propagación de las ondas longitudinales.

Probablemente el hecho de que las aplicaciones de la caracterización sísmica hayan sido tan numerosas se deba a los importantes contrastes de impedancia acústica que presentan los terrenos que se encuentran a poca profundidad, particularmente si están bajo el nivel freático.

Hay que señalar que así como con los impulsos electromagnéticos del geo-radar la presencia de agua supone un factor importante de atenuación de la señal, en el caso de las ondas sísmicas los medios fracturados y saturados presentan velocidades de las ondas de presión mayores que los no saturados y fracturados. Por ello su impedancia acústica es mayor y por lo tanto el método es más resolutivo.

En los últimos años se han desarrollado potentes programas de cálculo para interpretar la información obtenida a partir de la auscultación sísmica y, precisamente, la tomografía sísmica entre sondeos se ha revelado como una de las técnicas más eficaces para reconocer discontinuidades en los macizos rocosos.

3.2.1. Fundamentos.

Esencialmente la tomografía es una técnica que permite obtener la distribución de un parámetro en un plano. En el caso de la tomografía sísmica el parámetro es la velocidad de las ondas de compresión y el plano es el definido por los dos sondeos en los que respectivamente se colocan los emisores y los receptores.

Para poder determinar los tiempos utilizados en el recorrido de cada señal, frecuentemente, se supone que las señales se comportan como rayos y que su longitud de onda no tiene influencia alguna. Existen teorías que tienen en cuenta el efecto de la longitud de onda pero presentan dos dificultades importantes: los datos deben ser de una calidad extraordinaria y los tiempos de cálculo con ordenador son enormemente grandes.

Desde un punto de vista práctico la obtención de una imagen tomográfica aplicando la teoría de los rayos "ray theoretical tomographic velocity imagin" se consigue colocando en sendos sondeos un importante número de receptores y un emisor, que se va desplazando a lo largo del sondeo, midiendo el tiempo correspondiente al recorrido de los rayos emitidos, refractados y reflejados llegándose a un modelo similar al presentado en la Figura N° 6.

El plano delimitado por los dos sondeos se divide en varias celdas y se acepta que el tiempo (t) necesario para atravesar una celda es el producto de la velocidad (v) por la distancia recorrida en la celda (d). De esta forma el tiempo total del recorrido del rayo, K, estaría dado por

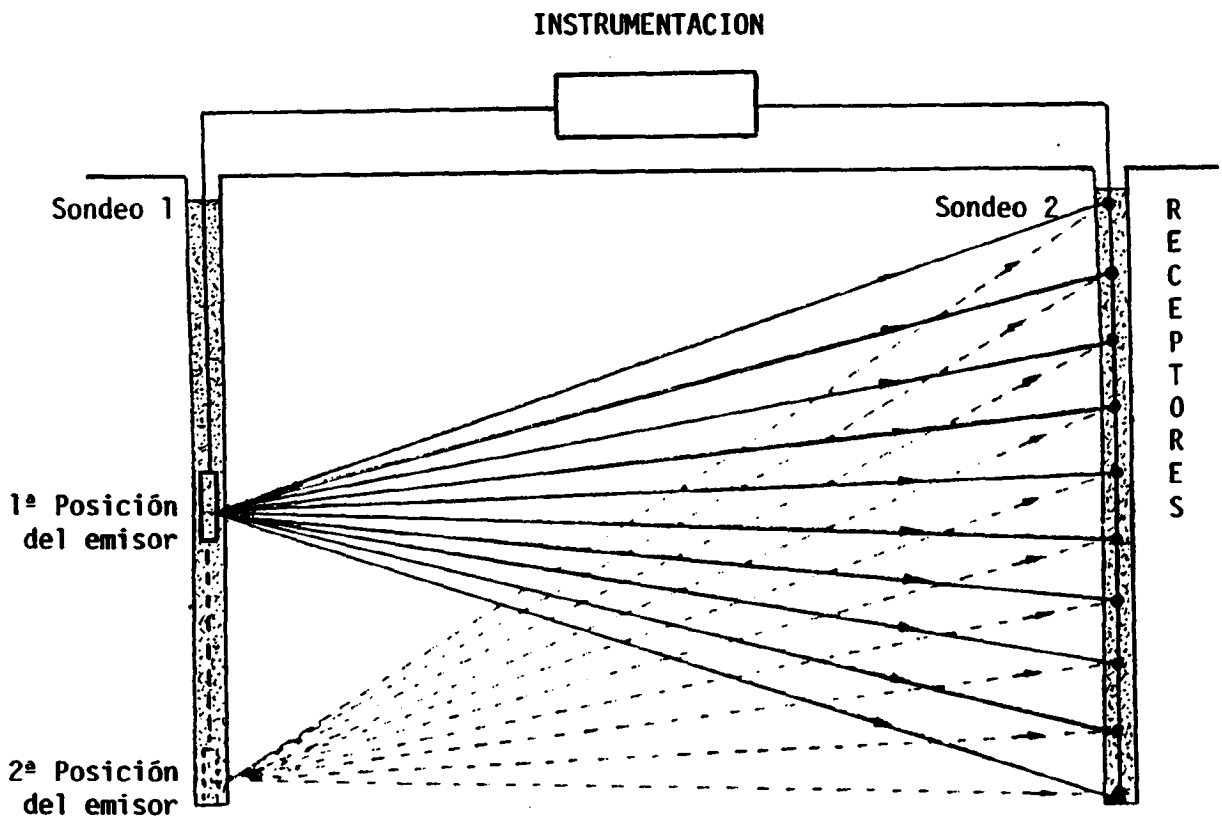


FIGURA Nº 6. DISPOSITIVO PARA LA TOMOGRAFIA SISMICA

$$t_k = \sum_{i=1}^{I-1} \frac{d_{k1i}}{V_i}$$

que en términos matriciales puede escribirse

$$[t]_J = [d]_J^I \cdot [X]_I$$

siendo:

t = tiempos de recorrido

d = distancia recorrida por cada rayo en cada celda

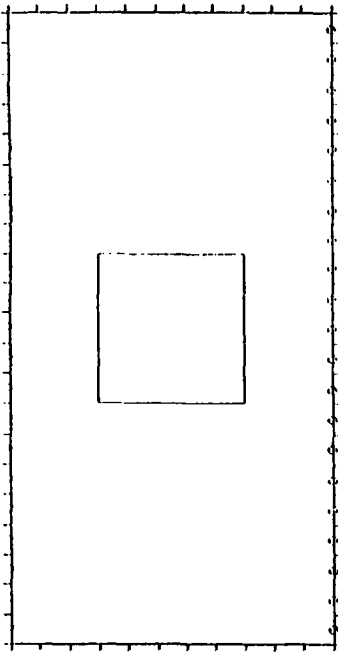
X = inverso de la velocidad en cada celda

Dado que el número de emisores y receptores suele ser elevado, la determinación de la matriz de incógnitas $[X]$ puede hacerse invirtiendo la matriz $[d]$ o bien realizando cálculos aproximados iterativos, que son los más utilizados.

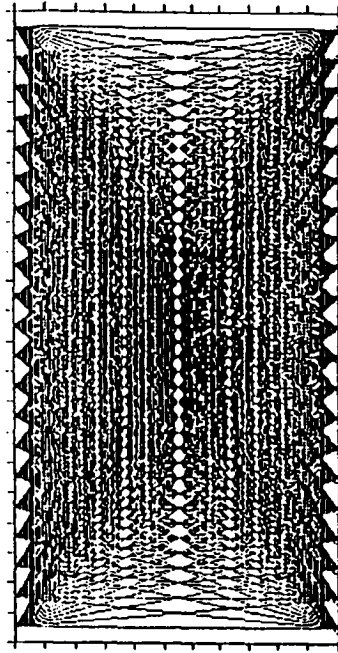
Evidentemente según el proceso de cálculo seguido y la precisión requerida, la imagen tomográfica obtenida será distinta; pero siempre deberá tener un parecido importante con la realidad.

En la Figura Nº 7 se presentan las imágenes tomográficas obtenidas de un modelo mediante 21 emisores y 21 receptores, al cabo de 50 iteraciones de cálculo utilizando diversos algoritmos.

A.- MODELOS

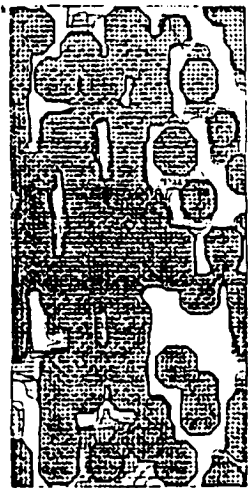


A1.- Original

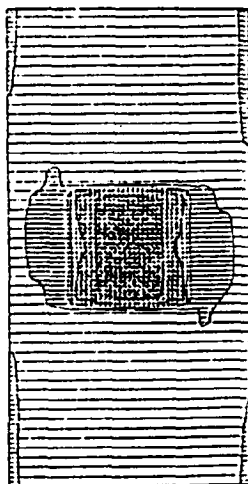


A2.- Rayos

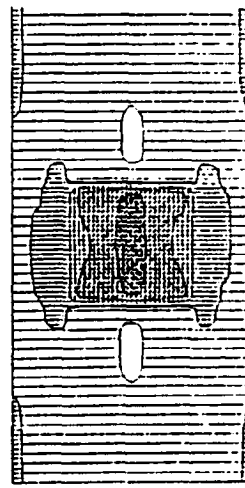
B.- RESULTADOS DE CALCULO TRAS 50 ITERACIONES



B1.- ART
Varianza: $7,1 \cdot 10^3$



B2.- BART
Varianza: $6,2 \cdot 10^{-3}$



B3.- GS
Varianza: $4,4 \cdot 10^{-3}$

FIGURA Nº 7. IMAGENES DE TOMOGRAFIA SISMICA

Este método tiene grandes posibilidades debido al abaratamiento de los procesos de cálculo al generalizarse el uso de microordenadores potentes pero no está exento de dificultades que sobre todo estriban en disponer del número adecuado de emisores y receptores, utilizar medidores de calidad y conocer con precisión la posición de los emisores y receptores.

3.2.2. Equipos utilizados.

Un equipo para la realización de tomografías sísmica consta básicamente de un emisor de energía, receptores y equipo de registro de señales.

Habitualmente los emisores de energía están constituidos por:

- Martillos
- Pequeñas cargas de explosivo
- Pistolas de aire
- Descargas de condensadores

Los captadores habitualmente empleados son de los tipos siguientes:

- Geófonos sísmicos, con frecuencias de resonancia entre 10 y 1.000 Hz
- Acelerómetros, con frecuencias de resonancia de 1.000 a 50.000 Hz
- Hidrófonos, empleados solo en campañas marinas, con frecuencia de resonancia hasta 10.000 Hz

- Sismómetros, con frecuencias de resonancia entre 1 y 20 Hz

Los receptores más utilizados son los geófonos, que son baratos y adecuados a la mayor parte de las aplicaciones más frecuentes.

Los hidrófonos pueden utilizarse en sondeos, si éstos están llenos de agua, y presentan la ventaja de que no es necesario fijarlos a las paredes del sondeo.

Los equipos de registro de señales son, en la actualidad, de tipo digital con preamplificadores y filtros para obtener una señal en las mejores condiciones posibles que puede ser observada a tiempo real y registrada en un soporte magnético para su posterior utilización. Habitualmente los equipos utilizados en tomografía sísmica suelen tener un mínimo de 12 canales de registro.

3.2.3. Aplicaciones típicas.

En los apartados siguientes se presentan algunas aplicaciones típicas de la tomografía sísmica.

3.2.3.1. Evaluación del estado de una presa de hormigón.

A principios de los años setenta se detectó que algunas partes de la presa de hormigón denominada "VAL DE LA MERE" en la isla de JERSEY presentaba los efectos de una agresión química alcalina que podía deteriorar gravemente el cuerpo de hormigón de la presa que tenía 20 m de alto y 180 m de longitud.

En Septiembre de 1.988, Smith y Dyer (1.990), se realizó un estudio tomográfico de la parte de la presa más afectada colocándose 22 receptores en la cara de aguas arriba; 7 eran acelerómetros y 15 hidrófonos, que se situaron bajo el nivel de las aguas. La distancia entre los receptores fue de 0,6 m.

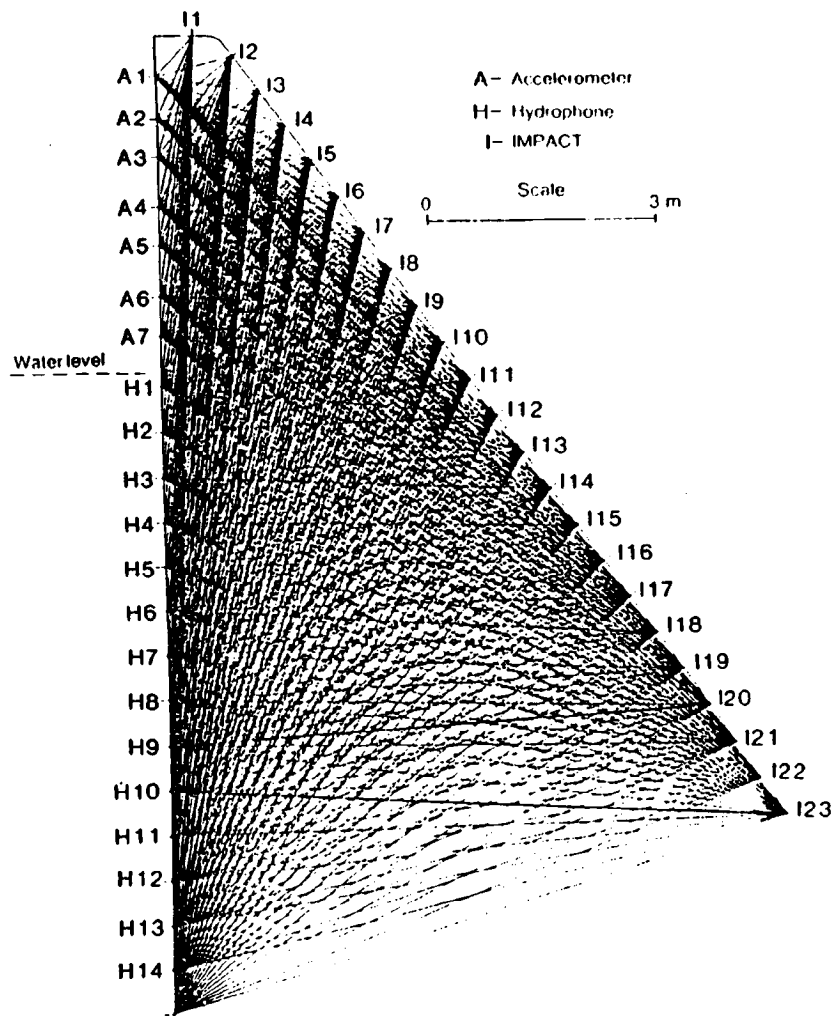
En la cara de aguas abajo se realizaron 23 impactos, con una masa de 2 Kg, situando los impactos cada 0,6 m.

En la Figura Nº 8 se muestra la disposición de los emisores y receptores así como la tomografía obtenida tras la interpretación de los resultados. Puede apreciarse claramente que el método es resolutivo en el rango de velocidad de ondas de compresión entre 4.570 y 3.960 m.

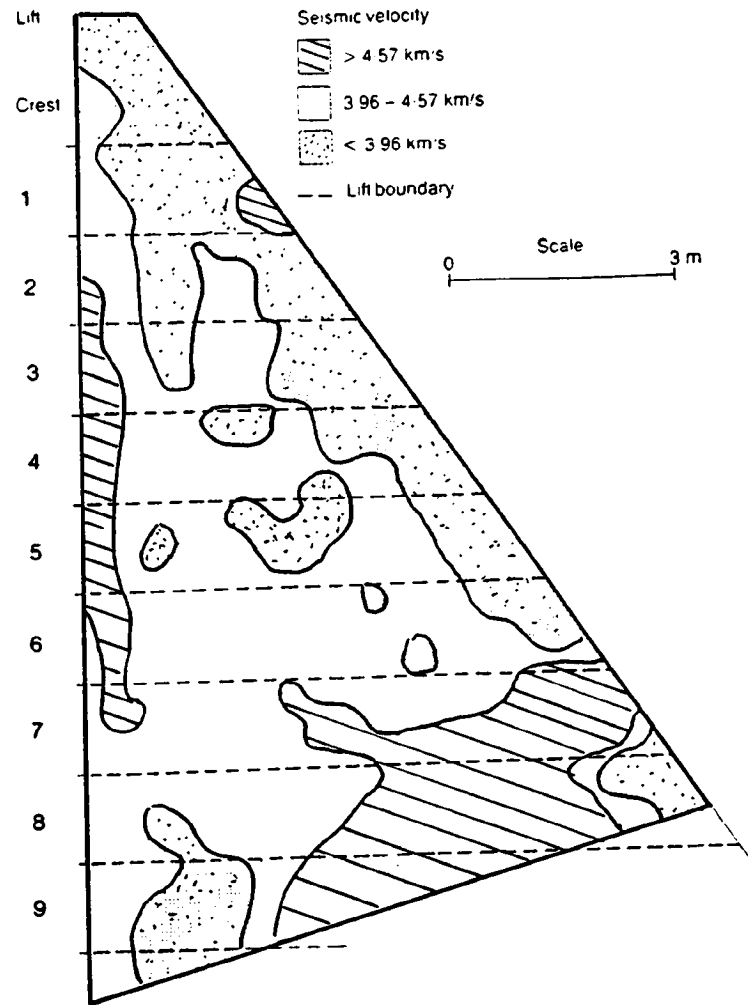
3.2.3.2. Geofísica en capa.

La técnica denominada Geofísica en capa puede considerarse un antecedente de las técnicas de tomografía cuyo objetivo es la detección de zonas estériles o fallas en paneles de carbón a explotar apoyándose en medidas realizadas desde las galerías que definen el panel.

Con la financiación de OCICARBON y la DIRECCION GENERAL DE MINAS se llevó a cabo un proyecto de investigación denominado SISMI-CA EN CAPAS DE CARBON con la colaboración de las empresas PRAKLA-SEISMOS, COMPAÑIA GENERAL DE GEOFISICA y BRITISH COAL.



A.- Modelo de rayos generado



B.- Distribución de velocidades

FIGURA N° 8. TOMOGRAFIA SISMICA DEL CUERPO DE UNA PRESA

Los ensayos realizados en HUNOSA, COTO CORTES, MINERO SIDERURGICA DE PONFERRADA, ANTRACITAS DEL BIERZO, MINAS Y FERROCARRILES DE UTRILLAS y CARBONES DE BERGA han cubierto las áreas más significativas de la minería española del carbón. Los resultados obtenidos no han sido confirmados totalmente en la práctica; ya que muchos de los paneles investigados no han sido explotados; aunque, en general la impresión sobre los resultados que puede aportar este método es satisfactoria.

En el Reino Unido se estima que el éxito de las campañas de sísmica en capa es del orden del 85% y esta técnica se utiliza habitualmente en Alemania y Francia.

En las minas españolas el éxito de la aplicación de esta técnica puede ser más cuestionado ya que a las dificultades intrínsecas de los yacimientos españoles, derivadas de los abundantes trastornos tectónicos, hay que añadir la escasa información que se dispone sobre el comportamiento sísmico de las rocas encajantes.

3.2.3.3. Detección de capas.

HULLERAS DE SABERO Y ANEXAS, S.A. explota un yacimiento de hulla altamente tectonizado de tal forma que las capas se presentan como masas informes de carbón más propias de un yacimiento metálico que de uno sedimentario.

Como estas masas pierden su continuidad en pocos metros, Hulleras de Sabero debe dedicar un esfuerzo importante para crear una infraestructura en roca que permita realizar campañas de investigación, mediante sondeos, para definir la posición de las masas de carbón.

En estas condiciones, con la financiación de la Junta de Castilla y León, Hulleras de Sabero encargó al Instituto de Geofísica Aplicada de Bochum, Alemania, la realización de una campaña de sísmica para evaluar las posibilidades de localización de las masas de carbón desde los transversales de infraestructura.

La campaña de sísmica se ha realizado desde los transversales 7 WIS en la planta H-2 y el 7 WIS en la 7ª Planta. La separación de los transversales es de 70 metros que corresponde a una diferencia de cota de 40 m.

En esta campaña se han utilizado 48 geófonos y se han realizado 50 disparos.

En la actualidad el trabajo no está completamente terminado; pero los trabajos de explotación que se han realizado en el área estudiada han demostrado las posibilidades del método.

3.2.4. Posible aplicación a la detección de derrabes.

La tomografía sísmica parece una técnica con excelentes posibilidades para detectar las zonas de sobrepresión en el interior de una capa de carbón; pues esta técnica se ha mostrado eficaz para discriminar materiales con impedancias acústicas de contraste moderado.

Por lo que se refiere a los equipos a utilizar hay que señalar que estos son totalmente manejables y existen versiones en seguridad intrínseca como el SEAMEX, el DFS-5 de Texas Instruments y el DS-S10 de Geosurce.

Probablemente los mayores progresos se conseguirán, en un futuro inmediato, con la puesta a punto de los programas de ordenador necesarios para restituir las imágenes sísmicas y, en un futuro más lejano, cuando exista un software accesible que permita una interpretación en tres dimensiones.

3.3. Microsísmica.

Un derrabe puede ser considerado, en sentido amplio, como un caso particular de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, D.I., y por ello puede ser interesante investigar la utilidad de la aplicación de las técnicas de prevención que se aplican a los D.I.

Una de las técnicas más utilizadas es la auscultación de los fenómenos de actividad microsísmica, que se describe en los apartados siguientes.

3.3.1. Fundamentos.

Todos los procesos de rotura de un macizo rocoso suponen la existencia de un fenómeno mecánico capaz de aportar la energía necesaria para anular la cohesión del macizo.

Este proceso será tanto más rápido y violento cuanto mas resistente sea el macizo rocoso, cuanto mayor sea la rigidez respecto al sistema de carga (que, en el caso de una capa de carbón, puede estar constituido por los hastiales de la capa) y cuanto más rápido sea el proceso de carga (que normalmente estará directamente asociado al avance de la explotación).

En razón de la heterogeneidad del medio, en este caso el carbón, el proceso de rotura no es continuo; sino que a lo largo de él se producen ajustes internos que se traducen en unas emisiones de energía que, en forma de impulsos sísmicos, se propagan por el macizo rocoso que rodea la zona susceptible de generar un D.I.

Estos impulsos sísmicos son filtrados por el macizo rocoso de tal forma que su frecuencia se va acomodando a la propia de los terrenos que atraviesan y, normalmente, es inferior a 100 Hz. Por otro lado a medida que los impulsos se van alejando del foco emisor se va produciendo una atenuación en su energía de tal forma que a distancias de algunos cientos de metros del foco emisor solo son registrados los impulsos de mayor energía.

De acuerdo con esto **los equipos de sísmica, más bien microsísmica, aplicados a la detección de D.I. deben estar orientados a registrar y procesar impulsos de baja frecuencia y alta energía.**

Habitualmente los sistemas de prevención de D.I. se basan en el recuento del número de impulsos registrados por unidad de tiempo para establecer unos niveles de alerta y alarma que impliquen al desalojo de las explotaciones afectadas.

Las técnicas de microsísmica permiten evaluar la posición del foco emisor de los eventos cuyas coordenadas (x,, y,, z) deben cumplir la relación:

$$d_i = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2}$$

siendo:

d_i = distancia del foco emisor a la posición del captador i.

(a,, b,, c) = coordenadas del geófono i.

De esta forma utilizando más de tres geófonos se pueden determinar estadísticamente las coordenadas del foco emisor y establecer cuales son los puntos teóricamente peligrosos.

Para lograr determinar la posición del foco emisor es necesario disponer de una red de captadores, en el exterior o en el interior de la mina, de tal forma que puedan quedar cubiertas las zonas susceptibles de generar un D.I. Actualmente, utilizando equipos muy sofisticados, se estima que puede determinarse el foco emisor con una precisión de ± 5 m.

3.3.2. Equipos.

Conceptualmente los equipos utilizados en microsísmica son semejantes a los empleados en la tomografía sísmica o el geo-radar, con algunas diferencias:

- **El emisor es natural ya que es el foco generador del potencia D.I.**

- **Los captadores son siempre del tipo geófono, con frecuencias de resonancia inferiores a 100 Hz.**
- **Es preciso incorporar un sistema que discrimine los impulsos producidos por las máquinas que habitualmente trabajan en las minas.**

Después de las experiencias realizadas por STYLES, en la cuenca de Antracitas del Sur de Gales, se pueden establecer los siguientes rangos de frecuencia para los impulsos sísmicos registrados en las minas:

*** Maquinaria de mina > 300 Hz**

*** Disparos de explosivos 100 - 160 Hz**

*** Impulsos previos a un D.I. < 100 Hz**

Para que un método de sismica tenga posibilidades de éxito, el equipo utilizado debe tener la capacidad de realizar un análisis frecuencial de los impulsos captados para rechazar los que se supongan ajenos a los D.I.

Otra característica importante de los equipos modernos es la posibilidad de trabajar a tiempo real, que hoy es asequible debido al enorme desarrollo de los microordenadores; mientras que hace pocos años había que contentarse con registrar los eventos en cintas magnéticas para analizarlos después y llegar a descubrir que se podría producir un D.I. dos días antes.

3.3.3. Experiencias en la minería del carbón.

La experiencia en la detección de D.I. utilizando técnicas microsísmicas es realmente muy amplia. Como indica Mc Donald (1.981) estas técnicas se han aplicado, con éxito variado, a la detección de D.I. en países como Reino Unido, Francia, URSS, Japón, Australia, Polonia y Checoslovaquia.

Probablemente la experiencia más amplia se tenga en la cuenca de DON, URSS, donde a partir de la mitad de la década de los 50 se empezaron a utilizar estas técnicas.

En Japón a principios de los sesenta se creó un Comité de Prevención de D.I. y se aplicaron estas técnicas en la mina Utashinaí pero no hay resultados documentados accesibles sobre ello.

En Polonia también se ha desarrollado una actividad investigadora importante, con resultados documentados; pero, que en razón del peculiar régimen político que ha existido hasta hace poco en ese país, deben ser tomados con precaución.

En los apartados siguientes se exponen los resultados de tres investigaciones sobre microsísmica que se han realizado, recientemente, en el Reino Unido, Francia y España.

3.3.3.1. Hulleras de Provenza.

El CERCHAR, como Centro de I+D de CHARBONNAGES DE FRANCE, ha realizado numerosas experiencias con las técnicas de microsísmica para la prevención de D.I., MAGRON (1.989).

Los métodos de trabajo se agrupan en dos clases SISMOACUSTICOS o SISMICOS según que la auscultación se haga en una sola capa, sin necesidad por lo tanto de localizar el foco emisor de impulsos, o sea a nivel global en un yacimiento extenso y con varias capas en explotación. En este caso es casi imprescindible determinar la localización del foco emisor de eventos.

Las aplicaciones más interesantes se han llevado a cabo en Hulleras de Provenza, donde se explota una sola capa de hulla sub-bituminosa con tajos largos, totalmente mecanizados, que proporcionan unas 9.000 toneladas diarias. Esto supone 1,8 M t/año, que equivale al 10% de la producción de CHARBONNAGES DE FRANCE.

El techo de la capa explotada está constituido por un fuerte banco de caliza que produce, periódicamente, importantes golpes de techo con resultados muy negativos sobre la explotación.

Para prevenir la generación de los golpes de techo se instaló un sistema continuo de monitorización de eventos numéricos constituido por los siguientes componentes:

- * 4 geófonos con frecuencia propia de 14 Hz con un amplificador, en seguridad intrínseca, con ganancia de 29 dB.

- * Sistema de transmisión telefónica por cable de las señales hasta el exterior.
- * Sistema digitalizador de señal.
- * Microordenador APPLE II de 8 bits
- * Sistema de registro de señales
- * Equipo de visualización de salidas

En la Figura N° 9 se muestra el esquema de funcionamiento de este equipo.

Los geófonos se colocan en la galería de base del tajo, a una distancia de 40 m entre sí, de tal forma que se cubre el tramo comprendido entre 80 y 200 m por delante del frente.

El equipo funciona perfectamente, detecta la actividad microsísmica cuando el tajo está parado, cuando se realizan las labores de arranque y cuando se producen golpes de techo; pero se debe seguir trabajando para determinar una relación bi-unívoca entre el incremento de actividad microsísmica y los golpes de techo que, hasta ahora, no se ha encontrado.

3.3.3.2. Mina de Cynheidre, Gales.

La mina de Cynheidre está situada en el Sur de Gales, Reino Unido, fue abierta en 1.960 y produce actualmente 300.000 toneladas anuales de antracita, que se obtienen por el método de tajo largo.

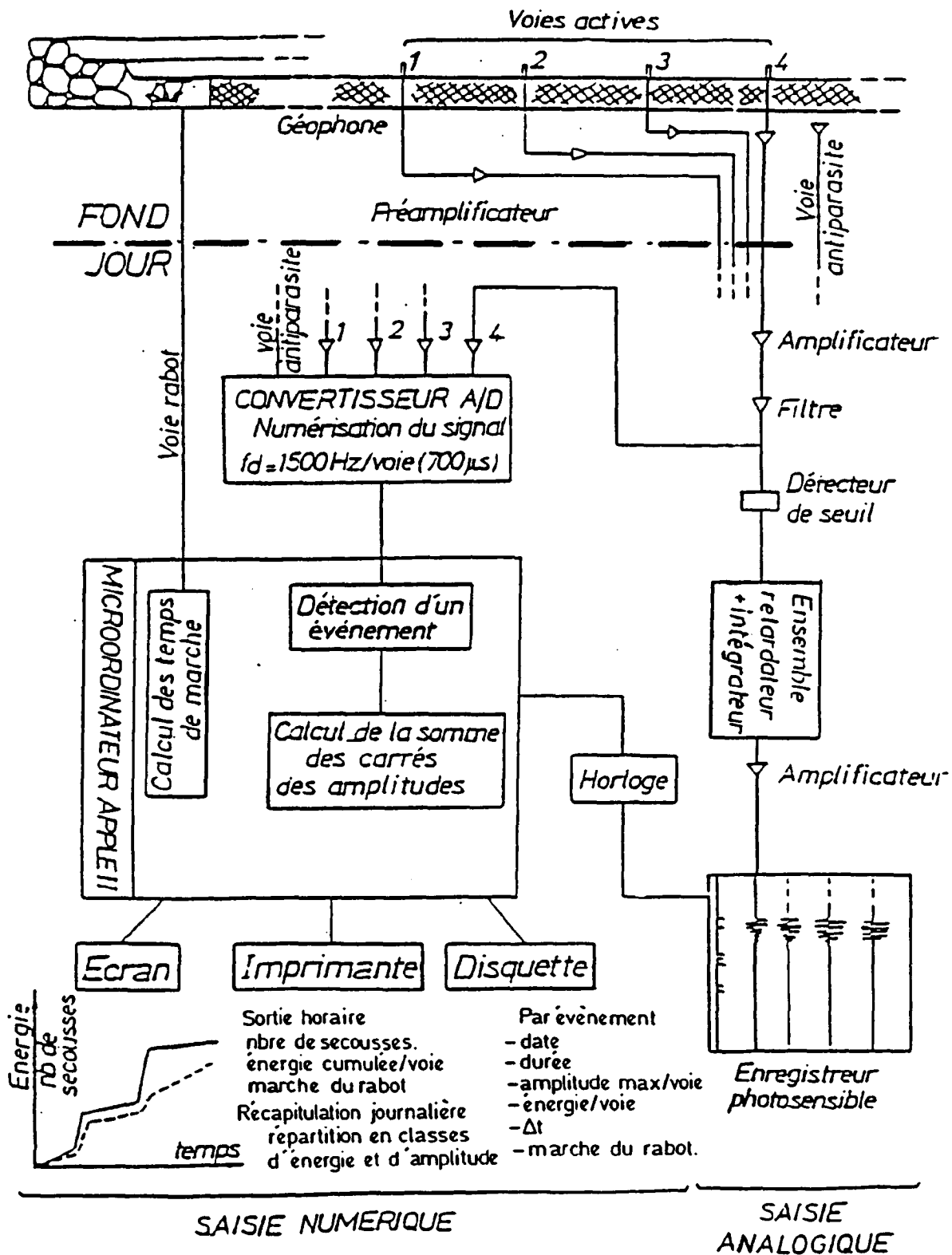


FIGURA Nº 9. SISTEMA SISMO-ACUSTICO DE HULLERAS DE PROVENZA

Desde su puesta en explotación en 1.960 se han producido en esta mina 113 D.I. y desde 1.961 se puso en funcionamiento, en esa cuenca, un centro para la prevención de D.I.

Desde 1.982 se empezó a investigar las aplicaciones de la microsísmica a la prevención de derrabes instalando seis geófonos en superficie que trabajaron permanentemente desde el 12 de Marzo al 18 de Junio de 1.982. Durante este periodo no se produjo ningún D.I.; pero se pudo comprobar la buena correlación entre la actividad microsísmica y los trabajos de explotación.

En Agosto de 1.982 se instaló un nuevo equipo empleando como captador un sismómetro WILLMORE MK III con frecuencia propia de 1 Hz. Este equipo, situado en la superficie, permitió detectar un D.I. de 500 toneladas de carbón y 4.000 m³ de metano, producido a 5 Km de distancia.

A partir de los resultados obtenidos en estas investigaciones se ha podido establecer los niveles de actuación siguientes:

- * **ACTIVIDAD NORMAL** **Menos de 50 eventos/hora**
- * **PREALARMA** **50 eventos/hora**
- * **PARADA DE EXPLOTACION** **80 eventos/hora**
- * **ABANDONO DE EXPLOTACION** **100 eventos/hora**

En los eventos originados por los D.I. en la mina de Cynheidre la mayor cantidad de energía se transmite entre las frecuencias de 24 y 34 Hz. Sorprendentemente la velocidad de los eventos asociados a D.I. es del

orden de 600 m/seg; mucho más baja que la velocidad de propagación de las ondas acústicas en el medio, que tiene una velocidad del orden de 4.900 m/seg.

Posteriormente se ha instalado un equipo de monitorización microsísmica, que permite trabajar a tiempo real, utilizando un equipo de ocho canales gobernado por un microprocesador Motorola MC6809.

Este equipo ha dado buenos resultados y ha permitido acomodar la actividad productiva al nivel de actividad sísmica de la capa controlando perfectamente los D.I. En la Figura Nº 10 se muestra la relación entre la emisión de metano y la actividad sísmica, durante un incidente ocurrido el 20-II-86.

3.3.3.3. Cuenca del Aller, HUNOSA.

HUNOSA ha firmado un convenio de investigación con la CECA para desarrollar un equipo, basado en las técnicas de microsísmica, que permita progresar en la utilización de las técnicas de prevención de los D.I.; que son uno de los problemas más importantes que afectan a las explotaciones en la Cuenca del Aller.

Este proyecto de investigación se planteó en dos fases; la primera consistía en la instalación de una red de escucha sísmica en el exterior y la segunda en la instalación, en el interior, de otra sismoacústica.

Hasta el momento se han colocado, en el exterior, cuatro sismómetros con una frecuencia propia de 1 Hz, tipo L-4-C fabricados por MARK (USA).

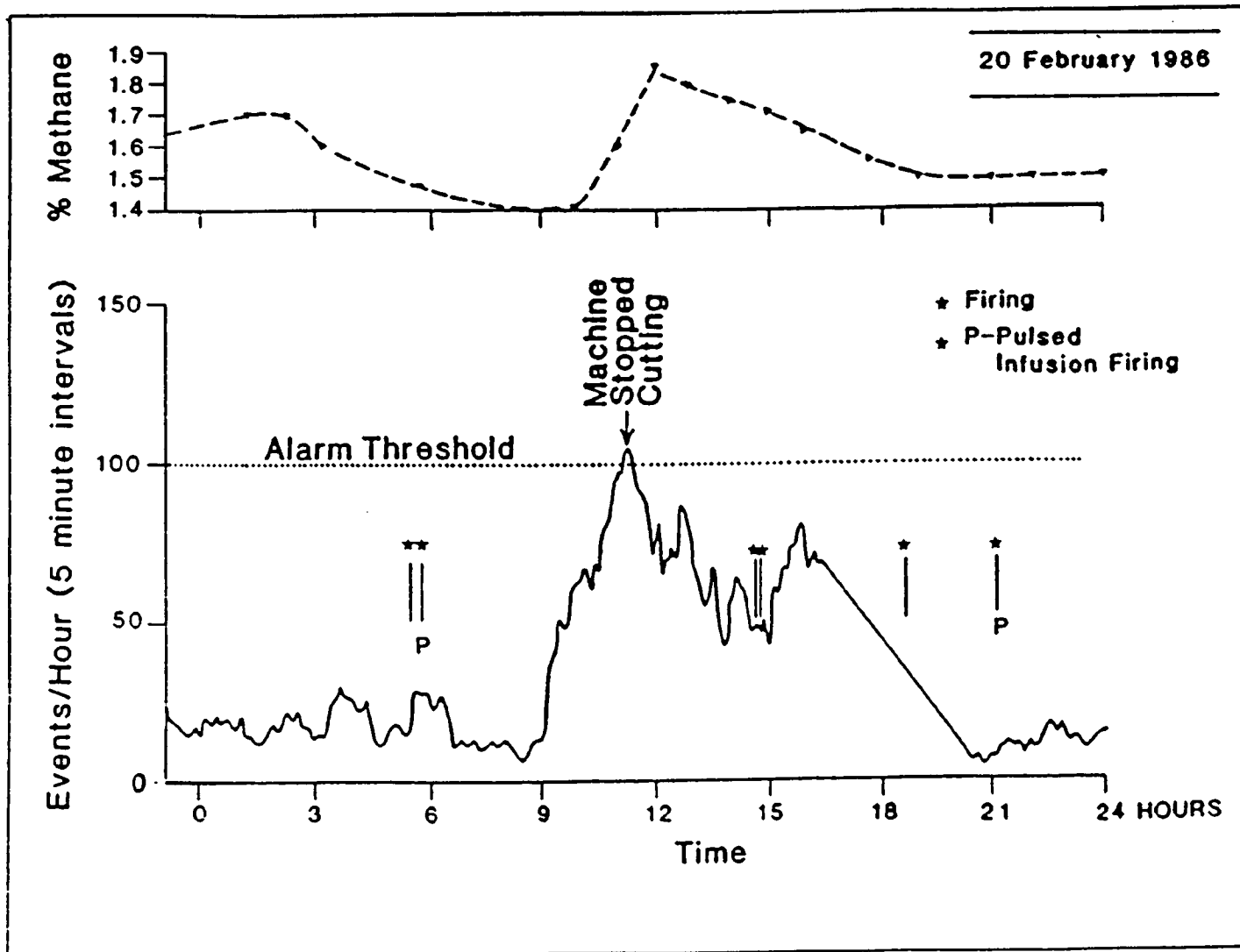


FIGURA N° 10. EJEMPLO DE ACTIVIDAD SISMICA EN LA MINA DE CYNHEIDRE (GALES)
(Cortesía P. STYLES)

Las señales captadas por estos sismómetros son enviadas por radio al ordenador encargado de procesarlas. El equipo de radio está alimentado por unas células solares, que han dado ciertos problemas debido a que en Asturias las horas de sol no son suficientes para mantener activo el sistema de forma permanente.

Antes de ser analizadas las señales son acondicionadas, filtrándolas entre 10 y 50 Hz, y amplificándolas con una ganancia de 60 dB.

El ordenador que procesa la información es un COMPAQ equipado con un microprocesador INTEL 80386 trabajando a 25 MHz.

La segunda fase del proyecto preve la implementación de una red sismoacústica, compuesta por 12 geófonos, con frecuencia propia de 4-14 Hz, fabricados por la casa MARK.

AITEMIN está fabricando un equipo de modulación de frecuencia para transmitir las señales hasta el exterior, para ser analizadas, sin tener que utilizar un amplificador intermedio.

En la actualidad el trabajo del equipo de sismómetros de superficie se ha orientado a la detección de D.I. sobre la Capa MARIA del Pozo S. Antonio.

Las experiencias habidas hasta ahora pueden considerarse muy positivas ya que siempre que se ha producido un D.I. se ha podido detectar un incremento de la actividad microsísmica, medida en número de eventos por unidad de tiempo. Sin embargo, también ha ocurrido que se ha detectado un incremento notable de la actividad microsísmica sin que se haya producido ningún D.I.

En la Figura N° 11 se muestra una evolución típica de la actividad sísmica registrada y en ella puede verse como, efectivamente, antes de los D.I. producidos el 15-III-90 y 24-IV-90 se produjo un apreciable incremento de la actividad sísmica. Sin embargo el día 17-V-90 se produjo un incremento notable de la actividad sísmica sin que se produjera ningún D.I. en los días siguientes.

3.3.4. Posible aplicación a la detección de derrabes.

Las técnicas de microsísmica y sismoacústica parecen muy apropiadas para la detección de los D.I, presentando además la ventaja adicional de existir equipos en seguridad intrínseca que son directamente aplicables a las minas de carbón.

Sin embargo la información obtenida indica que estas técnicas deben evolucionar más para poder establecer una correlación biunívoca aceptable entre los fenómenos sísmicos y la producción de D.I.

Probablemente con el enorme desarrollo actual de la microinformática se podrán implementar equipos, más efectivos que los actuales, que sean capaces de establecer, a tiempo real, parámetros más significativos que el número de eventos por unidad de tiempo.

La aplicación de esta técnica a los derrabes parece algo más problemática ya que la generación de los eventos microsísmicos supone un impulso energético considerable que se producirá en un D.I. pero que, indudablemente, tendrá un menor nivel energético en un derrabe.

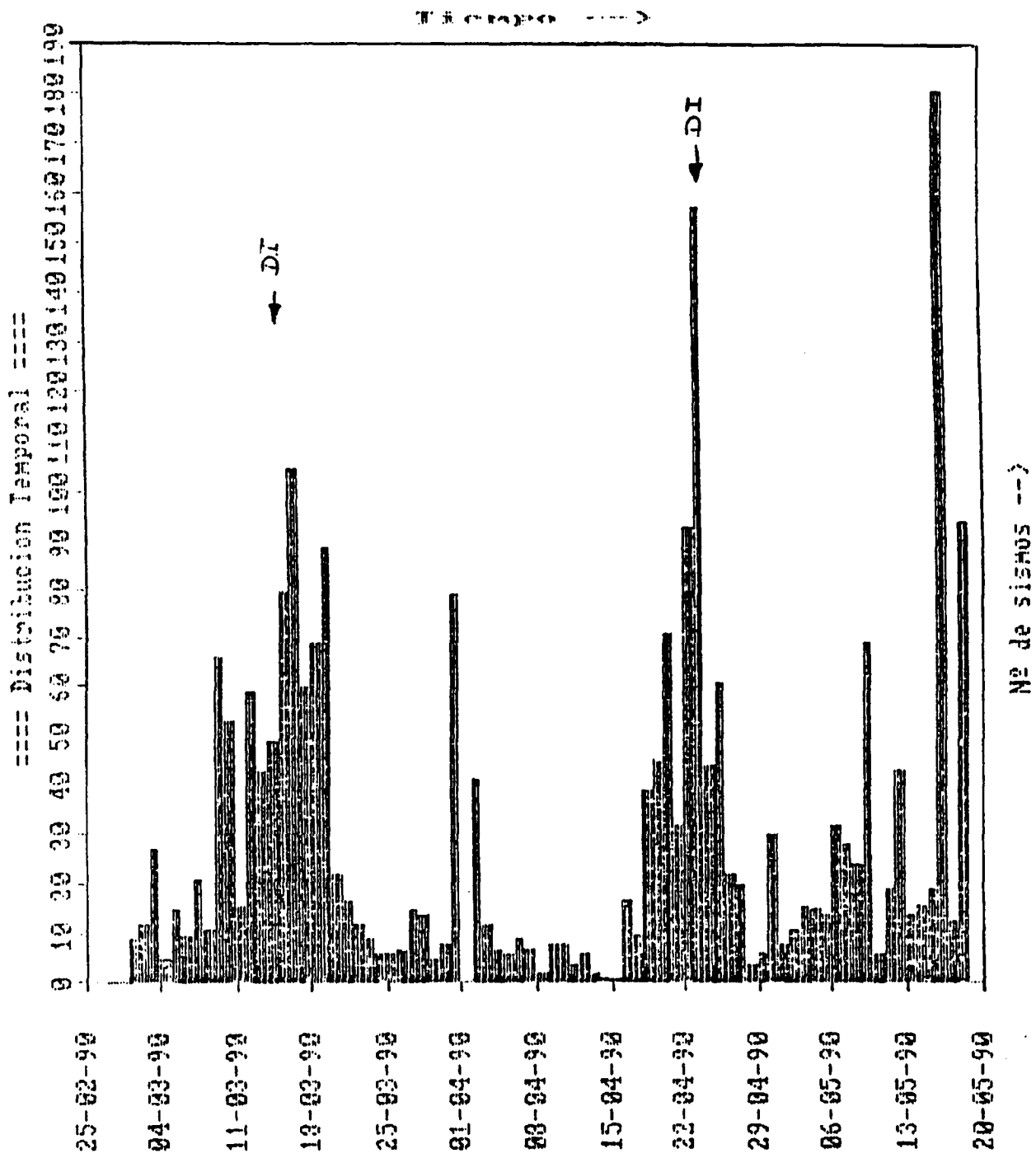


FIGURA Nº 11. REGISTRO DE LA ACTIVIDAD SISMICA EN LA CUENCA DEL ALLER (HUNOSA)
(Cortesía V. Gutierrez Peinador)

3.4. Emisión acústica.

Tal como se ha indicado en el apartado 3.3 el proceso de generación de un D.I., y de un derrabe como caso particular de éste, va asociado a un proceso de reajuste energético.

La microsísmica trata de medir los procesos de ajuste energético a través del terreno; sin embargo la emisión acústica pretende medir estos procesos en el mismo lugar en que se producen los reajustes energéticos.

En los apartados siguientes se presentan los fundamentos, equipos utilizados y experiencias más importantes habidas con la aplicación de las técnicas de emisión acústica (E.A.).

3.4.1. Fundamentos.

Básicamente la emisión acústica es un fenómeno similar a la actividad microsísmica asociada a la rotura de macizos rocosos, en este caso D.I. y como caso particular los derrabes, con dos diferencias importantes:

- * **Debido a que se trata de medir los reajustes energéticos en las proximidades del lugar en que se producen, hay que tener presente que no se materializa la capacidad filtrante del terreno, de tal forma que las frecuencias de los impulsos de E.A. son de varios KHz.**

- * **Dado que se pretende medir impulsos de muy alta frecuencia es posible registrar los impulsos, con muy poca energía, que preceden realmente al fenómeno de rotura generalizado que desencadena un D.I.**

En contrapartida a estas dos claras ventajas hay que tener presente que debido a la pequeña energía de los impulsos de E.A. y, sobre todo, debido a sus elevadas frecuencias se producen una rápida amortiguación de los impulsos producidos, de tal forma que los captadores a utilizar deben colocarse en las proximidades del foco emisor si se quiere obtener medidas significativas.

La E.A. presenta una posibilidad adicional como herramienta de investigación debido al efecto KAISER (1.953) que básicamente consiste en que un material no inicia su emisión acústica hasta que no alcanza el nivel tensional a que ha estado sometido anteriormente. Esta es una herramienta que parece muy útil para determinar, indirectamente, el estado tensional inicial en un macizo rocoso.

3.4.2. Equipos.

Los equipos para la observación de los fenómenos de E.A. son conceptualmente idénticos a los de microsísmica con la salvedad de que los captadores no pueden ser geófonos, sino que son acelerómetros con frecuencia propia superior a 1.000 Hz, que son capaces de dar una frecuencia plana hasta varios cientos de KHz.

Consecuentemente con esto la manipulación de las señales debe hacerse en frecuencias de varios KHz lo cual implica la utilización de ordenadores de cálculo mucho más potentes que en el caso de fenómenos de microsísmica.

3.4.3. Aplicaciones típicas.

Las aplicaciones de la emisión acústica son realmente antiguas ya que se remontan a las experiencias de OBERT en una mina de plomo y zinc de Oklahoma (USA) a principios de los años 40. Sin embargo, como ha sucedido con técnicas similares, solo con el gran desarrollo de la microinformática, las técnicas basadas en la E.A. han pasado a ser una herramienta habitual para controlar la estabilidad de las excavaciones subterráneas.

En los apartados siguientes se presentan algunos ejemplos recientes de las aplicaciones de la E.A. para el control de la estabilidad de estructuras subterráneas.

3.4.3.1. Sistema CAMAC.

El Sistema CAMAC probablemente será el más completo de cuantos existen en el mundo para realizar investigaciones sobre E.A. en minería y que ha sido creado para trabajar en el distrito minero de COEUR D'ALENE en Idaho (USA).

Los requisitos que el U.S. BUREAU OF MINES consideraba indispensables para un equipo de E.A. son los siguientes:

- 1.- Controlar un sistema multicanal de adquisición de datos a la frecuencia de 10 MHz por canal y con una producción de algunos eventos por segundo.

- 2.- Adquirir los datos de un sistema multicanal a la frecuencia de 100 KHz por canal y con una producción de decenas de eventos por segundo.
- 3.- Adquirir, registrar y analizar los datos en modalidad multitarea y multipuesto.
- 4.- Ser compacto, robusto y capaz de ser montado en un rack convencional para transportarlo.

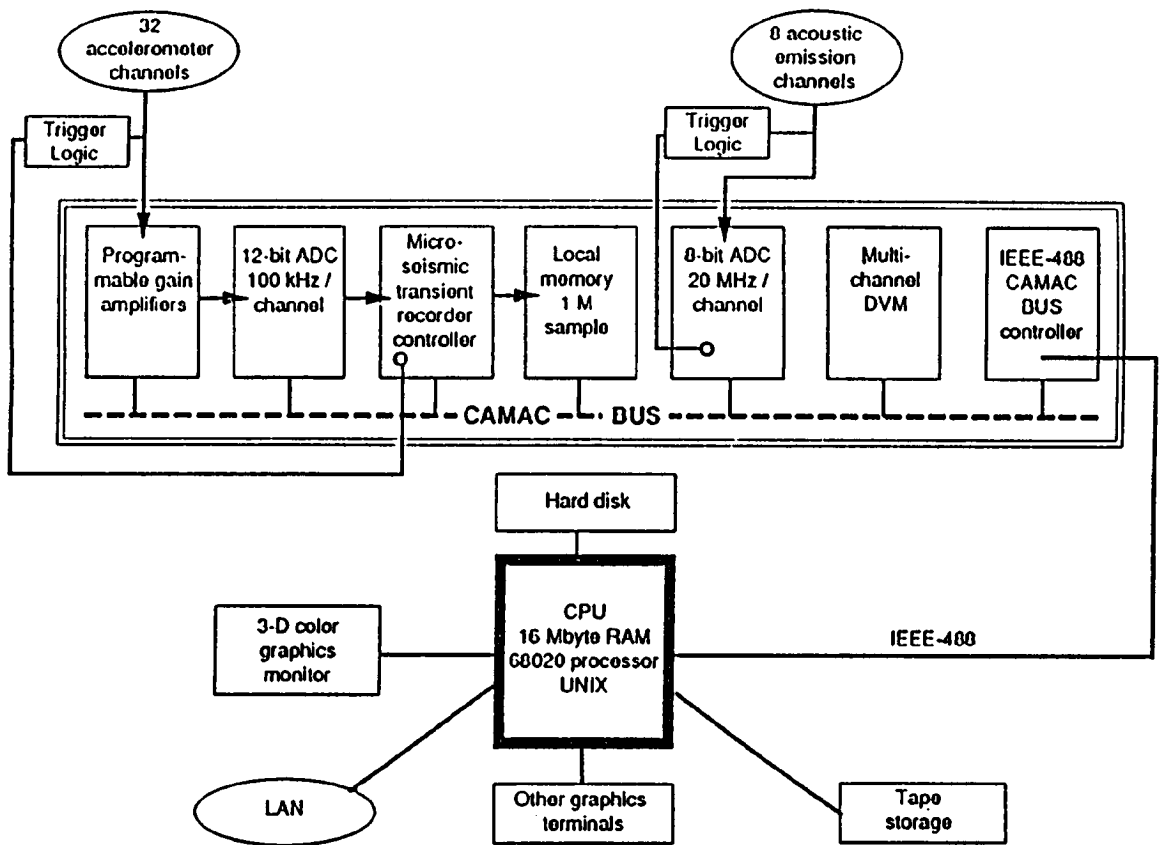
Los equipos comerciales existentes en USA cumplían los requisitos 2, 3 y 4 pero no el 1; por ello el US Bureau of Mines decidió crear un equipo específico, denominado CAMAC, cuyas características se describen a continuación.

3.4.3.1.1. Hardware de adquisición de datos.

El Sistema CAMAC se basó en un equipo concebido para realizar experimentos en el campo de la física de altas energías y sus componentes eran bien conocidos.

En la Figura N° 12 se muestra la configuración del hardware del Sistema CAMAC. Consta de 32 acelerómetros que muestrean a 100 KHz por canal, con una memoria cada uno de 2 megabyte, y 8 acelerómetros que muestrean a 20 MHz cada uno con 16 Kbyte de memoria cada uno.

Existen dos circuitos de disparo constituidos por sendas señales analógicas de acelerómetros que se comparan con las enviadas por cada canal.



LAN = Local area network

IEEE-488 = GPIB

FIGURA Nº 12. HARDWARE DEL SISTEMA CAMAC

3.4.3.1.2. Hardware de cálculo.

Para la adquisición y análisis de los datos, en función multitarea, se dispone de una estación de trabajo MC-68020 que trabaja en UNIX.

El sistema está configurado con 16 megabytes de RAM y 130 megabytes de disco duro. Se dispone de un acelerador de gráficos que permite examinar las señales en tres dimensiones, con una rotación continua del punto de vista, lo cual es muy útil para correlacionar la actividad de E.A. con las explotaciones mineras.

El sistema tiene una gran habilidad para archivar datos en una cinta de 536 megabytes que supone unos 10 días de auscultación.

3.4.3.1.3. Software.

El software ha sido específicamente creado por el U.S. Bureau of Mines y realiza las funciones que se muestra en el diagrama de la Figura Nº 13.

Una de las tareas más importantes del software del CAMAC es configurar los módulos de adquisición de datos definiendo para cada convertidor analógico/digital: número de canales de muestreo, en 8 y 12 bits, muestras por canal, velocidad de señales a retener antes del disparo del sistema y ganancias para cada canal.

Así mismo el software del CAMAC gestiona todo el almacenamiento de datos, tardando de 2 a 3 segundos en transferir un evento, que suponga una información de 200 kilobyte, y volver a rearmar el sistema.

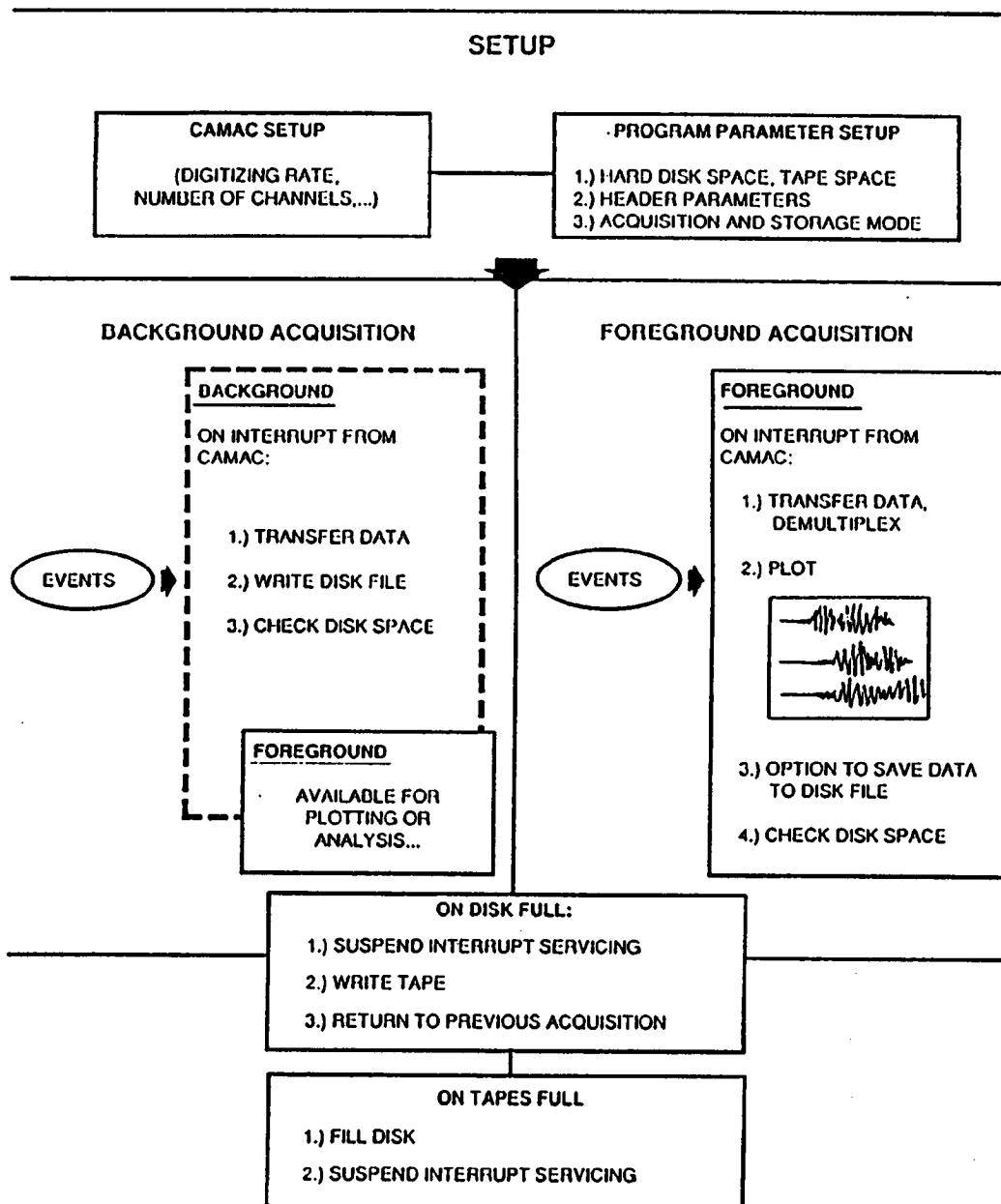


FIGURA N° 13. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA ADQUISICION DE DATOS EN EL SISTEMA CAMAC

El software del CAMAC permite trabajar eficazmente con gráficos acelerados en modo interactivo, proporcionando rápidamente un elevado número de parámetros que definen las señales de E.A. registradas.

3.4.3.2. Experiencias en la cuenca de Hokkaido.

En la cuenca de Hokkaido, Japón, los D.I. son uno de los problemas más graves, que han acentuado su importancia al superar las explotaciones recubrimientos de unos 1.000 metros.

En estas minas se utilizan como método de prevención de D.I. los sondeos de distensión tan empleados en la cuenca del Ruhr.

Sin embargo, en razón de los accidentes ocurridos durante la perforación de los sondeos, se planteó la necesidad de disponer de un sistema para conocer la situación de las zonas potencialmente peligrosas a fin de perforar los sondeos de distensión en sus proximidades, pero sin atravesarlas, para lograr la distensión en buenas condiciones de seguridad.

Para ello se puso a punto un equipo de medida de E.A. que se utilizó en las minas AKABIRA y MINAMI-OHYUBARI, Nakayima et al. (1.981).

El equipo de E.A. está constituido por dos canales, con dos captadores y dos preamplificadores situados en el interior; un sistema de transmisión de señales al exterior y un equipo de registro y análisis, situado en el exterior. En la Figura N° 14 se presenta el diagrama de funcionamiento del sistema.

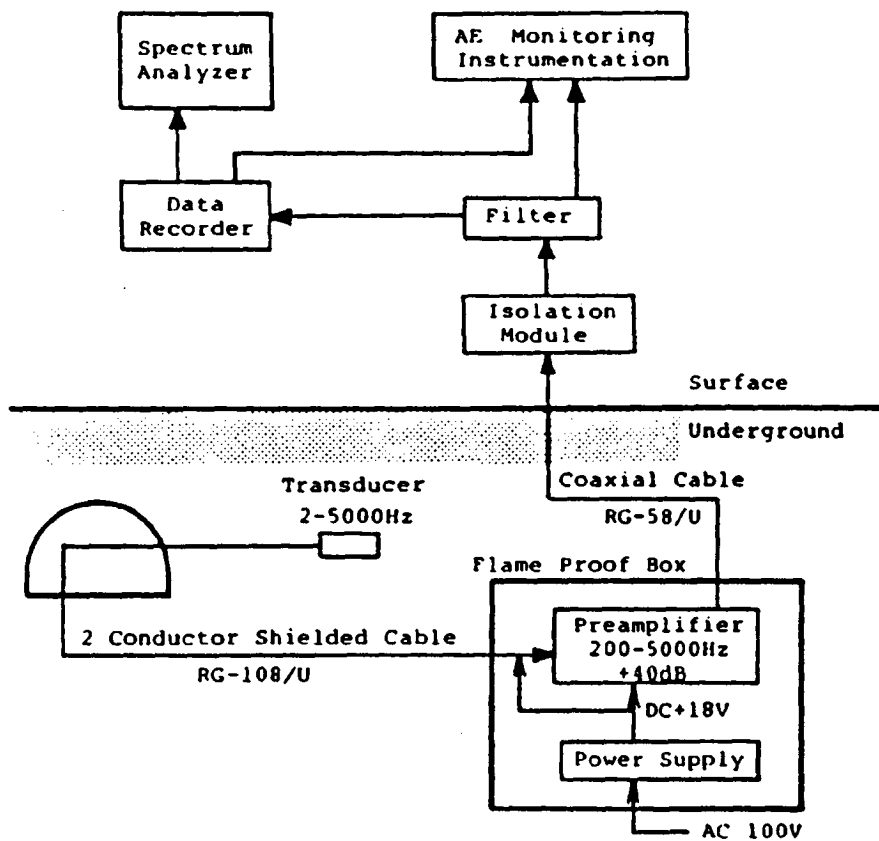


FIGURA N° 14. SISTEMA DE DETECCION DE E.A. UTILIZADO EN LA CUENCA DE HOKKAIDO, JAPON

Los captadores son acelerómetros de la marca ENDEUCO tipo D9250 que tienen una respuesta plana entre 2 y 3.000 Hz. Los captadores estaban unidos, mediante un cable blindado de 50 a 300 m de longitud, a sendos preamplificadores de 40 dB con capacidad de filtrado entre 200 y 5.000 Hz situados en un cofre antideflagrante. El circuito entre el captador y el preamplificador era de seguridad intrínseca, trabajando a 18 V.

Las señales se transmitían, por cable, hasta el exterior recorriendo una distancia de 3 a 6 Km; eran almacenadas y registradas en un analizador de espectros NICOLET 440B.

Para situar el foco de emisión acústico se estableció el algoritmo presentado en la Figura N° 15.a, a que permite determinar la distancia (X) entre el foco y la boca del sondeo mediante la expresión

$$[L - (x-a)]^2 + h^2 = [\sqrt{(x-a)^2 + h^2} + V_p \cdot \Delta t]^2$$

donde:

X = distancia entre la boca del barreno y el foco.

L = distancia entre los dos captadores

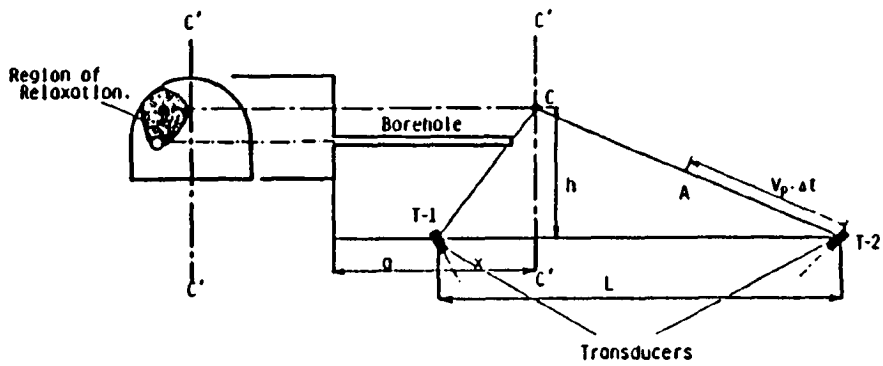
a = distancia entre la boca del barreno y el primer captador

h = distancia entre los puntos C y D de la Figura N° 15.a

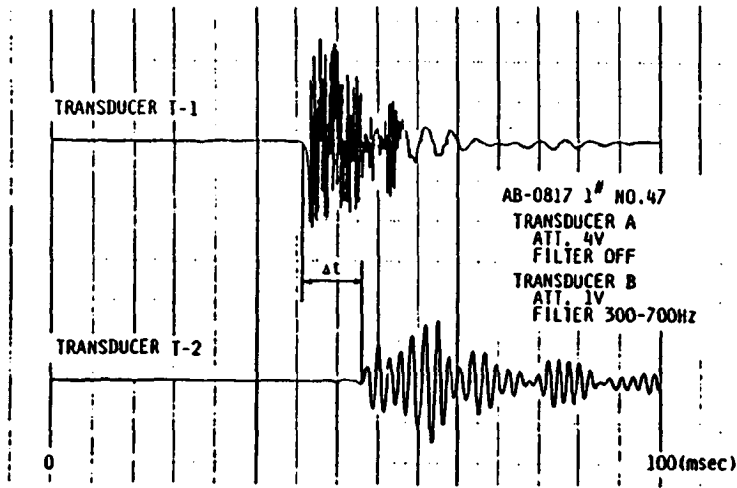
V_p = velocidad de propagación de los impulsos de E.A.

Δt = diferencia en los tiempos de llegada del impulso a los dos captadores.

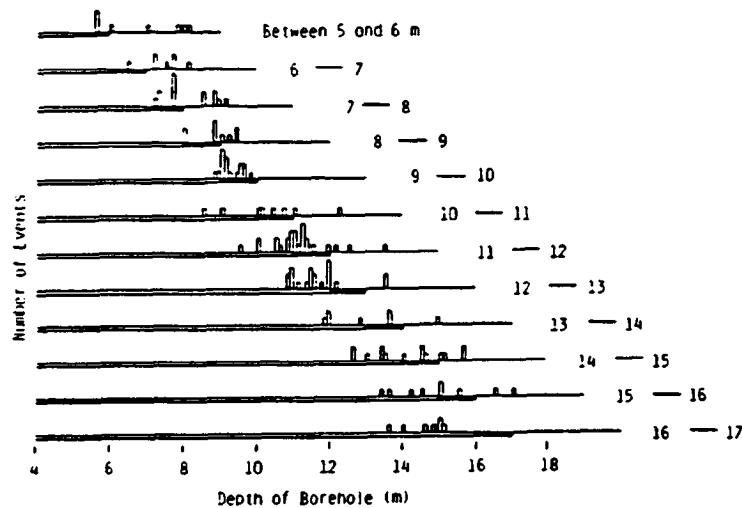
En la Figura N° 15.b se presentan dos señales típicas de E.A. y en la N° 15.c los resultados de la localización realizadas.



A.- MODELO



B.- RETARDO DE LAS SEÑALES



C.- LOCALIZACION DE FOCOS

FIGURA N° 15. LOCALIZACION DE FOCOS DE E.A. EN SONDEOS

En la Figura N° 16 se presenta la distribución de zonas peligrosas determinada mediante el equipo de E.A. trabajando en varios sondeos.

3.4.3.3. Experiencias en España.

El diciembre de 1.987 se firmó el convenio de investigación 7220/AF-751 entre la CECA y GEOCONTROL, S.A. para poner a punto un "SISTEMA DE CONTROL DE LA ESTABILIDAD BASADO EN LA EMISION ACUSTICA". Posteriormente OCICARBON decidió financiar complementariamente esta investigación que debe finalizar en 1.991. CELADA (1.989).

La investigación se ha planteado en tres etapas siguientes:

- * Definición de los equipos
- * Ensayos de campo
- * Ensayos en mina

3.4.3.3.1. Definición de equipos.

Para definir adecuadamente los equipos a utilizar, particularmente el rango de frecuencia de los captadores, se realizaron 86 ensayos en laboratorio auscultando la E.A. producida durante procesos de rotura a compresión de probetas de antracita.

La emisión acústica se midió con captadores Bruel-Kjaer tipo 8312, con respuesta entre 0,1 y 1 MHz, y del tipo 8313 con respuesta entre 50 KHz y 600 KHz.

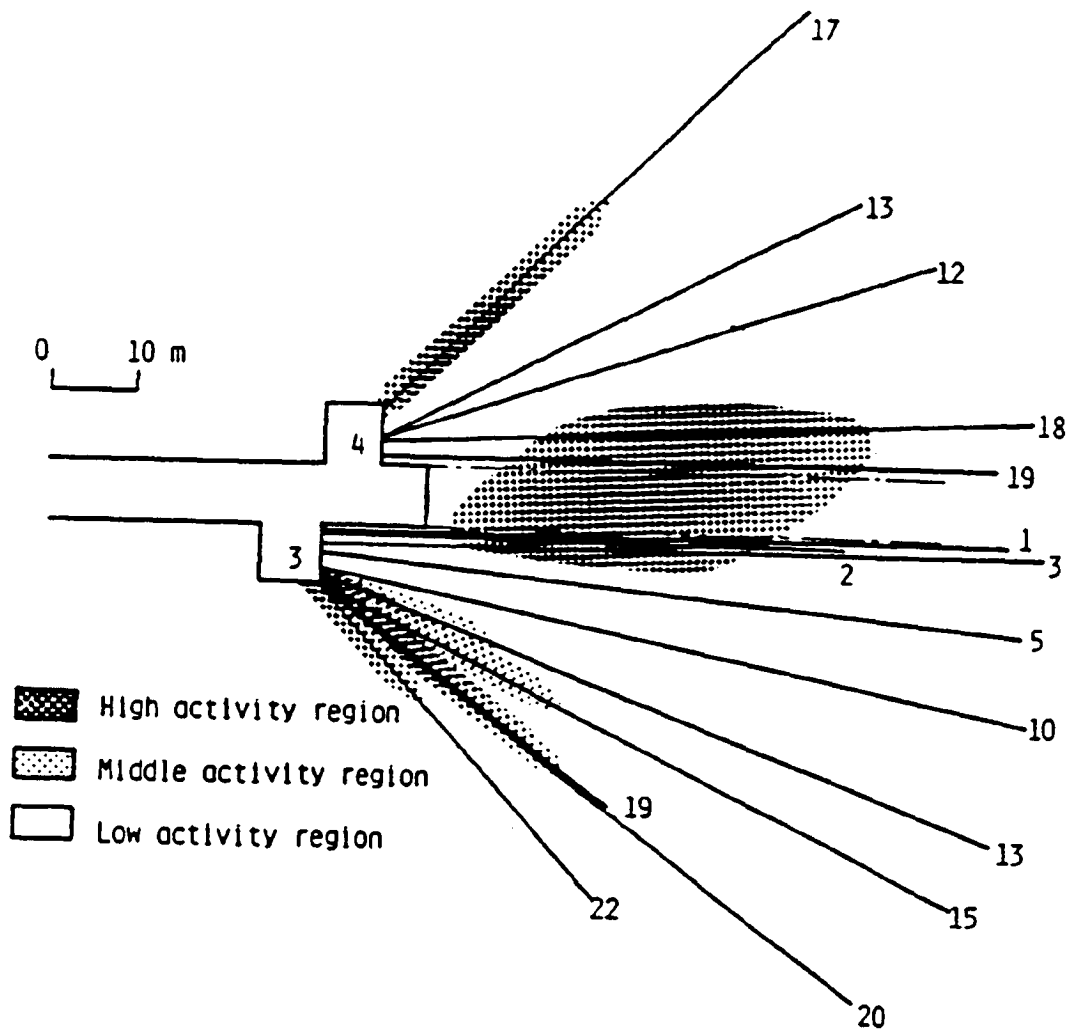


FIGURA Nº 16. LOCALIZACION DE ZONAS DE FUERTE EMISION ACUSTICA EN LAS PROXIMIDADES DE UNA GALERIA DE TAJO

Para acondicionar la señal se utilizó un amplificador Bruel-Kjaer tipo 4429 y un osciloscopio digital Rapid Systems tipo 1.200 con dos canales de entrada, frecuencia de muestreo de 1 MHz y 32 Kbytes de memoria RAM para almacenar los eventos.

Todo el equipo ha sido controlado por un ordenador tipo AT con microprocesador 80286 y coprocesador 80287, creándose el software necesario para ello.

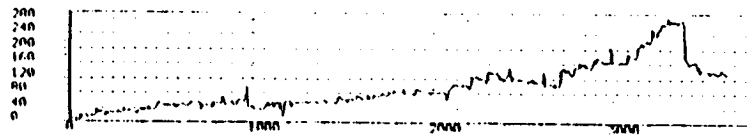
En cada uno de los ensayos se ha registrado y calculado los siguientes parámetros:

- **Presión sobre la probeta de antracita**
- **Stress-factor**
- **Acumulación de eventos**
- **Distribución de energía acumulada**
- **Velocidad de producción de eventos**
- **Variación de la energía de los eventos en función del tiempo**

En la Figura N^o 17 se presenta uno de los registros típicos obtenidos en los ensayos realizados.

3.4.3.3.2. Ensayos de campo.

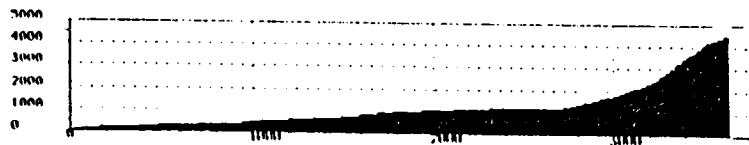
Una vez puesto a punto el equipo de registro y análisis se realizaron ensayos en las capas de antracita de las explotaciones a cielo abierto que Antracitas de S. Luis, S.A. tiene en Guardo (Palencia).



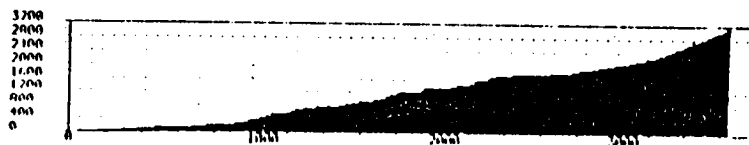
1.- EVOLUCION DE LA CURVA DE PRESIONES



2.- CURVA DE STRESSADOR



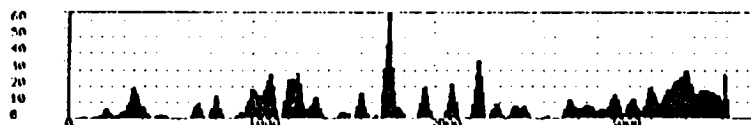
3.- CURVA DE EVENTOS ACUMULADOS



4.- CURVA DE ENERGIA ACUMULADA (KJ/CM3)



5.- DERIVADA PRIMERA DE LA CURVA 3



6.- DERIVADA PRIMERA DE LA CURVA 4

FIGURA Nº 17. DISTRIBUCIONES TIPICAS DE PARAMETROS QUE DEFINEN LA E.A. DURANTE UN ENSAYO DE LABORATORIO

Los ensayos se realizaron produciendo la rotura de la capa de carbón mediante una cuña de acero accionada hidráulicamente o mediante un cemento expansivo.

A partir del registro de los procesos de E.A. generados en los ensayos de campo se han obtenido dos conclusiones importantes:

- * Por encima de los 100 KHz los impulsos de E.A. se atenúan a pocos centímetros del foco emisor.**
- * Para que las señales de 60 KHz sean manejables es necesario disponer de una ganancia de amplificación del orden de 100 dB.**

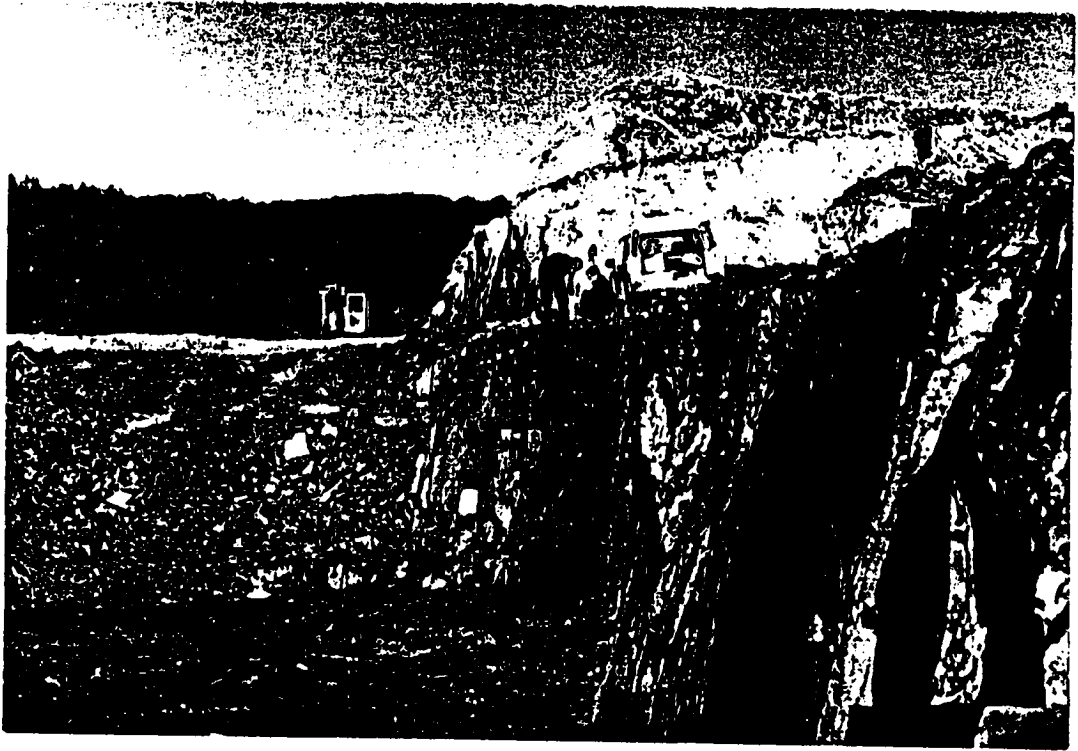
En la Fotografía N° 4 se muestra una vista del lugar del ensayo y en la N° 5 se ofrece un detalle de los captadores utilizados.

3.4.3.3.3. Ensayos en mina.

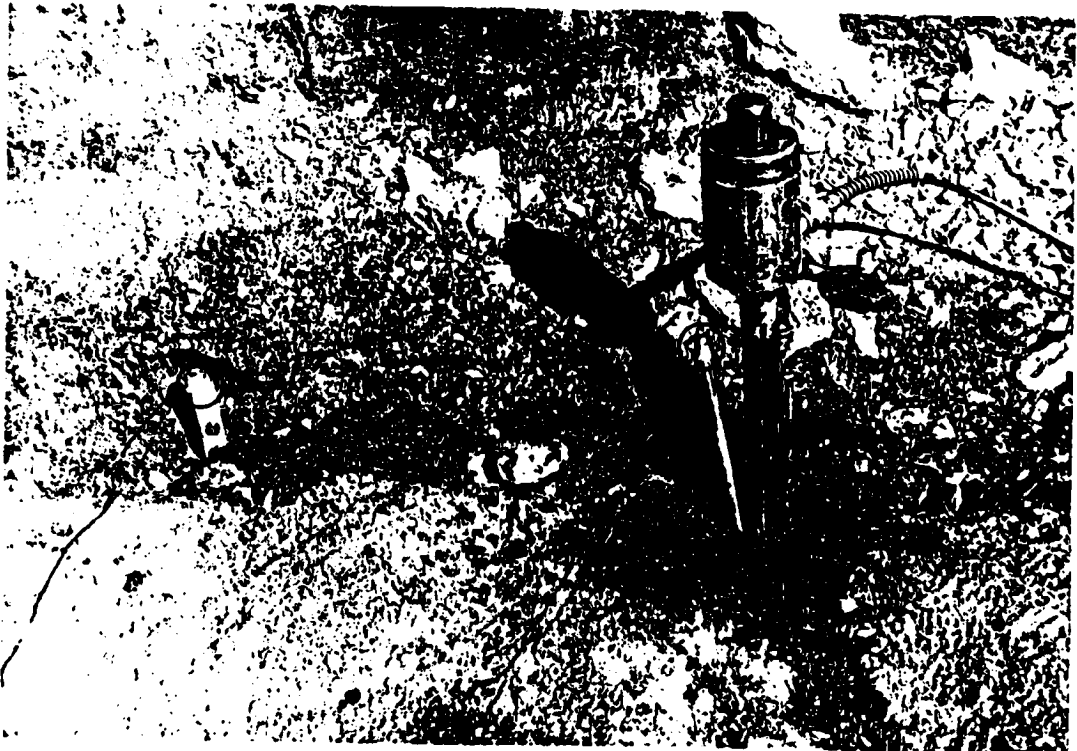
A partir de la información adquirida en las etapas previas de la investigación se ha diseñado el equipo de E.A. que deberá ser ensayado en la mina y cuyo diagrama de funcionamiento se muestra en la Figura N° 18.

Este equipo permite realizar las siguientes funciones:

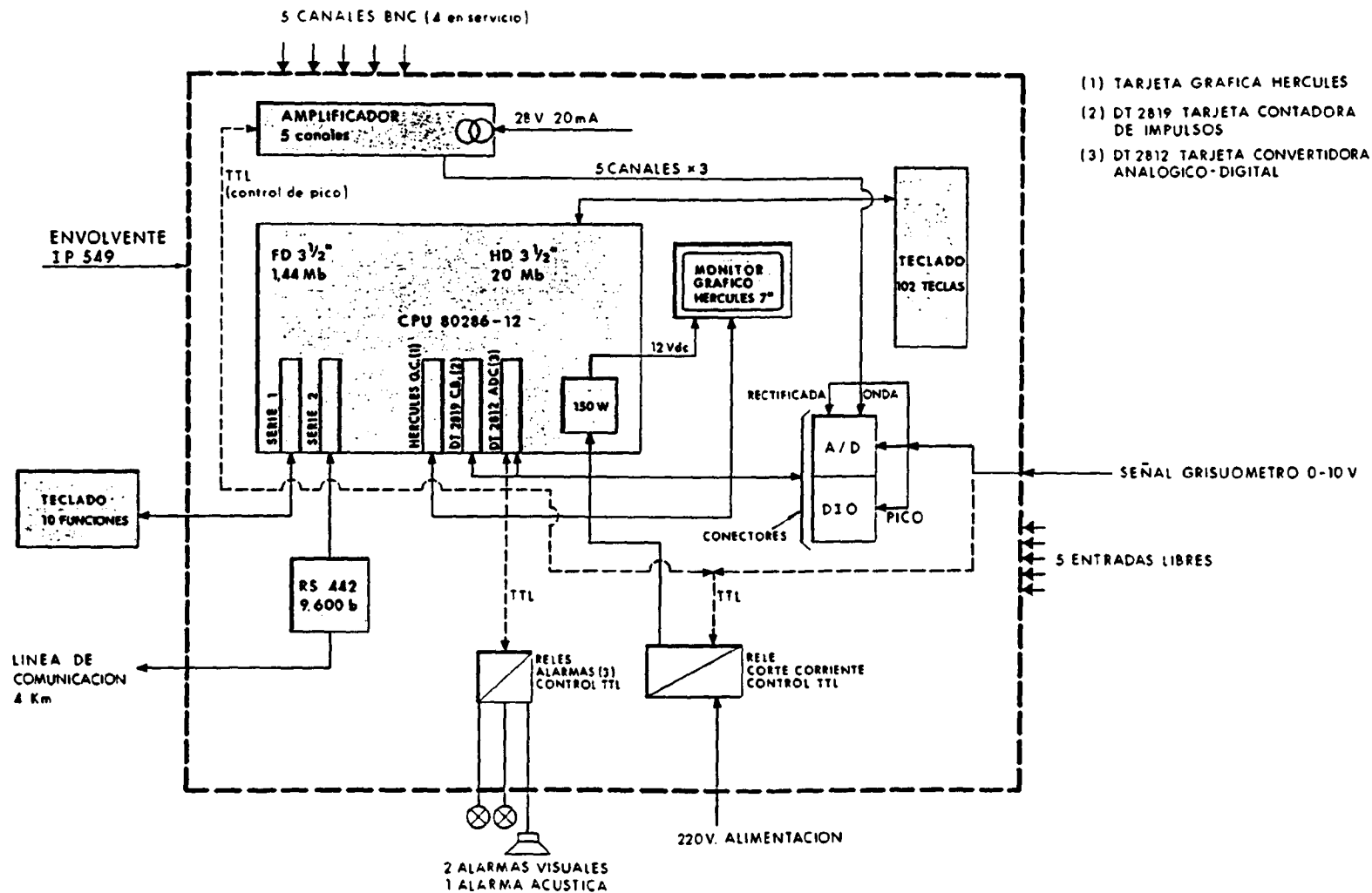
- * Registrar procesos de E.A. en cuatro canales y tener uno de reserva.**
- * Acondicionar y amplificar hasta cinco canales de registro con ganancia de amplificación de 100 dB.**



FOTOGRAFIA N° 4. ENSAYOS DE E.A. EN LA CORTA DE ANTRACITAS DE S. LUIS, S.A.
(GUARDO, PALENCIA).



FOTOGRAFIA N° 5. DETALLE DEL EQUIPO HIDRAULICO EMPLEADO PARA ROMPER EL CARBON
Y CAPTADORES UTILIZADOS



- (1) TARJETA GRAFICA HERCULES
- (2) DT 2819 TARJETA CONTADORA DE IMPULSOS
- (3) DT 2812 TARJETA CONVERTIDORA ANALOGICO-DIGITAL

FIGURA Nº 18. SISTEMA DE CONTROL DE EMISION ACUSTICA DE GEOCONTROL, S.A.

- * Realizar el análisis, presentación de datos en una pantalla y transmisión de ellos hasta una distancia de 4 Km a 9.600 baudios.**
- * Permitir la programación y acceso al ordenador de cálculo mediante teclado externo.**
- * Producir dos alarmas visuales y una acústica.**
- * Suspender el trabajo a la orden de un grisuómetro, de análisis continuo, que controla la proporción de CH₄ en la atmósfera.**

Los acelerómetros utilizados están fabricados por PHISICAL ACOUSTICS CORPORATION (USA) y son del tipo RGI que dan señal utilizable entre 25 y 500 KHz. Estos acelerómetros tienen un preamplificador incorporado, que da una ganancia de 40 dB, lo cual permite que la distancia entre el captador y el amplificador-acondicionador sea hasta de 1.000 m.

Los cálculos serán realizados por un microordenador, compatible IBM, equipado con un microprocesador INTEL 80286 trabajando a 12 MHz y programado en QUICK BASIC y ENSAMBLADOR.

El muestreo se realiza con una tarjeta de DATA TRANSLATION tipo DT 2812 con seis canales a 60 KHz y un contador de eventos a 600 KHz, que hace las funciones de osciloscopio.

El conteo de los eventos se hace con una tarjeta de DATA TRANSLATION tipo 2819 que dispone de cinco canales de conteo a 5 MHz y dos salidas digitales.

El amplificador-acondicionador está siendo fabricado por NDT Ingenieros, S.A. y el resto del equipo será construido y montado, en un envoltorio con grado de protección IP-549, por AITEMIN.

Se espera iniciar los ensayos en la mina durante el mes de Mayo de 1.991 y para ello se ha escogido la Capa 6 de ANTRACITAS MINA EUGENIA, S.A. que se explota por frente invertido.

3.4.4. Posibilidad de aplicación a la detección de derrabes.

Las técnicas de E.A. presentan una clara ventaja ante la posibilidad de ser aplicadas a la detección de derrabes, basada en que trabajan con eventos de muy poca energía.

En contrapartida, la utilización de las técnicas de E.A. puede plantear problemas importantes derivados de las altas frecuencias con que se trabaja y del hecho de que actualmente, según la información de que se dispone, no hay acelerómetros de seguridad intrínseca.

Ambas circunstancias deberían ser objeto de una investigación; definiendo en primer lugar las frecuencias de trabajo más razonables para la detección de derrabes y estudiando un modo de protección, probablemente por encapsulado, de los acelerómetros comercialmente disponibles.

4.- POSIBLES LINEAS DE INVESTIGACION.

Una vez que se han expuesto las técnicas geofísicas que, de alguna manera, se han mostrado eficaces en el reconocimiento de macizos rocosos o en la prevención de fenómenos dinámicos; en los apartados siguientes se hacen unos comentarios sobre las posibilidades de las distintas técnicas para ser aplicadas a la detección de derrabes y las posibles líneas de investigación que podrían seguirse en el futuro.

4.1. Posibilidades de las distintas técnicas.

De las cuatro técnicas presentadas, el geo-radar es la que parece tener las menores posibilidades de poder ser utilizada con éxito en la prevención de los derrabes debido a las siguientes causas:

- * Es dudoso que las zonas de la capa de carbón sometidas a sobrepresiones presenten un contraste de propiedades dieléctricas suficientes para ser detectadas por los impulsos del geo-radar.**
- * La penetración de los impulsos del geo-radar emitidos con antenas de pequeña dimensión es del orden de pocos metros, que es claramente insuficiente para detectar las zonas potencialmente derrabables de un taller.**
- * La presencia de agua, que es absolutamente habitual en las minas, atenúa notablemente la propagación de los impulsos electromagnéticos disminuyendo sensiblemente la penetración del geo-radar.**

- * De la información disponible se deduce que no hay equipos comerciales de geo-radar que puedan ser considerados antideflagrantes con los métodos habituales de protección.**

De los tres métodos restantes el que parece tener mejor posibilidades es el de la tomografía sísmica, en base a las siguientes razones:

- * La tomografía sísmica se ha revelado una técnica perfectamente capaz de discriminar las zonas sometidas a sobretensión en las capas de carbón.**
- * El alcance de las tomografías sísmicas puede estimarse alrededor de unos 100 m, que puede ser suficiente para barrer toda la anchura de los talleres normales en la minería española del carbón.**
- * La presencia de agua no supone una atenuación de los impulsos sísmicos.**
- * Existen equipos comerciales que cumplen las condiciones exigidas para ser considerados antideflagrantes.**

Sin embargo la aplicación de las técnicas de tomografía sísmica presenta un inconveniente importante derivado del hecho de que, actualmente, la tomografía proporciona una instantánea del estado tensional del macizo rocoso y no permite una valoración continua que pueda ser utilizada como herramienta de prevención permanente.

Las técnicas sísmicas y sismoacústicas están bastante desarrolladas en la minería del carbón y existen equipos comerciales que pueden ser considerados antideflagrantes. Sin embargo estas técnicas están orientadas a detectar impulsos de gran energía y es muy dudoso que un derrabe, al menos los considerados típicos que movilizan pocas toneladas de carbón, vaya precedido de una disipación importante de energía.

Las técnicas de emisión acústica, también utilizadas en la minería del carbón, sí están orientadas a la detección de señales de baja energía; pero presentan inconvenientes derivados de la rápida amortiguación de los eventos, lo que limita la profundidad efectiva en el que el terreno está controlado, y de la dificultad que supone disponer de equipos antideflagrantes.

4.2. Planteamientos futuros.

De todo lo anterior hay que retener dos ideas importantes:

- * Actualmente no hay ningún método geofísico que pueda aplicarse específicamente a la detección de derrabes.**
- * Las técnicas de tomografía sísmica, microsísmica y emisión acústica presentan un interés potencial elevado para ser utilizadas como medios de prevención de derrabes.**

Por todo lo anterior cualquier planteamiento futuro debiera respetar los siguientes principios:

- * Ha de tratarse de una investigación aplicada que necesitará un periodo de trabajo mínimo de dos años y, a ser posible, superior.**
- * Aunque se trabaje en minas de carbón hay que procurar que se puedan utilizar equipos no considerados como antideflagrantes, para no encarecer unos equipos que a lo mejor luego no sirven.**
- * Debiera plantearse la utilización de las tres técnicas seleccionadas como potencialmente aceptables para determinar cual es realmente la mejor.**

De acuerdo con lo anterior podrían, entre otras, establecerse las siguientes líneas futuras de investigación:

- Posibilidad de crear un equipo de tomografía sísmica cuasi-permanente, que trabajará en sondeos y auscultará el macizo de carbón con una periodicidad razonable dentro del ciclo de trabajo.**
- Estudio de la actividad sísmica o sismoacústica en una capa susceptible de producir derrabes de carbón.**
- Estudio de la actividad de emisión acústica que puede proceder a la generación de un derrabe de carbón.**

5.- BIBLIOGRAFIA.

- * CELADA TAMAMES, B.; VARONA ERASO, P.; VELASCO TRIVIÑO, E.
Sistema de control de la estabilidad basado en la emisión acústica
Canteras y Explotaciones. Madrid, Noviembre 1.989.

- * COON, J.B.; FOWLER, J.C. y SCHAFERS, C.J.
Experimental uses of short pulse radar in coal seams.
Geophysics, 1.981, vol. 46.

- * KAISER, J.
Recognition an behaviour of noise measurements in metal materials un-
der various stresses.
Arkiv fur das Eisenhüttenwesen. vol 25, Nº 43, 1.953.

- * MC DONALD, P.; BROWN, K.M.
A Microseismic Study of an outburst-prone coal seam.
III Conference of Acoustic Emission / Microseismic Activity
Pennsylvania State University, Oct. 1.981.

- * MAGRON, A.; DEJEAN, M.
Sismique et sismoacoustique appliquee a la planification et la surveillan-
ce des exploitations sujettes a coups de terrains
X Congreso Internacional de Presión de Terrenos, Dusseldorf, 1.989.

- * MOREY, R.M.
Coal thickness profiling using impulse radar
Geophysical Survey Systems Inc. Nw. Hampshire. USA.

* NAKAJIMA, I.; WANATABE, Y.; FUKAI, T.

Acoustic emission during advance boring associated with the prevention of coal and gas outbursts.

III Conference of Acoustic Emission and Microseismicity. Pennsylvania State University, Oct. 1.981.

* OBERT, L.

Use of sub-audible noises for prediction of rock burst.

USBM Rep. of Investigations N° 3555, 1.941.

* REVALOR, R.; DECHELETTE, O.; VERSTRAETE, M.

Detection of coal-bump risk situations using seismo-acoustic monitoring at the Provence collieries.

Mining Science and Technology, 1.986, N° 4.

* SMITH, J.; DYER, B.C.

Seismic tomography as a tool for monitoring condition of a concrete dam.

Proc. Instn. C.v. Engrs. 1.990, June.

* STYLES, P.; JOWITT, T.; BROWNING, E.

Surface Microseismic Monitoring for the Prediction of outbursts.

Geonica, S.A. Madrid, 1.990

Madrid, Marzo 1.991



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

PROYECTO DE INVESTIGACION DE DERRABES DE CARBON

ANEJO VI

**Influencia de la intensidad de la ventilación sobre la dureza del
carbón y su posible utilización del fenómeno para reducir el riesgo
de derrabes o desprendimientos**

Ingenieros de Minas Consultores, S.A.- Proyecto de derrabes de carbón



MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA

01115

**PROYECTO DE INVESTIGACION DE
DERRABES DE CARBON**

INFLUENCIA DE LA INTENSIDAD DE LA VENTILACION SOBRE LA DUREZA DEL CARBON Y POSIBLE UTILIZACION DEL FENOMENO PARA REDUCIR EL RIESGO DE DERRABES O DESPRENDIMIENTOS.

DICIEMBRE 1.990



INGENIEROS DE MINAS CONSULTORES, S. A.

INFLUENCIA DE LA INTENSIDAD DE LA VENTILACION SOBRE LA DUREZA DEL CARBON Y POSIBLE UTILIZACION DEL FENOMENO PARA REDUCIR EL RIESGO DE DERRABES O DESPRENDIMIENTOS.

1 - GENERALIDADES

En la explotación de capas de carbón con fuerte desprendimiento de grisú se ha venido observando desde hace tiempo una relación entre la resistencia mecánica del carbón en el frente de los trabajos en avance y la intensidad de la corriente de ventilación derivada hacia ese frente.

Cuando empeoran las condiciones de ventilación, desciende notablemente la resistencia del carbón en el frente mientras que esta aumenta, por el contrario, con una intensificación de la ventilación.

El fenómeno fue observado y utilizado en muchos casos por los picadores para facilitar el arranque del carbón, especialmente en las guías donde se podía variar fácilmente la intensidad de la ventilación.

La dureza del carbón aumenta también en el entorno inmediato de los sondeos de captación de gas cuando estos se practican con el fin de evitar los

desprendimientos bruscos de grisú.

En la explotación de capas muy inclinadas, con tendencia a desprendimientos instantáneos de grisú, se observa que las zonas de máximo peligro de desprendimiento coinciden con las partes del frente de la galería de más difícil ventilación como ocurre con los huecos o campanas de voladuras de los distintos tramos, picado de carbón al techo etc, así como también con las zonas de carbón poco consistente.

El efecto de variación de la dureza del carbón en función de la intensidad de la ventilación, observado de forma práctica por los trabajadores de la mina, ha llamado también la atención de los científicos y ha sido objeto de un cierto esfuerzo investigador, desarrollando principalmente en la Unión Soviética.

2 - ENSAYOS DE LABORATORIO

Para investigar las causas del fenómeno se realizaron ensayos de Laboratorio en el Instituto Minero de la Academia de Ciencias de la URSS (*) y en el Instituto de Investigación para la Seguridad en las Minas, situado en Makeievka (Ucrania).(**)

En todos los casos se ha confirmado el hecho de una dependencia entre la dureza del carbón y la proporción de metano en la zona ventilada inmediata al frente de la galería.

(*). M.M. Protodiakonov e I.L. Ettinger.

"Variación de la dureza de la hulla cuando se satura con metano" Doklady AN SSSR, Tomo 84, Nº6, 1.952.

I.L. Ettinger, E.G. Lamba, V.G. Adamov.

"El papel del gas como factor que disminuye la resistencia del carbón". Doklady AN SSSR, Tomo 99, Nº6, 1.954.

(**) I.V. Bobrov, J.N. Fertelmeister, S.I. Smoliakov.

"Sobre la cuestión de la influencia del contenido en gas de la ventilación de una labor minera en la resistencia del carbón".

Contenido en el libro: Desprendimientos de gas y formación de polvo en las capas de carbón. Mak NII (Instituto de Investigación para la Seguridad en las Minas de Makeievka). Tomo 7, 1.953.

3 - INVESTIGACION EN LAS CONDICIONES NORMALES DE TRABAJO.
DESCRIPCION Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.

El efecto de variación de las características mecánicas del carbón con las condiciones de ventilación fue investigado también en varias minas de la cuenca del Donetz dentro de circunstancias de trabajo normales.

En primer lugar, se efectuaron observaciones provisionales en las capas Beral (Mina Stalin) y Almasnii (Mina Iliitsch del combinado Kadievka).

Observaciones más detalladas fueron realizadas en la capa Jakovlevski (Mina nº5 Osnovnaia y nº6) y en la capa Pastuchovski (Mina nº5 del combinado Boguraiev).

Las investigaciones fueron efectuadas en los frentes de pozos interiores sobre capa (explotaciones en capas de fuerte inclinación) y en chimeneas de ventilación (o bien galerías paralelas). En estas labores mineras se pudieron modificar ligeramente las condiciones de ventilación sin perturbar los trabajos ordinarios de producción.

Una de las cuestiones a resolver era la

medición de los valores característicos de la dureza del carbón en el frente a lo largo de los ensayos.

Para efectuar estas mediciones se utilizó un aparato construido por el Ingeniero L.N. Karagodin, basado en el principio general del penetrómetro.

El aparato comprende un punzón cónico de 10 a 15 cm de largo que se introduce con presión manual en el carbón. La sencillez del aparato y de su manejo permiten hacer con rapidez un gran número de mediciones en diferentes puntos del frente de carbón, con condiciones de ventilación variables.

A base de ensayos previos se decidió trabajar haciendo 12 mediciones de dureza por m² de superficie del frente lo cual puede realizarse satisfactoriamente en un tiempo de pocos minutos.

La posibilidad de determinar la dureza exclusivamente hasta los 10-15 cm de profundidad resultó suficiente ya que, como había sido comprobado por los picadores al trabajar con sus herramientas neumáticas o de mano, el efecto de variación de dureza se producía solo en la capa superficial del carbón.

Las determinaciones del contenido de metano fueron efectuadas por toma de muestras y análisis

posterior en el laboratorio del Servicio de Salvamento de la Mina.

Cuando se quería suprimir la ventilación, se desconectaba simplemente el ventilador auxiliar del frente de avance en carbón sobre el cual se efectuaban las mediciones.

El plan desarrollado en primer lugar comprendía la siguiente serie de mediciones:

- Con ventilación normal, fue medida en un frente de avance la dureza del carbón en un intervalo de 5 a 7 minutos. Después de 10 a 15 minutos se repitieron estas mediciones.

A continuación fue suprimida la ventilación del frente y durante 2 a 3 horas se midió la dureza del carbón cada 10 a 15 minutos. Seguidamente se puso en marcha de nuevo la ventilación y se repitieron las mediciones.

Mientras se efectuaban los cambios citados en la ventilación y las correspondientes mediciones de dureza, se tomaron muestras de aire en el lugar del ensayo para su análisis posterior en el Laboratorio.

Durante la realización de los ensayos se hizo

necesario trabajar con aparatos de respiración autónoma ya que la concentración de metano en el frente, al suprimir la ventilación, alcanzó en algunos casos un valor superior al 90%, después de unos 10-12 minutos.

Con los valores medios de dureza, resultantes de las mediciones efectuadas y los análisis del contenido de gas en la atmósfera del frente se trazaron diagramas como los representados en las figuras 1, 2 y 3 relacionando ambas variables.

En la figura 1 el gráfico inferior corresponde a la variación de la dureza del carbón a lo largo de la duración (4 horas) del ensayo. La calificación de dureza se establece según el valor del índice K de la escala de Protodiakonov.

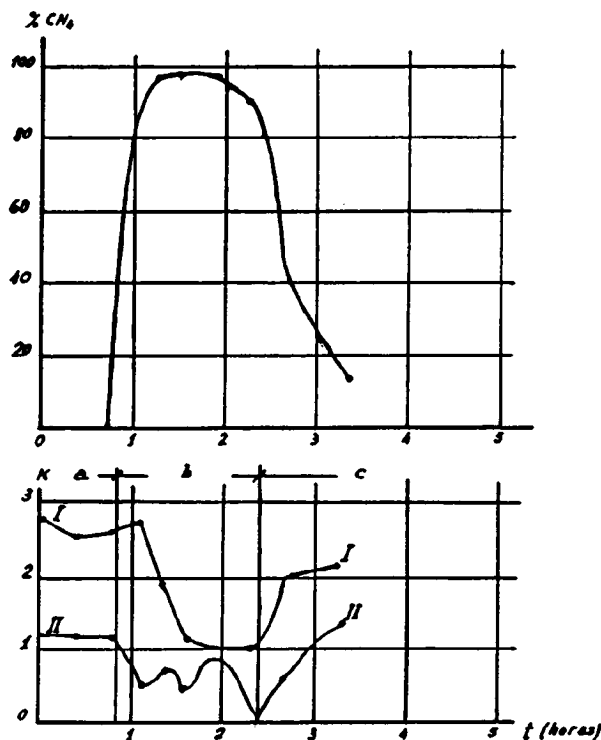


Fig. 1

Como puede apreciarse se consideran dos curvas, I y II de variación de dureza, correspondientes, respectivamente, al carbón de la parte superior y de la parte inferior del frente de avance.

En el intervalo de tiempo a la ventilación es normal y los valores de la dureza del carbón de la capa se mantienen en su valor más alto.

En el período b se ha cortado la ventilación. La dureza del carbón muestra una tendencia descendente hasta un valor mínimo que puede ser entre $1/3$ y $1/5$ del inicial.

Finalmente, en el intervalo c en el cual se ha restablecido la ventilación la dureza aumenta de nuevo hasta acercarse a recobrar totalmente, al cabo de poco tiempo, el valor inicial.

El gráfico superior de la misma figura 1 representa en ordenadas el tanto por ciento de contenido en metano a lo largo de toda la duración del ensayo.

Como puede comprobarse, en ese caso particular, el porcentaje de CH_4 en la atmósfera del lugar de ensayo ha alcanzado en poco tiempo valores extraordinariamente altos (97,5%).

La figura 2 representa los mismos gráficos correspondientes a otro ensayo.

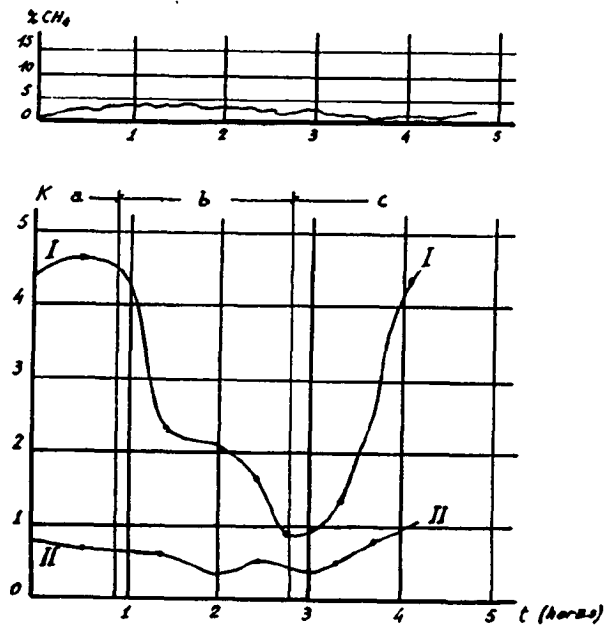


Fig. 2

La curva de variación de dureza correspondiente al carbón de la parte superior del frente experimenta variaciones importantes como en el caso anterior mientras que el carbón de la parte inferior es blando y su dureza cambia poco durante el ensayo.

Como se deduce del gráfico complementario, el desprendimiento de metano en esa capa es muy reducido y como consecuencia, el porcentaje de gas en el aire cambia poco durante el ensayo.

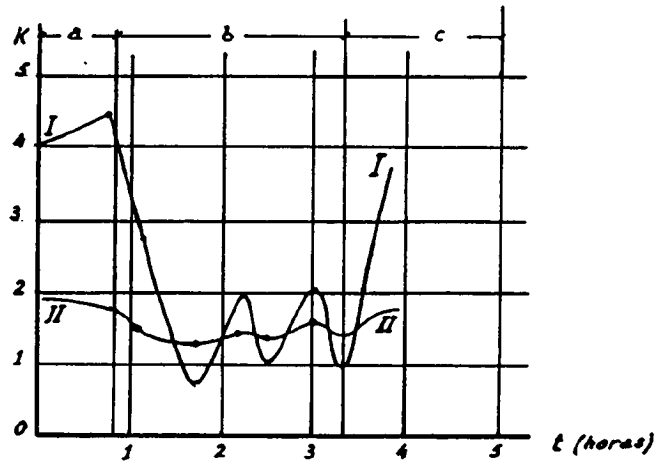


Fig. 3

En la figura 3 se representa un caso parecido a los anteriores (sin la curva de variación del contenido en CH_4). El carbón duro de la parte superior (curva I) experimenta durante el ensayo una reducción que lo hace comparable al carbón blando de la parte inferior (curva II) el cual sufre pocas variaciones.

En algunos casos, la dureza del carbón en el frente sin ventilar no pudo ser medida ya que, al poco tiempo de suprimir la ventilación, se produjo un desprendimiento súbito o derrabe en el frente donde se estaba practicando el ensayo. Puede considerarse el hecho como una prueba directa del aumento del riesgo de desprendimientos que se genera cuando las condiciones de ventilación son precarias.

De los ensayos mencionados y sus correspondientes curvas de resultados se deduce claramente la dependencia entre la dureza del carbón en un frente determinado y la existencia o no de una ventilación activa. Sin embargo resulta claro también que estos cambios de dureza no dependen exclusivamente de la variación de la presión parcial y contenido de metano en la atmósfera del frente.

Así, en el caso de la figura 1, el descenso de dureza estaba acompañado de un aumento del porcentaje de metano en el labor minera hasta el 97,5% mientras que en la figura 2, cambios de dureza similares tienen lugar con pequeños aumentos del porcentaje en CH_4 (inferiores al 5%).

Según esto, el cambio de dureza del carbón no puede atribuirse, al menos como causa principal, a la variación de la presión parcial del metano contenido en la atmósfera de la mina. Tratando de profundizar en el conocimiento del fenómeno, se realizó por los mismos investigadores una segunda serie de ensayos para buscar una interpretación más precisa de las causas de la variación observada.

El frente de una chimenea de ventilación, de la sección indicada de la figura 4, dividido en dos mitades por la entibación de madera, fue tratado por

una corriente de aire intensa y orientada sucesivamente hacia ambas mitades.

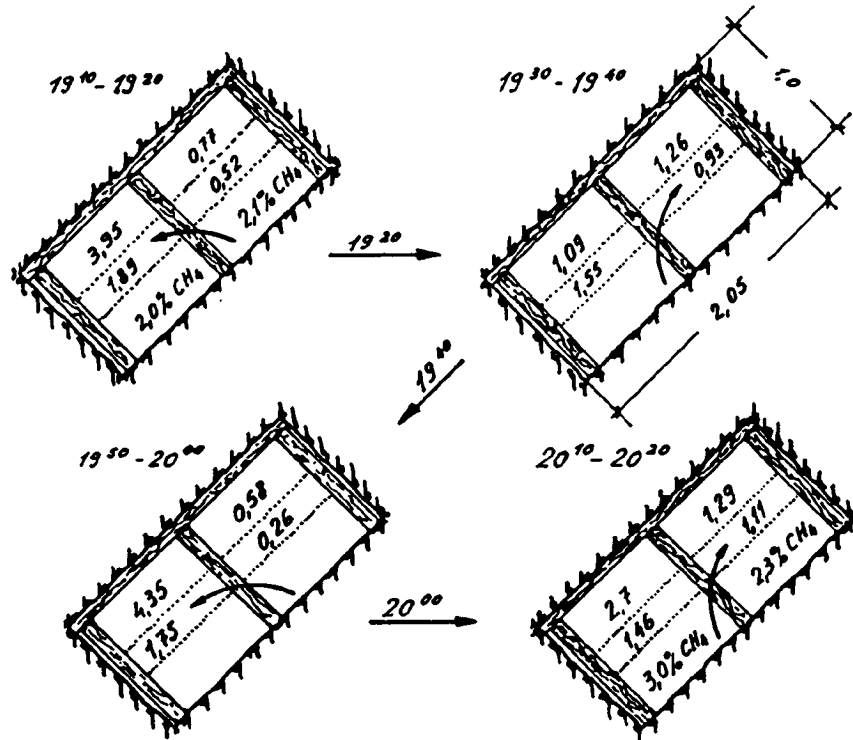


Fig. 4

El ensayo se efectuó en el orden y con los intervalos de tiempo anotados en la citada figura 4.

En primer lugar se dirigió el chorro de ventilación durante 10 minutos hacia una de las mitades del frente mientras la otra quedaba fuera de la acción directa de la corriente de aire. El porcentaje de metano en el aire de la zona de ensayo se mantuvo aproximadamente igual para las dos mitades de la chimenea (2,0-2,1%).

Después de efectuar las medidas de dureza del carbón se dirigió la corriente de aire hacia la segunda mitad durante el mismo intervalo de tiempo.

Realizadas también las correspondientes mediciones de dureza pudo apreciarse enseguida la variación de la resistencia del carbón. En la mitad donde la corriente de aire acababa de actuar intensamente sobre el frente se observaba un aumento importante de la dureza superficial mientras que esta dureza era muy inferior en la otra mitad.

El mismo ensayo, repetido a continuación volvió a dar resultados similares (ver figura citada).

Se deduce, por tanto, que la dureza superficial del carbón está influenciada por la acción directa de la corriente de ventilación sobre el frente.

Para determinar esta dependencia fueron efectuadas nuevas mediciones de la dureza del carbón con diferentes velocidades de la corriente de ventilación que incidía sobre el frente.

Los resultados de las mediciones se recogen en la figura 5 obteniéndose curvas con aspecto de parábolas.

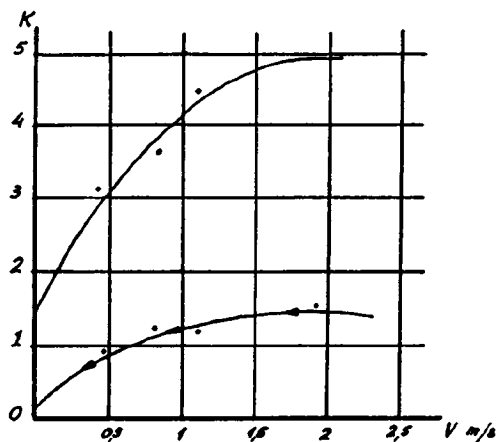


Fig. 5

En general puede observarse en estas curvas que el aumento de velocidad de la corriente de aire hasta $\approx 1,5$ m/s origina incrementos rápidos en el índice de dureza del carbón. Para velocidades mayores, la curva es más tendida y la dureza del carbón aumenta ya muy poco.

4 - INTERPRETACION TEORICA DEL RESULTADO DE LOS ENSAYOS.

Como ya se ha indicado en el apartado anterior, los cambios de dureza del carbón no pueden atribuirse sin más, a las variaciones del contenido de metano en la atmósfera de la mina sino que es preciso hacer otras consideraciones.

Los resultados de los ensayos mencionados pueden explicarse según las siguientes hipótesis:

Los gases CH_4 y CO_2 , contenidos en la masa de carbón, se encuentran en el interior de ésta tanto en estado libre como en estado combinado.

Estos gases son capaces por tanto, de penetrar en los espacios de la red molecular del carbón por lo cual, cuando se trata de capas conteniendo altos porcentajes de gas, es necesario considerar las propiedades mecánicas del sistema carbón + gas y no solo el carbón.

Dichas propiedades dependen de la cantidad de gas disuelto en el carbón. La difusión del gas en la red produce un debilitamiento de los enlaces intermoleculares lo cual es, a su vez, causa principal de la disminución de la dureza del carbón.

En general, la cantidad de gas disuelto depende de la presión de gas libre en el carbón. Con una disminución de esta presión de gas libre, se altera el equilibrio y una parte del gas pasa del estado disuelto al estado libre. Por el contrario, con un aumento de la presión de gas libre, una parte del gas pasará al estado disuelto.

Este nuevo ajuste del equilibrio va acompañado de un notable refuerzo, o debilitamiento, de los enlaces intermoleculares en el carbón y con ello, de una variación en su resistencia mecánica.

En condiciones normales, la cantidad de gas que se encuentra en la capa superficial del frente de carbón, permanece prácticamente invariable porque la desgasificación constante hacia el espacio abierto de la mina se compensa con nueva aparición de gas procedente de la parte profunda del macizo.

Este estado de régimen se mantiene siempre que se den condiciones invariables tanto en la salida de gas del macizo de carbón como en su difusión hacia el aire de la mina. Cualquier obstáculo a esta desgasificación producirá una cierta acumulación de gas en la zona superficial de carbón del frente.

Como consecuencia, resultará de ello un aumento

de la cantidad de gas disuelto en el carbón, un aflojamiento de los enlaces intermoleculares y una degradación de las propiedades físico-mecánicas del carbón.

Por el contrario, con una mejora de las condiciones de desgasificación se reduce la cantidad de gas libre en la zona superficial, una parte del gas disuelto en el carbón pasa al estado libre para compensarla, los enlaces intermoleculares se hacen con ello más fuertes y la resistencia mecánica del carbón aumenta.

La causa que dificulta y regula la desgasificación es, sin duda, la presencia de una delgada capa de metano en la superficie del frente de carbón. En condiciones de régimen esta capa se regenera continuamente con gas procedente del macizo y se mantiene estable.

Sin embargo, cuando el frente está barrido por una corriente de ventilación intensa, la capa de metano se rompe y se crean condiciones favorables para una desgasificación más rápida.

De acuerdo con las investigaciones antes descritas, para conseguir la rotura del equilibrio de la capa de metano se requiere una corriente de ventila-

ción de cierta velocidad.

El aumento de esta velocidad por encima de un valor determinado ya no produce ningún endurecimiento notable del carbón puesto que, una vez rota la capa superficial de metano, es imposible mejorar las condiciones de desprendimiento del gas.

De acuerdo con esto, las curvas que relacionan la dureza del carbón con la velocidad de la corriente de ventilación (fig.5) son cada vez más planas a medida que aumenta dicha velocidad.

Cuando la ventilación se hace más lenta, desciende mucho la dureza del carbón. Evidentemente, esta es una indicación de que la corriente de aire ya no consigue romper por completo la capa superficial de metano que continuamente se está regenerando sobre el frente.

Si se suprime totalmente la ventilación falta prácticamente las fuerzas exteriores que rompen la capa superficial de metano. La presencia de esta capa dificulta el desprendimiento del gas de tal modo que éste se acumula en el frente de trabajo y la dureza del carbón desciende a sus valores mínimos.

5 - COMPROBACION DE LAS HIPOTESIS ANTERIORES. ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA MOLECULAR.

Para la comprobación de las hipótesis expuestas en el apartado anterior en las que se supone un aflojamiento de la estructura molecular del carbón cuando este se satura con gas, se efectuó una serie de ensayos de laboratorio utilizando el análisis estructural por rayos X.

Estos ensayos fueron realizados en el Instituto Politécnico de Novocherkassk, determinándose las distancias intermoleculares en muestras de carbón preparadas convenientemente, antes y después de su saturación con gas según el método de Debye-Scherrer (ver Anexo).

La cámara tenía algunas particularidades constructivas que hicieron posible obtener máxima interferencia en la zona de ángulo pequeño. Para la saturación de las muestras, efectuada con CO_2 , fue proyectada y construida una cámara especial de gas. Como material para la muestra de contraste se utilizó polvo de molibdeno y las radiografías fueron tomadas con radiación filtrada de cobre.

Al comparar los diagramas obtenidos con las

muestras de carbón antes y después de su saturación con CO_2 , se observó claramente una variación del diámetro de la primera banda de interferencia.

Las distancias intermoleculares fueron determinadas, siguiendo los trabajos de Riley (***) con la fórmula corregida:

$$d = \frac{\lambda}{2.0,815.\text{sen } \theta}$$

en la cual

d = Distancia entre moléculas

λ = Longitud de onda de los rayos X en Angström

θ = Angulo de difracción para la primera banda de interferencia.

(***) D. Riley

"La dispersión de bajo ángulo de los rayos X por diversos carbones". Discusión con motivo de una conferencia sobre la estructura ultrafina de los carbones y cok. Londres 1.943.

Las distancias medias calculadas entre las moléculas del carbón antes y después de la saturación con gas así como después de su desgasificación final se relacionan en la Tabla 1.

De los datos de la tabla se deduce que, en todos los casos de saturación del carbón con gas, la distancia entre las moléculas aumenta, mientras que ésta se reduce, por el contrario, en los casos de desgasificación de las muestras.

En la tabla 2 se consignan los tiempos de saturación, las presiones de gas utilizadas y las variaciones de la distancia intermolecular que se han observado para distintas muestras de carbón.

Como puede apreciarse las variaciones de esta distancia muestran una dependencia de los otros factores mencionados y, dentro de ciertos límites, son tanto más grandes cuanto mayores resultan aquellos.

Los resultados del análisis radiográfico confirman por tanto la hipótesis, ya adelantada, en el sentido de que la estructura molecular del carbón se afloja cuando éste se satura con gas.

TABLA 1

<i>Distancia intermolecular media antes de la saturación del carbón con gas.</i>	<i>Distancia intermolecular media después de la saturación del carbón con gas</i>	<i>Distancia molecular media después de la desgasificación del carbón</i>
<i>Ångström</i>	<i>Ångström</i>	<i>Ångström</i>
9,8	11,7	--
9,8	11,9	--
10,5	11,4	--
10,5	11,3	--
--	11,8	--
--	11,5	10,5
10,0	11,3	--
10,0	11,2	--
10,3	11,4	10,4
10,4	--	--
10,3	10,8	--
10,3	10,5	8,7
10,2	--	--
10,8	11,7	--
10,6	11,9	11,5
10,9	11,6	--
10,8	--	--

TABLA 2

Tiempo de saturación Horas	Presión del gas de saturación del carbón. Atmósferas	Variación de la distancia entre las moléculas. Ángström
2	10	0,2
2	10	0,5
12	10	0,7
12	10	0,9
64	10	1,2
64	10	1,3
10	15	1,1
10	15	1,3
36	15	1,9
36	15	2,1
116	15	0,8
116	15	0,9

6 - APLICACION DE RESULTADOS. CONCLUSIONES.

El estudio de la información obtenida al investigar el efecto de la ventilación sobre las propiedades mecánicas del carbón, permite deducir la posibilidad de utilizarla en la lucha contra los distintos tipos de desprendimientos, relacionados con la presencia de grisú en la capa.

Estos desprendimientos se presentan con la máxima frecuencia en frentes de carbón mal ventilados, huecos de voladuras, recortes, etc. En estos lugares, la velocidad del aire es, normalmente, muy pequeña y no basta para romper la capa superficial de metano.

Ello conduce a una disminución de la dureza del carbón y a una destrucción más fácil del frente por las fuerzas que se generan durante los desprendimientos.

Una situación análoga se produce en la perforación de sondeos sobre capa para captación de grisú. Debido a la falta de movimiento del aire en el interior de los taladros, se originan allí condiciones que dificultan el desprendimiento del gas. Como consecuencia, la consistencia del carbón es baja, se producen derrumbamientos y ensanches en las paredes del taladro,

las barrenas de perforación se atascan y el sondeo se desvía.

El acuñamiento de la broca y la desviación del sondeo se explican principalmente por el estado general de tensiones en la capa pero también tiene una cierta influencia en ello la escasa dureza del carbón.

A este respecto, ha sido interesante la experiencia del trabajo con la máquina de perforación rotativa BRM-1 que, con el fin de mejorar la extracción del polvo producido en la perforación, funciona con barrido de aire. Esta particularidad ha resultado suficiente en muchos casos para evitar los desprendimientos de carbón en el interior del taladro, realizándose el sondeo sin incidente alguno, como ha podido comprobarse en los ensayos realizados sobre la capa Alexandrovskii.

En iguales condiciones otra máquina equivalente pero desprovista de este medio de ventilación del taladro, ha tenido que pararse con frecuencia durante la operación, debido al desprendimiento masivo de carbón fino en el interior del sondeo.

Se deduce por tanto, que las máquinas perforadoras que hayan de trabajar en capas con fuerte contenido de gas, deben tener un dispositivo adecuado

para permitir el barrido eficaz, por aire, del taladro durante la operación.

La comparación entre las condiciones de trabajo de las dos máquinas citadas puede considerarse representativa por una parte, de los frentes de carbón bien ventilados, con escaso riesgo de desprendimientos y por otra, frentes con ventilación deficiente, elevada proporción de gas en la atmósfera de los tajos y riesgo considerable de desprendimientos o derrabes.

Teniendo en cuenta las experiencias del trabajo de arranque en capas con grisú junto con las anteriores investigaciones sobre la influencia de la ventilación en la dureza del carbón, podemos anotar las siguientes conclusiones:

- 1. Todos los frentes de avance de labores mineras y arranque de carbón en capas con tendencia a desprendimientos bruscos de grisú, deben ser intensamente ventilados.*
- 2. Debe prestarse especial atención a las partes del frente de carbón difíciles de ventilar (huecos de voladuras en los tajos, recortes, etc). En estas zonas del frente de carbón debe asegurarse una corriente de aire suficientemente intensa no solo*

en cuanto a aportación de la cantidad adecuada sino también con el empleo de los equipos auxiliares de desvío, conductos, etc., para conseguir un barrido eficaz de las acumulaciones de gas.

3. La perforación de sondeos de captación de grisú en capas con riesgo de desprendimientos bruscos debe hacerse, en todo caso, con barrido de aire.

Complementariamente pueden sugerirse otras medidas para mejora general, basados en los mismos principios.

Así, el interior de los taladros de sondeo en el carbón, una vez realizados, podría ser ventilado mediante aire a presión introducido en el sondeo por un tubo especial.

Con ello se conseguirían alrededor de los taladros y hasta la profundidad de estos en la capa, zonas de elevada resistencia del carbón en las partes del macizo que se consideren más peligrosas con respecto a los desprendimientos de grisú. Las partes de la capa "endurecidas" de esta manera pueden considerarse como una especie de entibación o refuerzo frontal de la masa de carbón.

Utilizando máquinas perforadoras con barrido

de aire puede pensarse también en la creación de un sistema de taladros en el macizo de carbón, cortándose unos a otros y permitiendo con ello, la entrada en los mismos de la ventilación general de la mina por efecto de la depresión creada por el ventilador principal.

Una operación de este tipo, con taladros hasta las zonas perforadas de las capas con riesgo de desprendimientos de grisú, crearía una especie de esqueleto de carbón de elevada resistencia, disminuyendo el peligro debido a dichos desprendimientos.

El éxito de estas posibles aplicaciones, del efecto de endurecimiento del carbón con la ventilación, depende sin embargo de diversas particularidades de detalle por lo cual tales aplicaciones habrían de ensayarse específicamente en las capas cuya seguridad se trata de mejorar.

ANEXO

INVESTIGACION DE LA ESTRUCTURA INTERNA POR RAYOS X.

METODOS.

En el texto anterior se ha hecho referencia a la investigación de la estructura molecular del carbón, especialmente en lo que se refiere a determinación de las distancias intermoleculares por el método de Debye Scherrer.

En la práctica de estos métodos se utiliza, como es sabido, el fenómeno físico de la difracción, el cual se produce siempre que una propagación ondulatoria choca con una red de obstáculos cuya separación d es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda λ .

Para aplicar estos principios a una red molecular cuyas distancias características se miden en unidades Å (1 Å o angström = 10^{-7} mm) es necesario utilizar radiaciones de muy corta longitud de onda como son los rayos X.

En el método de Debye-Scherrer se trabaja según el principio de difracción con incidencia oblicua descubierto y desarrollado por Bragg.

Un haz de rayos X de longitud de onda adecuada al incidir con el ángulo de inclinación θ sobre la superficie de un trozo de materia, formado por una red de partículas elementales, experimenta el efecto citado y como consecuencia, se dispersa en las direcciones correspondientes a los distintos órdenes de difracción, además de continuar también en la dirección de incidencia (Fig. 6).

El primer orden de difracción sigue las leyes de la reflexión ordinaria pero se trata de una reflexión de intensidad condicionada al valor del ángulo θ ya que, como muestra la figura, si se da la condición:

$$2d \operatorname{sen} \theta = n\lambda$$

la intensidad del rayo "reflejado" pasará por un máximo debido a la interferencia en fase y por lo tanto, suma de intensidades de los rayos que se difractan en los sucesivos planos de la red.

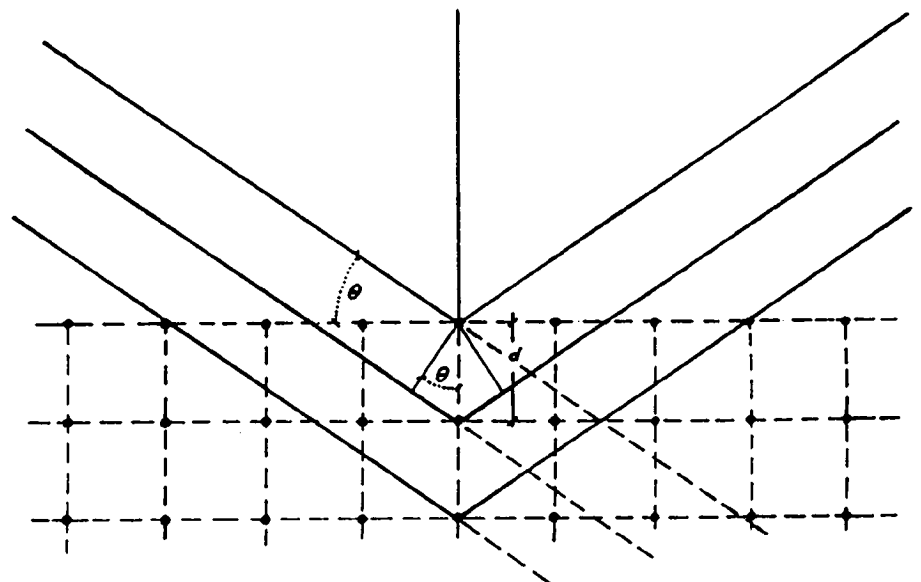


Fig. 6

Para la difracción de 1^{er} orden se tendrá $n=1$ y por lo tanto la igualdad anterior nos permite calcular la distancia d entre las partículas por la fórmula general:

$$d = \frac{\lambda}{2 \cdot \text{sen } \theta} \quad (1)$$

una vez medido el ángulo de inclinación θ y conocida la longitud de onda λ de la radiación X empleada en el ensayo.

La teoría anterior se utiliza en el método de Debye Scherrer de una forma particular que hace al método especialmente manejable.

En lugar de un trozo de materia se trabaja con una muestra de polvo de la misma, conteniendo un gran número de pequeñas partículas, que se aglomeran en forma de cabeza de cerilla con un ligante adecuado.

Este aglomerado se coloca en el interior de una cámara que tiene forma cilíndrico-discoidal, sobre el extremo de una aguja montada según el eje del cilindro (punto O en la sección circular. Fig. 7).

El haz de rayos X entra por un colimador A mientras que en la pared lateral opuesta se sitúa la

película sensible, en forma de banda rectangular estrecha, para obtener el diagrama de difracción.

Al incidir el haz en Q sobre la muestra de polvo, debido a la posición aleatoria de las partículas, se encuentra con un gran número de superficies orientadas en el espacio, como la $S-S'$, formando el ángulo de máxima intensidad de difracción.

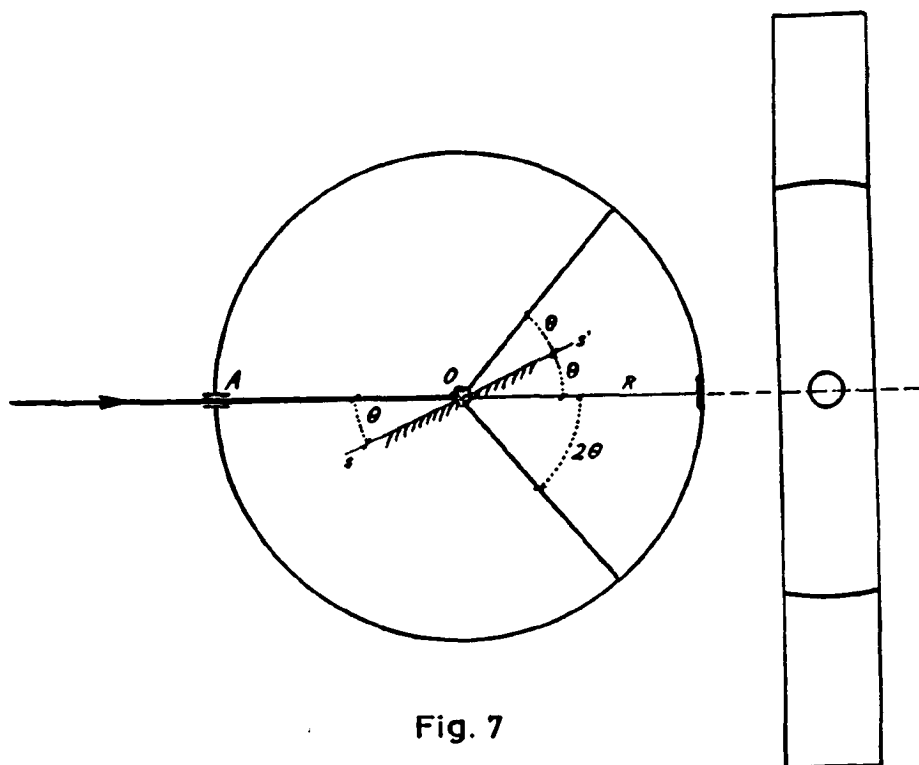


Fig. 7

Como se deduce de la figura, se producirá entonces un cono de difracción, de ángulo total 4θ que impresiona la película según dos curvas simétricas resultantes de la intersección del cono con la superficie cilíndrica.

Una vez obtenido el diagrama y con el radio conocido R de la cámara, se determina fácilmente el valor de θ con el cual se entrará en la fórmula (1) para calcular la distancia d .

OVIEDO Diciembre de 1.990