

PROYECTO DE INVESTIGACION DE DERRABES DE CARBON

ANEJO V

V - A : Desprendimientos de gas y carbón y estructuras geológicas.

V - B : Estudio y análisis de las propiedades físicas del carbón.

V - C : Localización de zonas de riesgo a partir de las estructuras geológicas.

V - D : Sugerencias geológicas en la explotación del carbón.

Instituto Tecnológico GeoMinero de España - Proyecto de derrabes de carbón



**DESPRENDIMIENTOS Y ESTRUCTURAS GEOLOGICAS
EN MINAS DE CARBON.**

I.T.G.E.

19-05-90

INDICE.

- Resumen.
- Introducción.
- 1.- Condiciones que pueden afectar al origen de los desprendimientos.
 - 1.1.- Factores naturales.
 - A)- Estructuras y propiedades del carbón.
 - 1- Porosidad.
 - 2- Fisuración.
 - B)- Rango del carbón.
 - C)- Tectónica general y local.
 - D)- Pendiente y potencia de las capas.
 - E)- Humedad natural del carbón.
 - F)- Características mecánicas del carbón y hastiales.
 - G)- Gas y tensiones.
 - H)- Profundidad.
 - 1.2.- Factores provocados.
 - A)- Concentración de tensiones debidas a los trabajos.
 - B)- Método de explotación.
- 2.- Frecuencia de los desprendimientos con las estructuras geológicas.
 - West Wales (Reino Unido).
 - Rocky Mountains (Canada).
 - Bélgica y Francia.
 - Japón.
 - Southern (Australia).
 - Bowen Basin (Australia).
- 3.- Mecanismos de desprendimientos.
 - 3.1.- Efectos previos.
 - 3.2.- Papel del gas.
 - Combinación gas-carbón.
 - 3.3.- Tensiones.
 - 3.4.- Influencia de las estructuras geológicas sobre el campo de tensiones in situ.
 - 3.5.- Propiedades mecánicas del carbón.
 - 3.6.- Energía de deformación elástica almacenada en lugares estructurales.
 - 3.7.- Naturaleza de las estructuras.
- 4.- Varias teorías.
 - Teoría de la cavidad.
 - Teoría del "bolsillo".
 - Teoría dinámica.
- 5.- Conclusiones.
- 6.- Bibliografía.

DESPRENDIMIENTOS Y ESTRUCTURAS GEOLOGICAS EN MINAS DE CARBON.

RESUMEN.

En este trabajo se integran, de forma muy resumida, gran parte de los aspectos que influyen en el problema de los desprendimientos de carbón y gas en las minas de carbón, y en especial, aspectos novedosos a tener en cuenta, referidos a tensiones, gas y estructuras geológicas.

Basado en una extensa bibliografía sobre investigaciones geológicas de zonas de desprendimientos, se ha podido concluir que las estructuras geológicas juegan un papel primordial. Así, estructuras como las fallas de arrastre, fallas de strike-slip, cabalgamientos y pliegues tumbados son especialmente propensos a desprendimientos. Generalmente en el pasado estas estructuras eran consideradas como "trastornos geológicos" o "carbón blando", y siendo lugares con carbón áltamente fracturado y con material triturado ("gouge").

Dentro y fuera de las estructuras geológicas parecen existir anomalías de tensiones y de gas. En tales lugares, se han registrado sistemas de fracturas inducidas por las labores mineras, ruidos microsísmicos y emisiones de gas anormalmente altas. Los presentes conocimientos sobre las tensiones in situ, los regímenes de gas y las estructuras geológicas de los lugares donde se producen los desprendimientos, son insuficientes como para construir un modelo que responda y se ajuste al mecanismo de los desprendimientos. Parece ser que el mejor y más sugerente modelo corresponde a la llamada "teoría dinámica", la cual, enfatiza el papel de las tensiones en la rotura del carbón y el control del régimen del gas.

La identificación de las estructuras geológicas, junto con medidas de varios parámetros del gas y de los sistemas de tensiones, puede ser la más útil y mejor manera de predecir y pronosticar las zonas propensas a desprendimientos, y con ello, tomar las medidas de seguridad más idóneas.

INTRODUCCION.

Son muchos los autores e investigadores que han discutido a lo largo del tiempo la naturaleza confusa y tenebrosa de los desprendimientos, las pérdidas de vidas que ocasionan, su magnitud y la importancia de su control, y aunque se ha realizado un ámplio control de medidas en ciertos desprendimientos, ninguno de los métodos conocidos es enteramente satisfactorio.

Las causas y mecanismos de los desprendimientos son muy complejos y debido principalmente a las dificultades técnicas para obtener datos básicos, los investigadores tienden a limitarlos a ciertos aspectos específicos, tales como el gas contenido en la capa y las tensiones. Por ello, generalmente, ha existido una gran laguna en lo que se refiere a aspectos geológicos involucrados en los desprendimientos, y por ello todos los progresos hacia el entendimiento de su naturaleza han sido muy lentos, al igual que ha sido confusamente entendida la naturaleza intrínseca de los mecanismos de desprendimientos y su propagación.

1 - CONDICIONES QUE PUEDEN AFECTAR AL ORIGEN DE UN DESPRENDIMIENTO.

Antes de iniciar el estudio de las relaciones existentes entre los desprendimientos y las estructuras geológicas, realizaremos un breve resumen de los diferentes aspectos y propiedades que influyen en mayor o menor medida en el desarrollo de un desprendimiento.

Antes de nada, definiremos lo que se entiende por "desprendimiento". Es muy importante diferenciar entre los principales tipos de roturas violentas en las minas de carbón, ya que la literatura al respecto es voluminosa y muchas veces confusa. Las siguientes definiciones pueden considerarse como una síntesis del fenómeno y según predomine una característica u otra, el desprendimiento se denominará de una forma u otra.

Entendemos por desprendimiento a fenómenos dinámicos bifásicos (gas y sólido) en los que se libera de forma súbita, gran cantidad de energía:

- **Desprendimientos instantáneos (D.I.)** : La causa del fenómeno se debe a la dinámica del gas adsorbido u ocluido, pudiéndose producir asentamientos bruscos de los hastiales y/o mineral.

- **Derrabes, golpes de techo, etc:** La causa es la dinámica del macizo formado por los hastiales y/o mineral, pudiéndose originar desprendimientos de importantes cantidades de gas, con la expulsión del carbón.

Entre ambas categorías existe una graduación casi infinita. Los síntomas pueden ser similares y las consecuencias también, pero en cambio, la génesis, el diagnóstico previo y las medidas de seguridad pueden ser muy diferentes.

Son factores condicionantes de un desprendimiento, entre otros, el contenido específico de gas desorbible en el carbón, la velocidad de desorción, la fisuración, la elasticidad de la roca, las tensiones residuales en la capa y en los hastiales, las características de los hastiales y la tectónica local. Existe también otra serie de factores que dependen de la tecnología empleada en la explotación, que puede tener un importante "efecto gatillo". Por supuesto, ambas categorías están íntimamente ligadas.

1.1 - FACTORES NATURALES. Son de naturaleza geológica.

A)- Estructura y propiedades del carbón:

El carbón puede ser considerado como un medio poroso recorrido por una red de fisuras. A causa de su fina porosidad, las hullas poseen superficies internas muy extendidas y por ello capaces de fijar grandes cantidades de gas, por adsorción, más de las que pueden ser comprendidas en sus poros y fisuras. La materia homogénea del carbón cercada por la red de fisuras es muy poco permeable al gas, pero precisamente gracias a las fisuras el gas puede escaparse a cierta velocidad hacia el hueco originado por las excavaciones mineras.

1- Porosidad: El orden de magnitud de la porosidad varía entre límites bastantes amplios. Más que el valor global del volumen de los poros, es el reparto de este volumen en función de las dimensiones de los poros lo que es importante para la fijación

(adsorción) de gas por el carbón. Se pueden distinguir tres clases de poros: Microporos (asimilables a canales cilíndricos) cuyo radio medio es inferior a 50 Å. Poros intermedios, de radio comprendido entre 50 y 500 Å; y Macroporos de radio superior a 500 Å. No parece existir un relación neta entre el grado de hullificación y la porosidad.

Gracias a su fina porosidad, los carbones presentan superficies internas muy grandes, con extensiones desde una decena a más de 100 y hasta 200 m²/g, lo que les confiere un poder muy elevado de fijación de gas.

2- **Fisuración:** La observación al microscopio de los carbones muestra que éstos están atravesados por una red de fisuras comunicadas unas con otras, espaciadas desde algunas micras hasta algunos cientos de micras, y su anchura varían desde una fracción de micra a algunas micras.

Estudios microscópicos de la fisuración del carbón: El carbón derrabable ha sido estudiado de mucho modos. Por ello no está claro el término "carbón derrabable". Es necesario distinguir entre carbón propenso a desprendimientos in situ y el carbón proyectado de una cavidad originada por un desprendimiento. El rápido reconocimiento de la forma de uno y otro es muy importante durante la explotación de una mina, utilizándose para ello la cuantificación de las fracturas por microscopio de reflexión y microscopio electrónico de barrido (M.E.B.), cuyos resultados pueden ser asociados con medidas de permeabilidad al gas y las tensiones del carbón.

La relación existente entre el carbón fracturado y el propensión a un desprendimiento se conoce desde hace años (Rusia, Polonia, Belgica, Francia). El método que se menciona fue usado por estos países y consiste en recoger muestras de un frente de carbón, puliéndose bloques para ser observados al microscopio por luz reflejada y a 400 aumentos. Se cuentan las fracturas a lo largo de una línea (10, 20, 100 mm) obteniendo el factor "O", que representa la distancia media calculada entre las fracturas, o el factor "L" que es la suma de todas las longitudes de fractura dentro de una superficie de 1 mm², y el factor "S" el cual representa el área total de las fracturas dentro de una área de 1 mm².

En ambos métodos, las fracturas se clasifican en dos tipos, las **microfracturas** <1 u de anchura y las **macrofracturas** entre 1-100 u de anchura. Hay que prestar especial atención a las fracturas inducidas en la obtención de la muestra, ya sea por el método de extracción, las producidas por los tiros, etc, y diferenciarlas de las geológicas y naturales.

La clasificación de los carbones dada por Ettinger, Cybulski y Piskorska-Kalisz vienen dados en la Tabla 2.

El Microscopio Electrónico de Barrido (M.E.B.). Se utilizó por primera vez en Inglaterra para diferenciar el carbón normal del carbón propenso a desprendimientos. En la zona donde se utilizó, las capas estaban altamente deformadas y mostraban estructuras geológicas complejas, de tal forma que la antracita normal también estaba triturada y plegada.

TABLE 2. RUSSIAN/POLISH FRACTURE-DENSITY CLASSIFICATION FOR CRACK DISTURBANCE PRONENESS*

	Class	Degree of tectonic disturbance	Coal brightness	Number of fissures per cm	Mean spacing of fissures (mm)
Non outburst prone	I	Undisturbed	Bright + semi-bright	< 6.25	1.60
	II	Disturbed	Bright	6.25-19.90	0.50
Outburst prone	III	Highly disturbed	Usually dull	20.00-71.90	0.14
	IV	Crushed	Semi-dull + very dull	71.40-199.90	0.05
	V	Pulverized	Dull with red/brown colouration	200.00-1225.00	0.008

* After Ettinger [71] and Cybulski & Piskorska-Kalisz [72].

Tabla 2. Clasificación de carbones rusos propensos a desprendimientos según la densidad de fracturación en superficies pulidas. (según Ettinger, 1969; y Cybulski & Piskorska-Kalisz, 1969).

Se encontró que la vitrinita y el fuseno mostraban varios sistemas de fracturas observados a grandes aumentos (12.000-100.000 aumentos).

Farmer & Pooley (1967) y Evans & Brown (1973) encontraron que mientras la antracita normal mostraba una "fabric" estructural continua con superficies típicas de la vitrinita y con fracturas concoidales, el carbón propenso a desprendimientos mostraba una alta densidad de fracturas de corte con "slickenlines" y partículas granulares sueltas de 1-10 u de diámetro. Estas minúsculas partículas granulares están inmediatamente por debajo de la superficie pulida, originando una textura característica llamada "granular encapsulacion". En suma, las capas de fuseno están interrumpidas por minerales arcillosos cristalizados originando una discontinuidad en la "fabric" de la antracita.

Se puede decir que los carbones propensos a desprendimientos presentan un incremento de partículas granulares que está directamente relacionado con un incremento en la intensidad de fracturación de corte, por lo tanto acompañado, con la formación de bandas de cizalla en la capa ("gouge").

Otros estudios llevados a cabo por Teichmuller & Juch (1978) en Ibbenbueren Colliery en Alemania del Oeste, examinando carbón altamente deformado de zonas de arrastre sujeta a desprendimientos, definieron 7 clases de carbón desmenuzado según los microlitotipos. Estos autores concluyeron que el carbón más desmenuzado era el más propenso a desprendimientos.

B)- Rango del carbón:

Es uno de los aspectos fundamentales del carbón y que deben ser tenidos en cuenta, y aunque existen numerosas clasificaciones, una característica muy importante para definir el rango es el uso del valor de la máxima reflectancia ($R_o \max$) de la vitrinita. Así, en Australia, todas las capas de carbón con reflectancias de ≥ 1.10 han sido propensas a desprendimientos; no originándose desprendimientos en aquellas con un valor de reflectancia ≤ 1.00 .

El esfuerzo a que está sometido el carbón y el contenido en gas, puede influir en su rango, de igual modo que el carbón sometido a esfuerzos está también afectado por el contenido en gas adsorbido. En este sentido, Pomeroy (1956) ya mostró que los carbones con grandes diferencias en el rango también presentaban grandes diferencias en sus propiedades elásticas.

Los carbones con rangos altos ($R_{\max} \geq 1.00$; con $>85\%$ de carbón total) tienen una mayor capacidad de adsorción ya que el área superficial interna del carbón es mayor. Algunos estudios muestran que el incremento del área superficial con el rango se debe a la presencia de una mayor proporción de poros muy pequeños.

Algunos estudios (Patching, 1970), han demostrado que el incremento del área superficial de un carbón con su mayor rango, se debe a la presencia de un gran número de poros muy pequeños.

Todos los carbones bituminosos, incluyendo aquellos que son propensos a desprendimientos, están muy fracturados (con diclacasas, fallas, etc.) que influyen mucho sobre la permeabilidad de los carbones y que a su vez, éstas fracturas poseen pequeñas cantidades de gas.

C)- Tectónica general o local:

Las cuencas donde se producen desprendimientos, están situadas en zonas que estuvieron sometidas a fuertes movimientos tectónicos. La influencia de la tectónica local puede verse claramente al observar que los lugares donde se producen los desprendimientos suelen coincidir con ciertas zonas distorsionadas de las capas.

El estudio de 60 carbones en Rusia consiguieron correlacionar pliegues mates y brillantes observados al microscopio con acumulaciones lenticulares de carbón y que tienen una estructura fuertemente deformada. Estas grandes acumulaciones abundan más en capas propensas a desprendimientos que en las que no lo son. En estas zonas, el carbón estaba altamente desmenuzado y destruido con una textura granular, que los autores asocian a estructuras geológicas en las capas.

La tectónica sufrida por los materiales, pueden revelar las condiciones geomecánicas del carbón y hastiales. Así, en la C.C.C., sometida a un mecanismo de plegamiento flexural, principalmente, y un aplastamiento, forman pliegues flexurales (rodillo, circular, semicircular) que produce que los materiales más blandos y menos competentes (capas de carbón) sufran procesos de arrastre, y fuertes rozamientos en el contacto con los hastiales, originando microplegamientos internos y destrucción de la estructura inicial

del carbón.

D)- La pendiente y potencia de las capas:

La pendiente de las capas aumenta el riesgo de los derrabes y la acción de la gravedad favorece las proyecciones, ya que los derrabes pueden considerarse como generadores de los D.I. En la cuenca de Dombass (Rusia) se producen desprendimientos en capas de fuerte pendiente con un contenido en gas de 10 m³/t, cuando en estas mismas capas horizontales y con el doble contenido en gas, no se producen.

De la misma forma, la potencia de las capas aumentan el riesgo de derrabe, sin embargo, son las variaciones de potencia las que constituyen el mayor riesgo, y en particular los aumentos de la misma por el obstáculo que los hastiales divergentes oponen a la fluencia natural de la vena.

E)- La humedad natural del carbón.

La humedad disminuye y a veces suprime el riesgo de desprendimientos; hecho ya constatado en el Nord d'Ales donde se explotaron zonas sin desprendimientos y con grandes contenidos en CO₂ además de estar sometida a fallas importantes, a accidentes locales y a fuertes presiones del terreno.

F)- Las características mecánicas del carbón y de los hastiales:

Las zonas frágiles y friables de los macizos se consideran como peligrosas, los hastiales duros tienen también su importancia, de hecho, las propiedades mecánicas del carbón y de los hastiales tienen un papel conjunto. Los investigadores rusos han demostrado que la energía elástica potencial almacenada en la capa y en los hastiales es uno de los factores necesarios para el desarrollo de un desprendimiento (como más adelante veremos).

G)- El gas y las tensiones:

Son factores de una importancia primordial y que serán tratados de forma extensa más adelante. Parece ser que los dos elementos son, a priori, el origen de los desprendimientos (D.I.).

H)- Profundidad de la explotación:

La profundidad y en consecuencia, el aumento de tensiones, se han mostrado como un factor importante en las capas propensas a desprendimientos. De todas formas, parece ser que no es universalmente aceptada la relación de los desprendimientos con la profundidad. Esto puede ser debido a las diferentes condiciones de los campos de tensiones a las que están sometidos los carbones estudiados. Así Lama (1968) en sus estudios de Cevennes (Francia), concluye diciendo que "no se encuentra variación en el número de desprendimientos ni en la proporción total de material desprendido con el incremento de la profundidad de las capas".

1.2- FACTORES PROVOCADOS. Se deben a las condiciones de explotación.

A)- Concentración de tensiones debidas a los trabajos:

Muchas de las concentraciones locales de tensiones se deben a la actividad minera y son tan peligrosas como las orogénicas. En la misma capa la geometría de las explotaciones, los ángulos de los testers, las culatas de los nichos, son favorables a la concentración de tensiones, y sobre todo los macizos abandonados y el orden de explotación.

B)- Método de explotación:

Está ampliamente demostrada la gran influencia que sobre los desprendimientos, magnitud y número, tiene el tipo de explotación y método utilizado.

1- Modo de deshulle del yacimiento.

2- Modo de tratamiento del techo y tipo de sostenimiento. El hundimiento está considerado un método que disminuye el riesgo, ya que se descarga el techo por el desplazamiento de los hastiales hacia el hueco de la explotación, así se disminuyen las tensiones en el frente y se favorece una desgasificación progresiva y profunda, siempre y cuando el método utilizado sea el apropiado.

3- La velocidad de avance de galerías y talleres. Las grandes velocidades llevan consigo reajustes rápidos de los hastiales que activan la desgasificación agravando el peligro.

2. - FRECUENCIA DE LOS DESPRENDIMIENTOS CON LAS ESTRUCTURAS GEOLOGICAS.

A continuación se presenta una recopilación bibliográfica de algunas observaciones realizadas en diferentes zonas carboníferas del mundo, que ponen en evidencia la relación entre los desprendimientos y ciertas estructuras geológicas y características del carbón.

West Wales (Reino Unido).

Los estudios y observaciones realizadas en este yacimiento de antracitas, muestran que de los 192 desprendimientos ocurridos en las 9 explotaciones estudiadas, en todos los casos había trastornos geológicos y un tipo de carbón blando en los alrededores. Pescod (1947-48) consideró 101 desprendimiento y describió las estructuras geológicas asociadas a ellos concluyendo que la principal era un pliegue anticlinal, seguido en segundo término, por suelos "enrollados-ondulados" (Floor roll) a partir del cual la capa se adelgaza. También se observó que aunque la antracita está muy fisurada, en general, no todo el carbón llamado "blando" es propenso a desprendimientos. Briggs (1920-21) era ya consciente del significado del carbón "blando" en relación a las fallas, y consideró a las fallas como un agente de trituración y fracturación del carbón. Pocas han sido las estructuras geológicas publicadas en detalle y asociadas a desprendimientos. Nelson (1937) y Dix (1941) hicieron algunas descripciones de estructuras a escala megascópica y de mina, y en trabajos posteriores describieron las estructuras

regionales de la zona. (Fig. 2)

Muchos de los pliegues descritos son anticlinales y había otros dentro del carbón que están aparentemente ligados a procesos de arrastre. Otros tipos de pliegues presentan en su charnela espesores de carbón de hasta tres veces el espesor del flanco. Y en algunos casos (2d, e) el muro de la capa de carbón no está plegado, lo que sugiere que despegó del techo y se desplazó por una zona de arrastre o cabalgamiento.

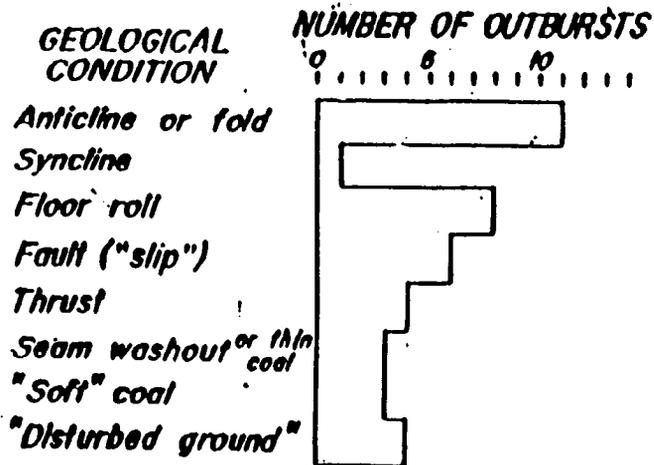


Fig. 1.- Histograma que representa el número de desprendimientos ocurridos en diferentes estructuras y trastornos geológicos en las capas de antracita del West Wales (Reino Unido), según los datos de Pescod (1947-48).

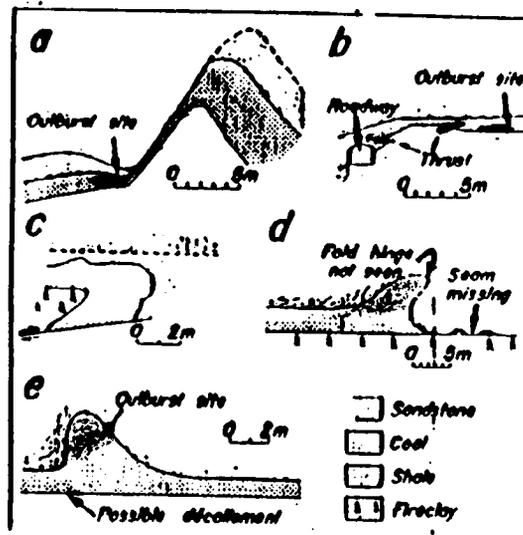


Figura 2.- Secciones de algunas estructuras asociadas con desprendimientos en el West Wales (Reino Unido) (a)- Anticlinal. (b)- Fallas conjugadas. (c)- Falla de arrastre y pliegue tumbado. (d)-Anticlinal y adelgazamiento de capa. (e)-Anticlinal y posible cabalgamiento.

Rocky Mountains Coalfields (Canada).

Las capas en esta zona están muy plegadas y falladas a todas las escalas. Los carbones son blandos y friables y las capas presentan estructuras de slicken-sides y estructuras foliadas. Los desprendimientos están asociados a fallas y a techos ondulados. Patching (1962) afirma que los desprendimientos están generalmente

asociados con anomalías estructurales, con la debilidad del carbón o con las concentraciones de esfuerzos en las capas debido a la proximidad de una falla o pliegue.

Belgica y Francia.

Las capas donde se produjeron desprendimientos estaban fuertemente deformadas por pliegues, principalmente abiertos y tumbados y afectados por fallas de arrastre y normales. Secciones transversales típicas de tales estructuras se pueden ver en las figuras 3 y 4. Se apreció que los desprendimientos ocurren en las regiones próximas a zonas de charnela de pliegues, principalmente reclinados y tumbados y a lo largo de fallas, especialmente de arrastre.

En la figura 5 se esquematizan los métodos usados con la capa égida. Generalmente se avanzaron galerías a lo largo de las fallas propensas a desprendimientos o por las charnelas de los pliegues para obtener un efecto de alivio óptimo.

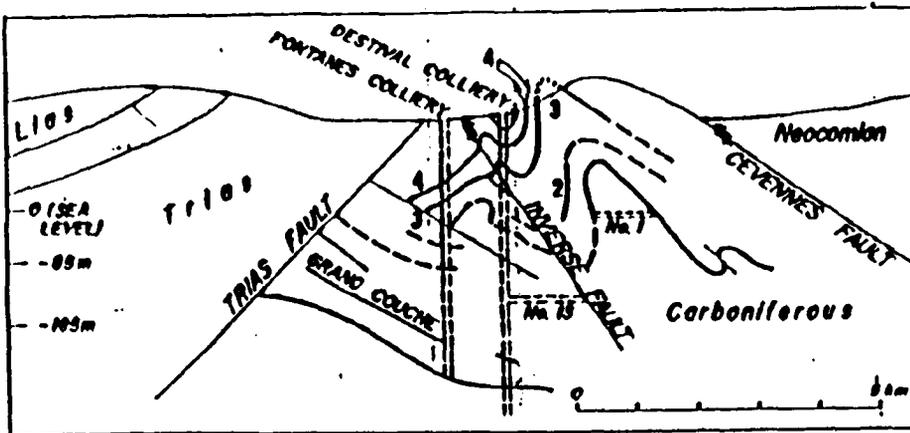


Fig. 3.- Diagrama de una sección transversal de la estructura geológica existente en Cevennes (Francia), según Quentin (1952).

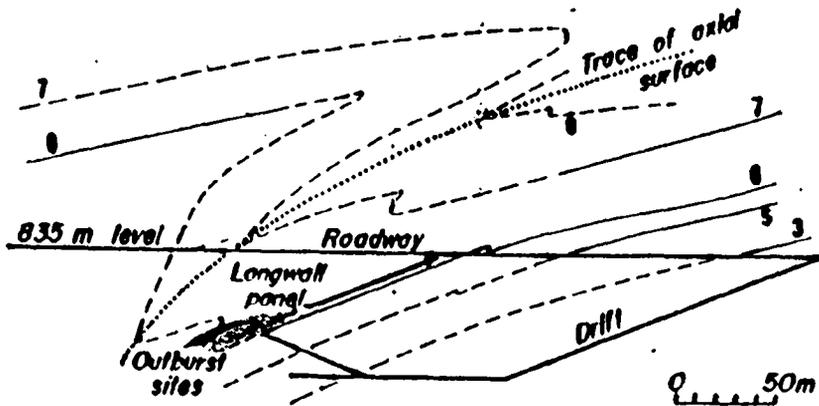


Fig. 4.- Sección transversal de una galería en un pliegue tumbado en Charleroi (Belgica), según Stassen & Vandeloise (1961).

Japón.

Ujihira & Hashimoto (1976) encontraron en el Ishikari Coalfield de Hokkaido tres factores geológicos relacionados con los desprendimientos: La presencia de fallas, el número de capas en una sección vertical y el número de capas delgadas presentes. El resultado más representativo del trabajo fue la asociación de un gran número de fallas con los desprendimientos (Fig. 6). Se puede resaltar de sus datos que los desprendimientos tienden a ocurrir donde las fallas inversas o normales son interceptadas con corrimientos (desplazamientos) de una magnitud similar a los espesores de la capa de carbón.

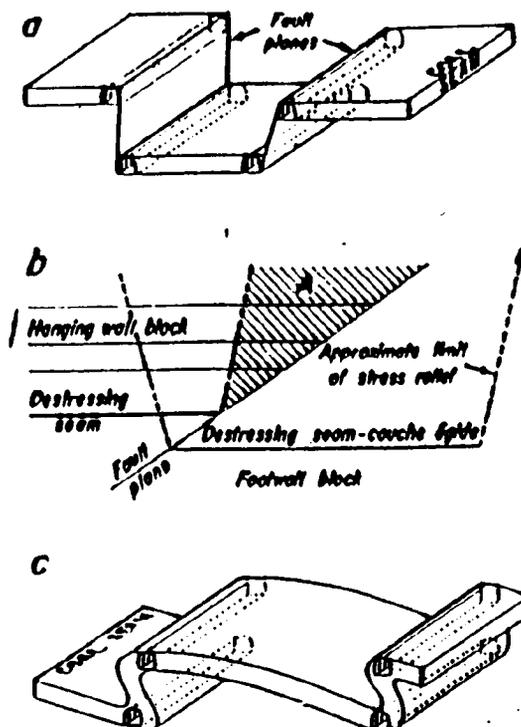


Fig. 5. - Método para la realización de galerías en capas de carbón, plegadas y falladas. a)- Galerías a lo largo de fallas. b)- Primero se extrae la capa del muro para aliviar una capa de carbón por encima de una falla de arrastre. c)- Galerías a lo largo de los charnelas de los pliegues. (National Coal Board, 1957).

Bowen Basin, Queensland (Australia).

Esta zona presenta fallas de arrastre, de strike-slip y normales, compatibles con la cinemática del régimen compresivo E-W de la fase deformacional. Todos los desprendimientos ocurrieron sobre dichas fallas. Algunos en la intersección de fallas de arrastre de 3.6 m de desplazamiento vertical con otra normal de 0.7-1.4 m de desplazamiento vertical (Fig. 7).

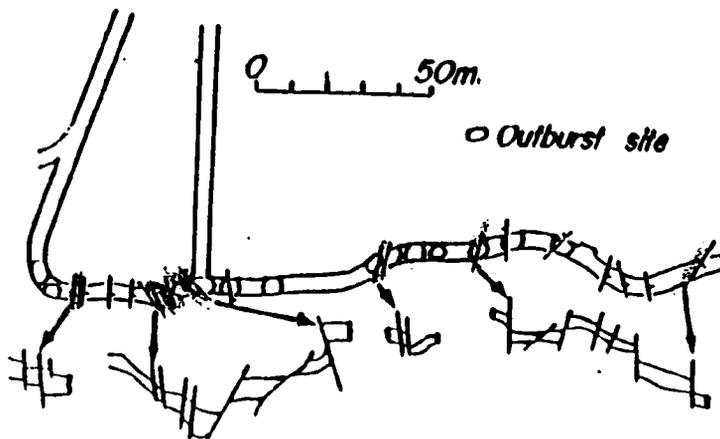


Fig. 6.- Asociación de los desprendimientos y las fallas en el Ishikari Coalfield (Japón).

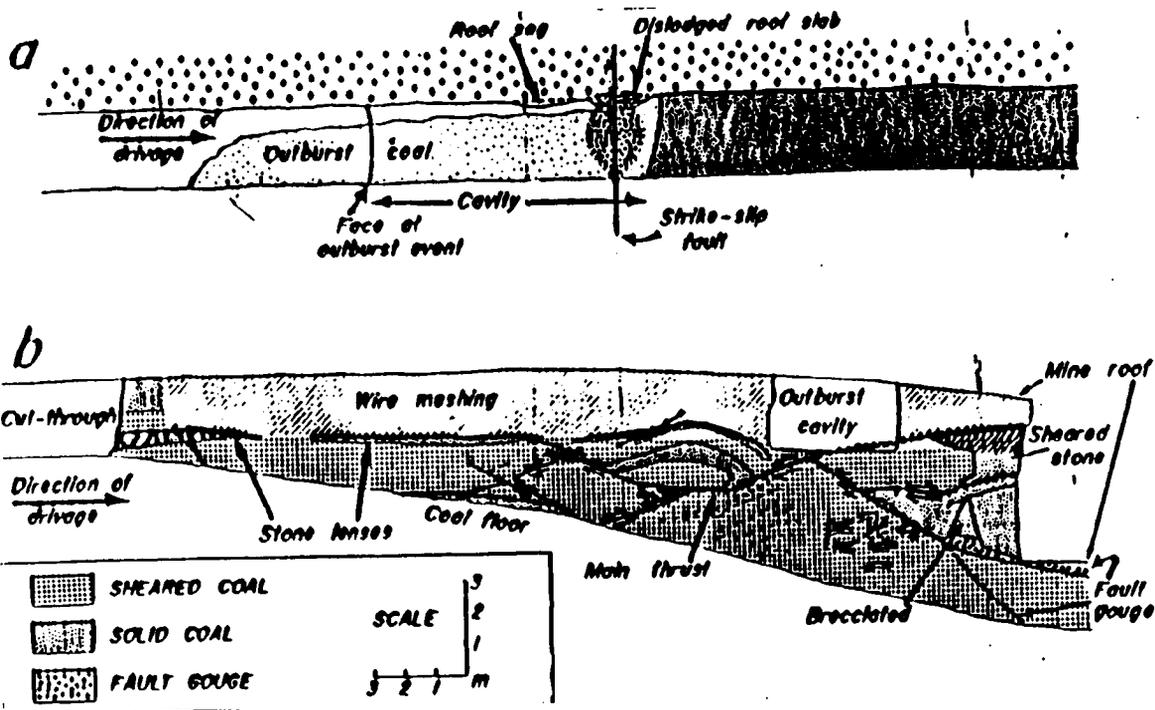


Fig. 7.- Asociación de los desprendimientos y fallas en las minas australianas. a)- El desprendimiento coincide con una falla de strike-slip en el West Cliff Colliery. b)- Los desprendimientos coinciden con fallas tipo "arrastre" en el Bowen Mine Collinsville.

Southern Coalfield of New South Wales (Australia).

Todos los desprendimientos fueron asociados con carbón "blando", diques, fallas o combinaciones de estos. Uno de los desprendimientos más importantes estuvo asociado a fallas verticales de menor importancia, que intersectaban a otra falla principal, lo cual producía que el carbón estuviese altamente desmenuzado y fracturado. Las últimas observaciones y estudios en esta zona muestran que sólomente ocurren los desprendimientos en las proximidades de las fallas de strike-slip, mientras que las fallas normales no son propensas a desprendimientos (Fig. 7).

3. - MECANISMOS DE DESPRENDIMIENTOS.

Todas las teorías sobre los mecanismos de desprendimientos enfatizan dos aspectos muy importantes: gas y tensiones. Las más recientes ideas han unido los dos aspectos, pero han ignorado la influencia que poseen sobre ellos la estructura geológica. Cualquier teoría o hipótesis está muy avanzada en lo que respecta a las propiedades físicas y movimientos del gas, así como los factores que influyen sobre las tensiones, pero estas fuentes de energía están muy relacionadas con la presencia de estructuras geológicas que a su vez, a menudo, están asociadas con las zonas de desprendimientos, y esto, precisamente, es lo que falta por investigar a fondo.

3.1 - Efectos previos.

Existen una serie de fenómenos previos que preceden al desprendimiento, según los informes y observaciones de los propios mineros:

- a)- Sucesión de ruidos audibles (metralleta, inicio del arranque de un motor de dos tiempos, etc).
- b)- La inestabilidad del frente del carbón se manifiesta por el avance del frente hacia el hueco. En muchos casos este avance suele ir acompañado por una presión y convergencia del techo. En resumen, se aprecia el llamado "trabajo del grisú".
- c)- Disminución de la temperatura en el carbón del frente y en la atmósfera, como precursor del desprendimiento.

3.2 - Papel del gas.

Es el más importante factor relacionado con los desprendimientos. El gas suele ser generalmente una mezcla de metano (CH₄) y anhídrido carbónico (CO₂). En el carbón se suele almacenar más CO₂ que CH₄, y se sabe que los desprendimientos de CO₂ son más violentos.

Hoy se admite, dadas las enormes cantidades de gas que pueden desprenderse de un trozo de carbón arrancado, que el gas no puede encontrarse únicamente en estado libre en los poros del carbón como en un depósito, pues tendría que encontrarse a una presión tal que debería hacer explotar el carbón, sino que también está íntimamente ligado a la materia. Poco importa la naturaleza de esta combinación, disolución, etc, es decir, al lado del gas libre el carbón contiene gas asociado que forma con el carbón un complejo inestable. Para una presión de gas determinada, existe un equilibrio entre los dos estados. Resulta de ello que si en un punto los poros del carbón se ponen en comunicación con el hueco de

la explotación, el gas libre se desprende, la presión baja, el equilibrio se rompe y parte del gas asociado pasa a estado libre y se desprende a su vez.

Además, cuanto mayor es la velocidad de desorción en ese momento, es decir, más fácilmente libera su gas asociado, más rápidamente son realimentados los poros y más importante es la emanación de gas. Según esta velocidad, se puede ir del desprendimiento normal más o menos abundante, al desprendimiento instantáneo (D.I.). La velocidad de desorción, no es constante, sino que disminuye con el tiempo a medida que decrece la cantidad de gas asociado. De ello resulta que sólo una parte del gas total que contiene la capa tiene tiempo de desprenderse en el arranque y durante el transporte, el resto se evacúa en la superficie.

El gas se desprende en el momento en que la presión exterior de la capa es inferior a la del gas que hay en los poros del carbón. El caudal depende de la velocidad de desorción de la capa, velocidad que está en función de la cantidad total de gas que contiene, de la textura del carbón, de la fisuración y permeabilidad del carbón y, para una capa dada, de su grado de dislocación: de ahí el papel esencial de las presiones de los terrenos.

Existen varias fórmulas matemáticas para explicar la emisión de gas de la capa. El gas liberado es simplemente la desorción del gas adsorbido y el escape como gas libre a partir de las fracturas existentes en el frente. Para una presión dada, la velocidad de emisión está determinada principalmente por la permeabilidad del carbón. El flujo por difusión por los microporos es muy pequeño comparado con el flujo total de gas, lo cual ocurre, principalmente por las fracturas. Generalmente se admite que la permeabilidad disminuye con el incremento de las tensiones.

La energía debida a la expansión del gas se puede estimar considerando la energía que se necesita para comprimir un gas ideal de 1 atm. a la presión del gas en la capa.

Combinación gas-carbón: La naturaleza física de esta combinación no es aún perfectamente conocida. Sin embargo se admite generalmente que resulta de una adsorción física monomolecular, realizada por las combinaciones de Van der Waals y que obedece a la ley de Langmuir. En esta hipótesis, la adsorción del metano se limita al recubrimiento de las superficies internas por una capa monomolecular. Los carbones tienen un poder absorbente muy elevado gracias a su fina porosidad y a su gran superficie interna. Recordemos que la concentración de gas en un carbón está en función de:

- la naturaleza del carbón (grado de hullificación). Cuanto mayor es la hullificación mayor es la cantidad en gas que posee y más rápidamente se libera. Los carbones secos son más grisosos que los grasos.
- la presión del gas.
- la temperatura. Una elevación de la temperatura reduce la capacidad de fijación, que alcanza alrededor de 0.8% por grado C.
- la humedad reduce la capacidad de adsorción. Una humedad del 1% reduce la concentración de 20 a 15 m³/t
- el contenido en cenizas.

El estudio de la isoterma de adsorción de los carbones belgas,

muestra un máximo de capacidad de fijación de metano para los carbones con un 14 a 15% de materias volátiles y parece indicar un descenso de ésta capacidad para los carbones menos hullificados, hasta 33% de materias volátiles. En muchos yacimientos parece que la capacidad de adsorción aumenta con la profundidad, del mismo modo que lo hace el grado de hullificación.

A mayor profundidad, menor contenido en volátiles, mayor grado de hullificación y mayor capacidad de absorción de gas.

La influencia de la composición petrográfica sobre la capacidad de adsorción no está completamente dilucidada. Este factor sin duda juega un papel, pero en la mayoría de los casos queda enmascarado por otros efectos más importantes.

La textura del carbón: cuanto más fina es, los granos ofrecen mayores superficies de desprendimiento y más se abren las fisuras cuando se produce la descompresión de la materia en el momento de la distensión, formando una red de canales de poca resistencia a la salida del gas. Granos de menos de 1 mm de diámetro pierden todo su gas en algunos minutos, mientras que un bloque grande de hulla tarda días, incluso años.

La velocidad de desorción está en función de las tensiones tridimensionales de la capa. Es tanto más importante cuanto más diferentes son estas tensiones y más elevada sea la mayor tensión principal.

En resumen, el caudal gaseoso es tanto más elevado (y por tanto la velocidad de desorción es más grande) cuanto mayor es el contenido de gas en el carbón, cuanto menos materias volátiles contenga, cuanto más dividida esté su textura y, para una capa dada y en un punto dado, cuanto mayor abertura tenga esta capa, esté más dislocada, esté sometida a tensiones más intensas y estemos más cerca del principio del desprendimiento.

El minero tiene que recordar que sólo las capas de carbón distendidas o descomprimidas son susceptibles de perder cantidades apreciables de gas, por lo menos en la escala de tiempo que interesa para la explotación minera. Es el fenómeno de la fisuración y de la distensión de las capas y de los terrenos lo que activa el mecanismo del desprendimiento. Y este es el fenómeno que explica el éxito o el fracaso de los procedimientos de explotación que se aplican actualmente.

Los desprendimientos del muro se producen por la acumulación de gas debajo de un estrato relativamente impermeable y un subsecuente rápido escape del gas, después de una acumulación de esfuerzos en el estrato del muro. El gas puede acumularse en trampas geológicas naturales o donde la velocidad de escape del gas por debajo de la capa exceda a la velocidad de escape de gas a través del muro. Por lo tanto, el control del estrato así como el efecto de la permeabilidad inducida, es muy importante a la hora de predecir el escape del gas acumulado.

Williams et al. (1944) sugirió que los pliegues, las fallas de arrastre, los "slip cleavage" y el carbón altamente fracturado, friable y "slickensided" son responsables de las más grandes emisiones de gas. Este supuesto es compatible con el hecho de que los carbones con el rango más alto son los menos permeables, pero

también los de mayor capacidad de adsorción. El desmenuzamiento y fracturación del carbón en los lugares geológicamente activos, es una forma muy efectiva para facilitar un rápido escape del gas, ya que entre pequeñas partículas, el gas desorbido necesita únicamente viajar muy poca distancia para ser libre.

3.3 - Tensiones.

La mayoría de los desprendimientos suelen ocurrir en el frente de las galerías, ya que estas situaciones, presentan condiciones óptimas para la concentración de altas tensiones alrededor de los huecos mineros. Por lo tanto, se debe evaluar y estudiar su papel en los mecanismos de los desprendimientos.

- **Tensiones in situ.** Las tensiones en la corteza terrestre son el resultado de la actividad de fuerzas tectónicas, fuerzas gravitacionales o tensiones residuales debido a cargas tectónicas, térmicas o gravitacionales. La medida únicamente de la tensión in situ, no es capaz de discriminar entre estos componentes. Aún no se conoce la contribución de cada uno de estos tipos de tensiones en el carbón.

Pero, en áreas sísmicamente activas, se puede conocer el rango y características de las tensiones tectónicas. Así, el estudio del terremoto de Picton (1973) en el Sydney Basin de Australia permitió conocer las direcciones de los ejes de los esfuerzos principales en dicha región, los cuales eran aproximadamente N-E y vertical, respectivamente. Las últimas medidas realizadas en Sydney Basin indican que el esfuerzo horizontal es generalmente mayor que el vertical, aunque varían localmente las direcciones del esfuerzo máximo principal. Es interesante anotar que las fallas Strike-slip propensas a desprendimientos en el Sydney Basin tienen dirección E-W. Esta orientación corresponde a los mayores esfuerzos de corte ya que el campo de esfuerzos locales y los lugares de los desprendimientos reflejan un campo compresivo regional NE-SW.

Las capas donde se producen los desprendimientos están sometidas a presiones muy intensas en zonas de arrastre, de fallas o zonas trastornadas. Los desprendimientos se producen en macizos donde subsisten fuertes presiones residuales de las fuerzas orogénicas.

3.4 - Influencia de las estructuras geológicas sobre el campo de las tensiones in situ.

La geometría de las estructuras geológicas es un factor importante a la hora de considerar el efecto que las estructuras tienen sobre los campos de tensiones in situ, ya que son el principal resultado de las fuerzas gravitacionales, tectónicas o termales. Los planos de falla transmitirán la componente del esfuerzo normal y la componente tangencial será transmitida de acuerdo al grado de fricción interna, a lo largo del plano de falla.

Lee et al. (1969) midiendo cambios de tensiones sobre una falla de bajo ángulo (aparentemente normal) en un túnel, encontraron que el esfuerzo compresivo al pie del muro era tres veces mayor que los del techo y que la orientación de los esfuerzos estaban controlados por el plano de la falla. Abel & Lee (1973) demostraron que la estructura geológica, en este caso la foliación, controló la orientación del campo de tensiones in situ y que la magnitud media de los componentes horizontales y verticales era más de dos veces

superior a la predicha por el "overburden". Ambos autores concluyen que las labores mineras pueden desencadenar la liberación de la energía tectónica almacenada, cuya magnitud y direcciones eran controladas por la estructura geológica. Poco se sabe acerca del efecto de las estructuras más complejas sobre el campo de tensiones in situ.

En minas de carbón no han sido hechas investigaciones similares, pero presumiblemente la estratificación de las capas y de las rocas influirían de forma fundamental en la distribución de los esfuerzos. Price (1959) propuso un modelo cuando el esfuerzo vertical actúa sobre una capa de carbón y los estratos cercanos (hastiales) son capaces de inducir áreas con anomalías esfuerzo-deformación alrededor de estructuras. Los esfuerzos horizontales resultantes debido a la carga vertical en una capa de carbón son aproximadamente igual a la carga vertical, determinado por el relativo bajo valor del número de Poisson ($\mu=2$). Los esfuerzos horizontales son más bajos en las rocas próximas de la capa, donde el valor de $\mu=6$. Estos componentes horizontales del esfuerzo vertical están concentrados donde variaba la inclinación de la capa o el espesor, o donde el carbón está en yuxtaposición con la roca.

3.5 - Propiedades mecánicas del carbón.

Se conocen relativamente bien debido a los ensayos que se realizan en los laboratorios sobre pequeñas muestras y los ensayos in situ en grandes muestras o sobre la capa en su totalidad. El carbón tiene un bajo módulo elástico y alta relación de Poisson, y pueden padecer altos esfuerzos y deformaciones diferenciales entre 0.5-30% dependiendo de la presión de confinamiento.

3.6 - Energía de deformación elástica almacenada en lugares estructurales.

Las capas de carbón deformadas presentan una tensión residual, la cual se puede medir in situ en las rocas cristalinas y rocas sedimentarias, y es el resultado de una deformación inelástica y la incapacidad del material deformado a recuperar su configuración pre-deformacional. Las considerables diferencias en las propiedades elásticas entre el carbón y las rocas encajantes (hastiales) son propicias para generar inhomogeneidades y cargas en ciertos lugares de la estructura.

Existe un segundo tipo de inhomogeneidades dentro del material, el cual ha sido demostrado en rocas cristalinas por métodos de rayos X. Este tipo de tensión no se puede medir in situ y aún no ha sido demostrado que ocurra en el carbón. Pero en vistas al rango de las propiedades elásticas para los diferentes macerales que constituyen el carbón, parece razonable sugerir que el carbón presenta un segundo tipo de tensiones residuales como resultado de las inhomogeneidades dentro del propio carbón. Ambos tipos de tensiones pueden contribuir mucho a la liberación de energía durante los golpes de techo, desprendimientos instantáneos y derrabes, pero aún no se han realizado sobre el carbón medidas de energía residual.

La energía de deformación se almacena en el carbón que es elásticamente deformado al concurrir los campos de esfuerzo tectónico y gravitacional. Los ensayos in situ en una capa de Silesia indica que puede almacenar 10.000-24.000 J por m³ de energía de deformación elástica. Una rápida liberación de esta

energía sería suficiente como para proyectar carbón dentro de las galerías de la mina. Los valores in situ pueden ser menos que la mitad de los obtenidos sobre pequeñas muestras en el laboratorio.

3.7 - Naturaleza de las estructuras.

Se considera que las estructuras geológicas a escala mesoscópica y a nivel de mina, muestran el lugar donde se concentran los esfuerzos y el gas (Fig. 8) y probablemente el 90% de los desprendimientos ocurren en tales sitios. La naturaleza de estas estructuras ha sido muy poco estudiada en las capas de carbón. Los aspectos de las estructuras con una importancia especial en los mecanismos de los desprendimientos son, la presencia y distribución de "gouge" (banda de cizalla), la intensidad de la fractura y la geometría de la estructura.

El carbón "blando" está claramente relacionado con los lugares propensos a desprendimientos. Algunos de estos carbones están compuestos de varios materiales en la zona de falla y es conocido como "gouge". El "gouge" está restringido a fracturas de cizallas y se forma por un proceso llamado cataclásis, el cual es un mecanismo de fricción con fracturación, trituración y granulación de una roca, así como la rotación de los cuerpos rígidos. El "gouge" sucede de todas las formas y a todas las escalas de fallas y fracturas de cizalla, y en un rango desde 10 nm a 10 Km. Las propiedades del "gouge" se conocen muy mal desde el punto de vista de su comportamiento con el gas y el esfuerzo, pero su estructura microscópica es completamente diferente a la del carbón sólido y no cizallado (Farmer & Pooley, 1967).

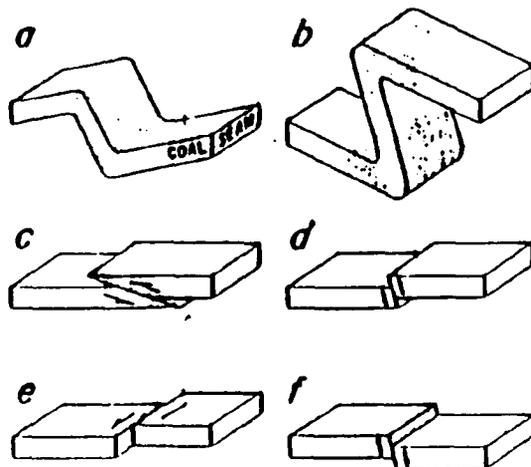


Fig. 8.- Bloques diagramas de estructuras geológicas en capas propensas a desprendimientos. a)- Anticlinal asimétrico (tipo "Kink"). b)- Pliegue tumbado. c)- Falla de arrastre. d)- Falla inversa. e)- Falla de strike-slip. f)- Falla normal. Las flechas indican el movimiento relativo de los bloques.

También se ha observado un aumento de la fracturación en los lugares próximos (alrededores) a las zonas de desprendimiento y estructuras propensas a ellos. También es necesario diferenciar entre las fracturas naturales (geológicas) y las inducidas por las labores mineras.

La geometría de una estructura puede afectar directa o indirectamente en el desarrollo de los desprendimientos en un área. Por ejemplo, la orientación del "cleat" con respecto a la dirección minera, capas altamente tensionadas pueden influenciar el drenaje del gas en el frente y representa un factor importante en el "triggering" un desprendimiento. La geometría de una estructura en sí misma puede reflejar también los campos de tensiones de los mecanismos de su formación, lo cual puede tener una influencia directa sobre la intensidad de la estructura y , como consecuencia, su riesgo a desprendimientos.

La figura 9 representa dos tipos de pliegues y cuatro tipos de fallas. La descripción sistemática de las fallas y pliegues están convenidas en textos como Price (1966) y Ramsay (1967). La geometría del pliegue tipo "Kink" (9a) cuando se produce en estratos, es de tal forma que los estratos menos competentes a lo largo de toda su longitud por el pliegue (núcleo y flancos) suele estar, generalmente, comprimida y triturada. Los pliegues con un perfil similar al de 9b serán más propensos a desprendimientos en las zonas de los núcleos, donde el carbón sufre una considerable deformación por el flujo ductil, o incluso, flujo cataclástico a que es sometida la capa en el proceso de plegamiento.

De igual modo, existen muchas diferencias en la forma, estilo y en la intensidad de deformación para los diferentes tipos de fallas. Las fallas inversas, las de arrastre y las de strike-slip (Fig. 9c, d, e) son fallas conocidas como propensas a desprendimientos. Generalmente suelen estar constituidas por amplias zonas de cizalla con material fracturado ("gouge"), al contrario de lo que ocurre en una falla normal (9f) que presenta zonas relativamente estrechas y de una simple fractura.

Teniendo en cuenta las observaciones realizadas, es necesario realizar trabajos geológicos detallados y más profundos en aquellos lugares propensos a desprendimientos, con el fin de establecer la naturaleza exacta de las estructuras, antes de valorar su papel en los mecanismos que puedan aparecer. Una vez conocido esto, la investigación puede ser dirigida directamente a aclarar la interacción que pudiera haber entre la estructura geológica existente y las otras precondiciones previas necesarias para que ocurra un desprendimiento: el gas y las tensiones.

4 - VARIAS TEORIAS.

Es muy difícil formular una teoría que se comprenda, según los conocimientos actuales sobre las condiciones físicas de la capa de carbón, para los mecanismos de desprendimientos. Muchos autores, aunque han examinado en detalle las condiciones y fenómenos asociados a los desprendimientos, no se han atrevido a emitir una teoría.

De todos modos, en todas las teorías existente, juegan un papel

básico el contenido de gas del carbón (CH₄, CO₂, N₂), bien libre, bien adsorbido, la velocidad de desorción, la fisuración, la elasticidad, las tensiones residuales (bien tectónicas, bien tecnológicas), y la humedad de constitución. El sistema de avance o de arranque, la humedad inducida y las vibraciones resultantes de la utilización de medios mecánicos, son otros factores que se superponen al complicado cuadro existente antes y durante el desprendimiento.

Una de las teorías discutida ampliamente por Brigg (1921) y Caufield (1928) es la teoría de la "cavidad", la cual supone que las cavidades abiertas contienen gas a presión en el carbón sólido, el cual se desprende durante los trabajos mineros. Esta teoría ha sido descartada pues no hay evidencia de tales cavidades en profundidad.

La "teoría del bolsillo" suscitada por Coeuillet (1959) basada en el concepto de la presencia de carbón fracturado, cuarteado, triturado, disgregado en distintas zonas de la capa, particularmente en las proximidades de fallas y núcleos de pliegues. Este tipo de carbón forma bolsadas de gas libre a alta presión, y se libera rápidamente cuando una galería o frente se aproxima al "bolsillo".

Briggs (1921) también describió zonas de carbón "blando" donde suelen ocurrir desprendimientos. Estas zonas estaban rodeadas por áreas de carbón duro y estaban asociadas a estructuras geológicas. También Wilson & Rice (1931) denominó las zonas de carbón "blando" en la capa como "nido", "racimo", "centro" de los desprendimientos, y a las zonas de carbón duro que le rodeaban como "diques", "presas". También observó que las áreas de carbón "blando" contenían gas como "bolsillos".

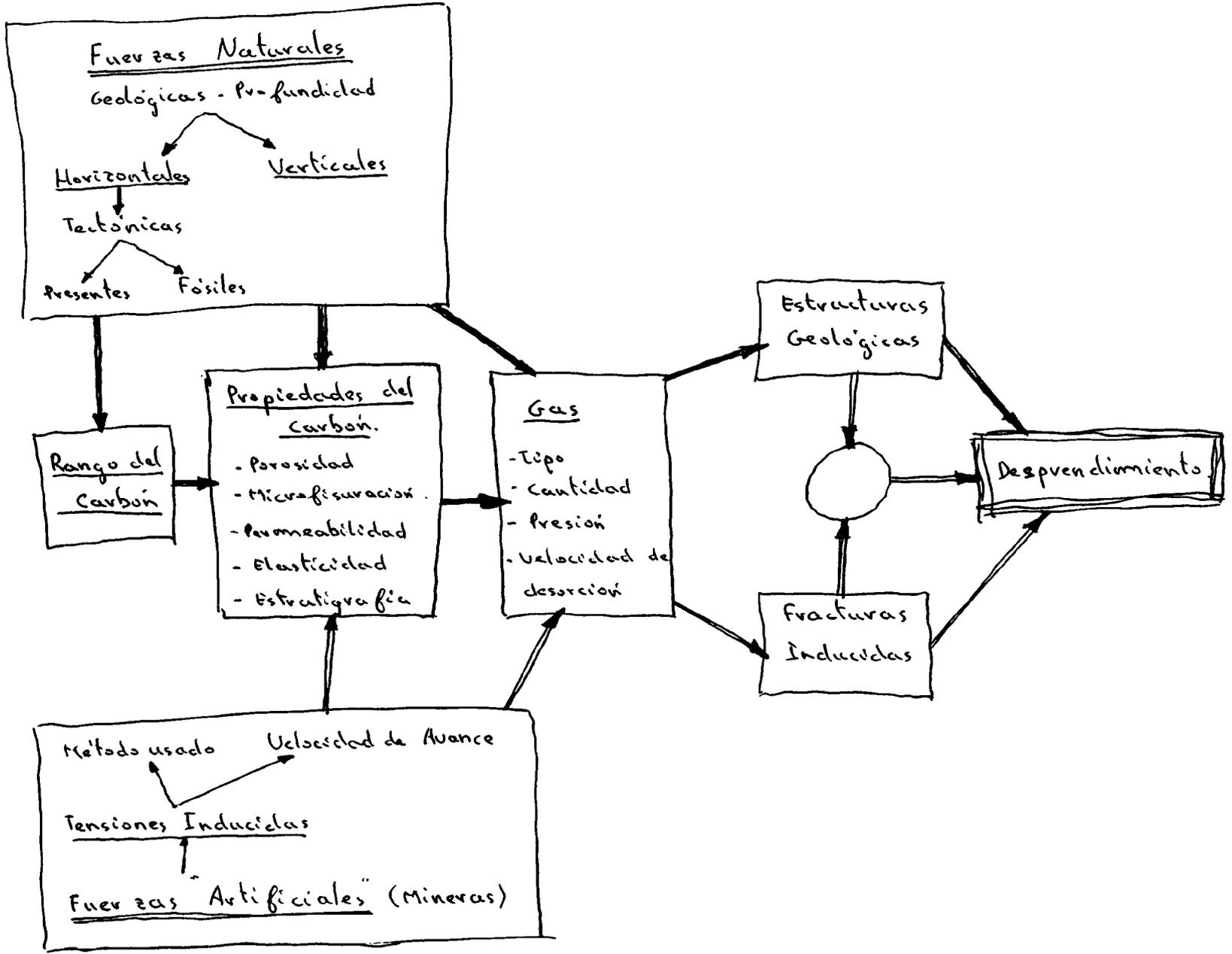
La teoría dinámica utiliza el concepto de fracturación dinámica del carbón por la sobretensión. En particular, Coeuillet (1959), enfatiza la importancia del desarrollo de las fracturas inducidas por las labores mineras en el avance de un frente en carbón. También se ha discutido como precursor de desprendimientos, la creación de fisuras en el carbón triturado sometido a muy poco esfuerzo de compresión no confinado. En esta teoría, el gas se considera que está adsorbido tanto en el carbón sólido como en el carbón triturado y es rápidamente desorbido durante la fisuración.

Basándonos en los conocimientos actuales, la teoría dinámica parece ser la más acertada, especialmente en ciertos aspectos. Una estructura geológica puede ser considerada como un controlador muy especial sobre del gas y del régimen de tensiones locales. Por ejemplo, en la capa Bowen de Collinsville, Queensland, los desprendimientos de CO₂ no ocurren cuando hay altas tensiones, sino cuando hay fallas en las cuales el carbón está altamente fracturado. En estos casos, el papel del gas puede ser más importante que el de las tensiones. Por contra, en Leichhardt Colliery en Blackwater, Queensland, se producen desprendimientos de metano que están íntimamente relacionados con una inusual bien desarrollada exfoliación inducida por las labores mineras. Las formas de la exfoliación son de un ambiente altamente tensionado, creándose condiciones que conducen a una rápida liberación del gas. Se puede observar, que las condiciones propensas a desprendimientos se presentan en lugares altamente fracturados de una estructura geológica y/o en carbón sometido a una intensa fracturación

inducida por la minería.

Los factores más importantes relacionados con los mecanismos de desprendimientos se pueden resumir en el diagrama (Fig. 10). Lo cual sugiere que un desprendimiento ocurre si únicamente están presentes ciertas condiciones durante las labores mineras: la alta emisión de gas por el carbón, y ciertas estructuras geológicas (generalmente fallas o pliegues) y/o fracturas inducidas en el carbón o en las rocas sedimentarias próximas (hastiales). También, que aunque el carbón retenga grandes volúmenes de gas, es improbable que ocurran los desprendimientos a no ser que el carbón esté altamente fracturado o haya una determinada estructura geológica.

Fig. 9 - Diagrama de un modelo conceptual de los mecanismos de los desprendimientos representando la posible interacción entre las propiedades intrínsecas del carbón, las fuentes de energía, las estructuras geológicas y las inducidas por las labores mineras.



5 - CONCLUSIONES.

En el pasado, la geología ha sido menospreciada en lo que se refiere a las investigaciones de los desprendimientos que ocurrían en las minas de carbón y han jugado un papel secundario en dicha minería.

Ignatieff (1954), estudiando y repasando en su época todo el trabajo científico sobre las investigaciones de los desprendimientos, llegó a observar que existían dos importantes problemas (incapacidades) que retrasaban la labor investigadora. Por una parte el problema de la toma de datos "in situ" sobre las medidas de las tensiones, y por otra parte la incapacidad de examinar el carbón a escala ultramicroscópica. Hoy día estos problemas ya tienen solución, pero muchos autores sugieren que aún hoy existe un tercer problema (incapacidad): la falta de investigaciones geológicas, las cuales podrían haber sido una de las principales razones para predecir muchos desprendimientos.

Las investigaciones geológicas, cuando se han realizado, han permitido reconocer estructuras asociadas con los desprendimientos, e identificar y clasificar correctamente la estructura que era observada. Tampoco se han correlacionado los estudios microscópicos realizados sobre muestras de carbón, ni con el esquema (contexto) estructural geológico ni con las estructuras geológicas.

Generalmente, nunca han sido completamente valorados la importancia y el papel de las estructuras geológicas y, como resultado, no se ha reconocido su importancia en el entendimiento de los mecanismos de desprendimiento y en la predicción de los mismos. Existe una serie de factores geológicos que controlan el que ocurran o no desprendimientos: algunas propiedades fundamentales del carbón tales como su "rango" y la naturaleza de la "cleat", junto a la presencia de estructuras geológicas tales como fallas y pliegues. Estas estructuras son los lugares donde se concentran las tensiones, y los grandes volúmenes de gas atrapado. La estructura geológica, el campo de tensiones existente, el método minero utilizado, la velocidad de avance y la presencia de gas, son variables interdependientes que controlan la presencia de los desprendimientos.

Si se llega a una mejor interpretación y entendimiento del papel de las estructuras geológicas, las tensiones y el sistema de gas en el carbón, entonces será posible planificar métodos de minería y desarrollar nuevos y mejores medios para combatir los desprendimientos en las zonas propensas a ellos de las capas de carbón.

ESTUDIO Y ANÁLISIS
DE
PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS CARBONES.

Geotécnia y Seguridad Minera.
Proyecto Investigación Derrabes.
I.T.G.E. 28/02/91

- 1 - Introducción.
 - 1.1 - Objetivos.
 - 1.2 - El carbón.
- 2 - Estudio Microscópico.
 - 2.1 - Petrografía.
 - 2.2 - Microscopía de fluorescencia.
 - 2.3 - Análisis y clasificación microfisural.
 - 2.4 - Microdureza Vickers.
- 3 - Propiedades Físicas Elementales.
 - 3.1 - **Relacionadas con la naturaleza de los litotipos.**
 - 3.1.1 - Densidad de la roca seca.
 - 3.1.2 - Densidad de los granos minerales.
 - 3.2 - **Relacionadas con la circulación de fluidos.**
 - 3.2.1 - Porosidad abierta.
 - 3.2.2 - Porosidad total.
 - 3.2.3 - Índice de saturación de agua.
 - 3.2.4 - Grado de relleno de los poros.
 - 3.2.5 - Absorción de agua.
 - 3.2.6 - Succión capilar.
- 4 - Propiedades dinámicas. Velocidad de propagación de ondas elásticas.
 - 4.1 - Variación de la velocidad.
- 5 - Conclusiones.
- 6 - Bibliografía.
- 7 - Agradecimientos.

1.- INTRODUCCION.

1.1 - OBJETIVO.

El objeto del presente estudio es intentar correlacionar algunas características intrínsecas de los carbones, relacionadas directa o indirectamente con la presencia de gas y el estado tensional, con su comportamiento frente a los desprendimientos.

Las características estudiadas han sido la presencia de espacios vacíos, en forma de poros y fisuras, que han sido cuantificados mediante observación directa por microscopía óptica de fluorescencia, así como indirectamente mediante la determinación de algunas propiedades físicas (porosidad, velocidad de propagación de ondas y microdureza Vickers). Estas características contribuyen a conocer el estado geomecánico actual del carbón y las facilidades del mismo a desprender gas y a derrabarse.

Se pretende añadir nuevos datos y nuevas perspectivas al complejo mundo del carbón y los desprendimientos, en minas subterráneas.

Muestras: El estudio se ha centrado en muestras de carbón procedentes de dos capas (14W y 15W) de una mina subterránea del Norte de España. Ambas capas están contiguas estratigráficamente, sin accidente geológico o aspecto aparente que explique tan diferente comportamiento de una y otra frente a los fenómenos gaseodinámicos. Mientras la capa 14W no presenta problemas, la 15W, por lo contrario, es una capa problemática en la que se han originado varios de estos fenómenos gaseodinámicos.

Nuestro propósito es, pues, conocer las características intrínsecas de ambas capas y poder llegar a explicar tan diferente comportamiento.

A modo comparativo, se han incluido en el estudio otros dos carbones procedentes de Pennsylvania (Bethenergy y Waynesburg), cuyas propiedades, características y comportamiento son muy diferentes.

1.2 - EL CARBÓN.

Parece lógico e imprescindible, cuando se pretende realizar un estudio y obtener unas conclusiones sobre los fenómenos gaseodinámicos de carbón, conocer lo mejor posible el carbón, responsable directo o indirecto de todos los fenómenos. Este estudio debería abarcar su génesis, los procesos tectónicos sufridos, su estructura interna, sus propiedades geomecánicas, su contenido en gas, su estado tensional, etc.

El carbón se define como una roca combustible que contiene más del 50% en peso y más del 70% en volumen de material carbonoso, formado por compactación y maduración de restos de plantas, acumulados en una turbera. El proceso de transformación de la turbera en carbón de rango progresivamente mayor es conocido con el nombre de carbonización (coalificación). Un aumento en el rango del carbón viene frecuentemente caracterizado por un aumento en el porcentaje de carbono y una disminución en el porcentaje de material volátil.

El carbón es una roca de composición heterogénea en la que la fracción orgánica puede ser englobada bajo el término de "maceral", equivalente orgánico de mineral de cualquier roca. Los macerales reconocidos en la petrología del carbón se dividen en tres grupos:

- Vitrinita, también llamada huminita para turba y carbón pardo, esencialmente derivado de material leñoso.
- Exinita, a veces llamado liptinita, derivado principalmente de esporas, resinas y cutículas.
- Inertinita, procedente principalmente de materia vegetal oxidada.

El carbón está formado, normalmente, por más de un grupo de macerales. La identificación petrográfica de esta "mezcla" recibe el nombre de microlitotipo. La descripción del carbón "de visu" se hace atendiendo a los litotipos, que son estos: Vitreno, Clareno, Fuseno, carbón "Cannel" y carbón "Boghead".

En cuanto a su ambiente de origen hay dos tipos básicos de carbón: - Carbón Húmico, derivado fundamentalmente, de restos macroscópicos de plantas acumuladas en turberas.

- Carbón Sapropélico, derivado de partes microscópicas de plantas y depositadas como fangos subacuáticos en condiciones anaeróbicas.

Los litotipos Vitreno, Clareno, Dureno y Fuseno corresponden a carbones Húmicos, que son la inmensa mayoría de carbones de interés económico en el mundo; y los Cannel y Boghead son sapropélicos.

Por otra parte, el ambiente sedimentario en el que se forma el carbón condiciona en gran medida las características y propiedades del mismo, sus componentes, la geometría de las capas y la calidad del carbón, es decir, su contenido en cenizas y en azufre. Así, se ha demostrado que los carbones formados en llanuras deltaicas difieren significativamente de los formados

en llanuras de inundación fluviales. Los "fluviales" tienen capas con geometría elongada y contienen, en general, un bajo contenido en cenizas y en azufre, mientras los "deltáicos" suelen ser de geometría tabular y con un alto contenido en cenizas y en azufre.

Independientemente del medio sedimentario al que se asocie el carbón, éste siempre se forma en un ambiente pantanoso. Para que el área pantanosa pueda generar una turbera, ya sea en medios de transición (deltas, llanuras de marea y sistemas de islas-lagoon), ya sea en medios netamente continentales (llanuras de inundación fluvial, áreas palustres o lacustres), es necesario que se den algunas condiciones capaces de formar una turbera y, consecuentemente, capas de carbón. Estas condiciones mínimas son:

- a)- Ausencia de sedimentación terrígena y/o química.
- b)- Una lámina de agua permanente y ambiente reductor.
- c)- Equilibrio subsidencia / sedimentación.

El tipo de pantano, junto con el medio y facies sedimentaria a que se asocia, determina en buena medida la calidad de los carbones que en ellos se van a formar, tanto en lo referente a su contenido en cenizas como en azufre. El carbón con bajo contenido en azufre se ha formado en medios netamente continentales, ya que salvo aportes de azufre exógenos a la cuenca, el único azufre disponible es el que forma parte de la composición de la materia vegetal, el cual puede ser liberado durante la degradación de la materia orgánica e incorporado a la turbera, mientras que los carbones formados en los medios de transición, tienen un alto contenido en azufre debido a la reducción, adsorción y fijación por la turba/carbón, en forma de sulfuros, del azufre que, en forma de sulfatos, está disuelto en el agua del mar.

- Estructura y propiedades del carbón:

El carbón puede ser considerado como un medio poroso recorrido por una red de fisuras. A causa de su fina porosidad, las hullas poseen superficies internas muy extendidas y por ello capaces de fijar grandes cantidades de gas, por adsorción, más de las que pueden ser comprendidas en sus poros y fisuras. La materia homogénea del carbón cercada por la red de fisuras es muy poco permeable al gas, pero precisamente gracias a las fisuras el gas puede escaparse a cierta velocidad hacia el hueco originado por las excavaciones mineras.

1- Porosidad: El orden de magnitud de la porosidad varía entre límites bastantes amplios. Más que el valor global del volumen de los poros, es el reparto de este volumen en función de las dimensiones de los poros lo que es importante para la fijación (adsorción) de gas por el carbón. Se pueden distinguir tres clases de poros: Microporos (asimilables a canales cilíndricos) cuyo radio medio es inferior a 50 Å; poros intermedios, radio entre 50 y 500 Å; y Macroporos de radio superior a 500 Å.

Gracias a su fina porosidad, los carbones presentan superficies internas muy grandes, con extensiones desde una decena a más de

100 y hasta 200 m²/g, lo que les confiere un poder muy elevado de fijación de gas.

2- Fisuración: Existen numerosos métodos para conocer el grado de fisuración de un carbón, pero todos ellos están basados en la observación y cuantificación de estas fisuras por microscopio petrográfico o M.E.B, y los resultados pueden ser asociados a medidas de permeabilidad y a tensiones en el carbón. En este estudio completaremos el estudio clásico por microscopía con una serie de observaciones por métodos indirectos. Nos referimos al estudio del movimiento de fluidos por el seno de un medio poroso.

La relación existente entre la fracturación del carbón y la capacidad de producir fenómenos gaeodinámicos se conoce desde hace años. El método que utilizaremos fue usado, en un principio, en Rusia, Polonia, Bélgica y Francia; consiste en recoger muestras de un frente de carbón, puliéndose bloques para ser observados al microscopio por luz reflejada. Se cuentan las fracturas a lo largo de una línea (10, 20, 100 mm) obteniendo el factor "O", que representa la distancia media entre las fracturas, o el factor "L" que es la suma de todas las longitudes de fractura dentro de una superficie de 1 mm², y el factor "S" el cual representa el área total de las fracturas dentro de una área de 1 mm².

3- Permeabilidad: Influye de forma decisiva en el proceso de desgasificación del carbón, de ahí su gran importancia. La variación petrográfica y estructural del carbón queda directamente reflejada en su permeabilidad y porosidad. La permeabilidad de los carbones decrece con la presión de confinamiento, así, a 1000 m, es del orden de algunos microdarcys (10⁻⁶ darcy), después del efecto de una capa égida o una fracturación hidráulica es de 10⁻³ darcy, y de 10⁻¹ darcy una vez extraído de la mina.

4- Rango del carbón: Es uno de los aspectos fundamentales a considerar en el carbón y, aunque existen numerosas clasificaciones, una característica muy importante para definir el rango es el uso del valor de la máxima reflectancia (R_{o max}) de la vitrinita. Así, en Australia, todas las capas de carbón con reflectancias mayores o iguales a 1.10 han sido propensas a fenómenos gaseodinámicos, no originándose éstos en aquellas con un valor de reflectancia menor o igual a 1.00.

El esfuerzo a que está sometido el carbón y el contenido en gas puede quedar reflejado en su rango, de igual modo que el carbón sometido a esfuerzos está también afectado por el contenido en gas adsorbido.

Los carbones con rangos altos (R_{max} mayor o igual a 1.00; con >85% de carbono total) tienen una mayor capacidad de adsorción, ya que su área superficial interna es mayor. Algunos estudios muestran que el incremento del área superficial con el rango se debe a una mayor presencia de poros pequeños.

2.- ESTUDIO MICROSCOPICO.

2.1 - Petrografía.

El estudio y conocimiento petrográfico de una capa de carbón, puede tener gran importancia y sirve para un mejor entendimiento de ciertas propiedades del carbón. La información que se puede extraer de un completo estudio petrográfico puede aportar datos de interés sobre:

- Identificación de las capas (Análisis maceral y de microlitotipos).
- Identificación de niveles y capas guías.
- Identificación del carbón, su composición, textura, etc.
- Determinación del rango.
- Determinación de la dureza y deformación.
- Determinación de su sistema de microfisuración.
- Identificación de esporas (datación).
- Solución a problemas estratigráficos, paleogeográficos y tectónicos.
- Diagénesis, evolución del carbón.

El estudio microscópico realizado en el presente trabajo se ha centrado en el análisis y estudio de la red de microfisuración y la clasificación de los carbones estudiados, basada en la misma. Para ello, las muestras han sido impregnadas en resinas fluorescentes con el propósito de resaltar el sistema fisural y su mejor observación mediante microscopía óptica de fluorescencia por reflexión.

La composición petrográfica del carbón influye directamente sobre su capacidad de adsorción de gas, aunque esta propiedad no está completamente dilucidada. Este factor, suele quedar enmascarado por otros más importantes y queda relegada a un segundo plano.

Cuanto más fina es la textura del carbón, los granos presentan mayores superficies de desprendimiento y cuando se produce la descompresión, las fisuras se abren más, formando una red de fisuras y canales de poca resistencia a la salida del gas. Granos de menos de 1 mm pierde todo su gas en algunos minutos, mientras que un bloque grande de hulla tarda días, incluso años. Por ello, el sistema poroso y fisural del carbón (tamaño, forma, anchura, persistencia, etc) es primordial en el proceso de desgasificación del carbón.

La observación al microscopio de los carbones muestra que éstos están atravesados por una red de fisuras comunicadas unas con otras, espaciadas desde algunas micras hasta algunos cientos de micras, y su anchura varía desde una fracción de micra a algunas micras. La microfisuración es el resultado de las retracciones sufridas por la materia orgánica en el proceso de hullificación, o por roturas producidas por los esfuerzos y procesos tectónicos a que han estado sometidos en su historia geológica. También pueden existir fracturas originadas por las labores mineras de la explotación, pero en general, la microfisuración de los carbones es pre-existente.

2.2 - Microscopia de fluorescencia.

Los espacios vacíos del carbón (poros y fisuras) pueden resaltarse en el caso de muestras previamente impregnadas con resinas en las que se ha disuelto algún tipo de producto fluorescente (por ejemplo Rhodamina B). Posteriormente, el carbón es pulido y observado al microscopio óptico de fluorescencia por reflexión (Fig.1), utilizando luz visible rica en la región del verde y del azul como radiación de excitación, y observando la radiación de fluorescencia emitida, rica en la región del rojo. En la mayoría de los casos se obtiene una mejor discriminación entre los espacios vacíos (poros y fisuras comunicados), que aparecen coloreados, y el resto de la roca, que aparece en fondo oscuro generalizado.

Al objeto de realzar y discriminar mejor el espacio poroso, los carbones se han impregnado con productos diversos (fundamentalmente resinas epoxídicas), teñidos con colorantes. A continuación se explica brevemente el procedimiento seguido en la impregnación al vacío.

Primeramente se secaron las muestras a 60 °C durante 24 h. Algunos autores recomiendan una temperatura de alrededor de 105 °C, pero ésta resulta excesiva a nuestro entender, ya que esta temperatura puede originar un proceso de fracturación térmica y puede generar microfisuras que no son propias del carbón original.

Posteriormente se someten las muestras al vacío durante dos horas, al cabo de las cuales se introduce la resina hasta que ésta deje de burbujear (aproximadamente otras dos horas) con el fin de que penetre en el interior de las muestras. Luego se deja que la resina solidifique con las muestras totalmente sumergidas en la resina (Fig.2).

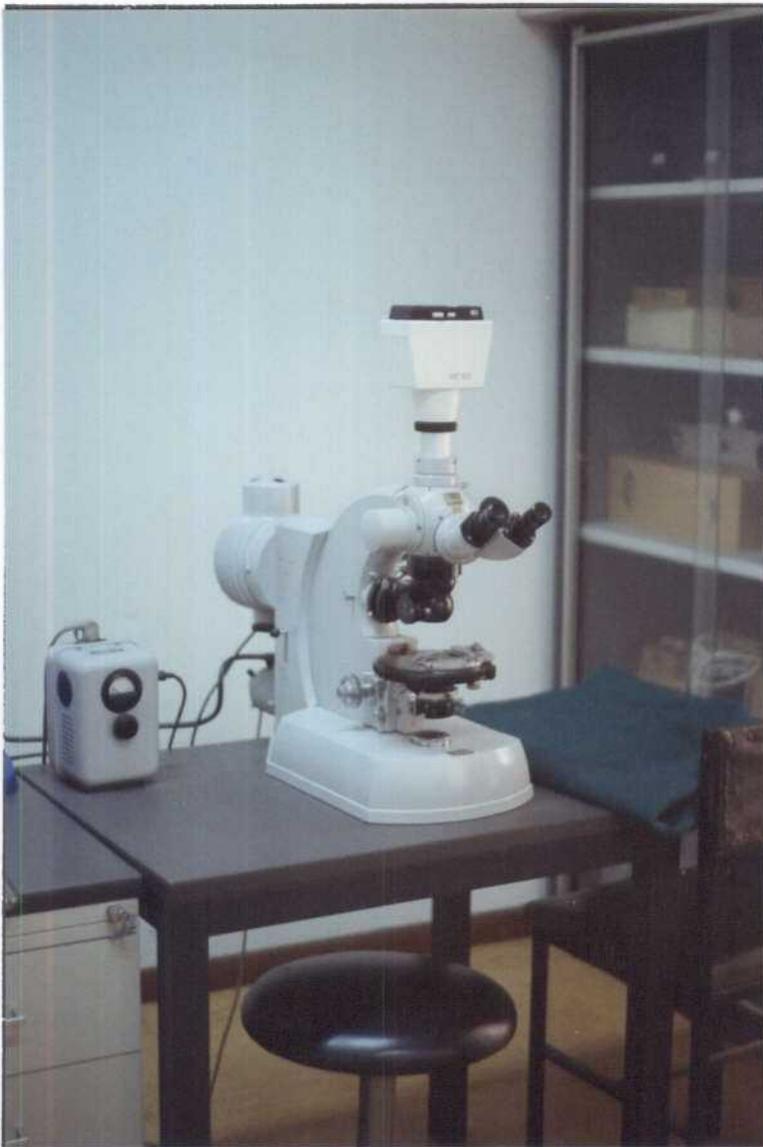
Las muestras impregnadas son cortadas con sierra de precisión de baja velocidad (para no producir deformaciones), y son pulidas. Sobre la superficie pulida, se estudia la composición petrográfica, el sistema fisural y se determina la dureza Vickers.

2.3 - Análisis y Clasificación Microfisural.

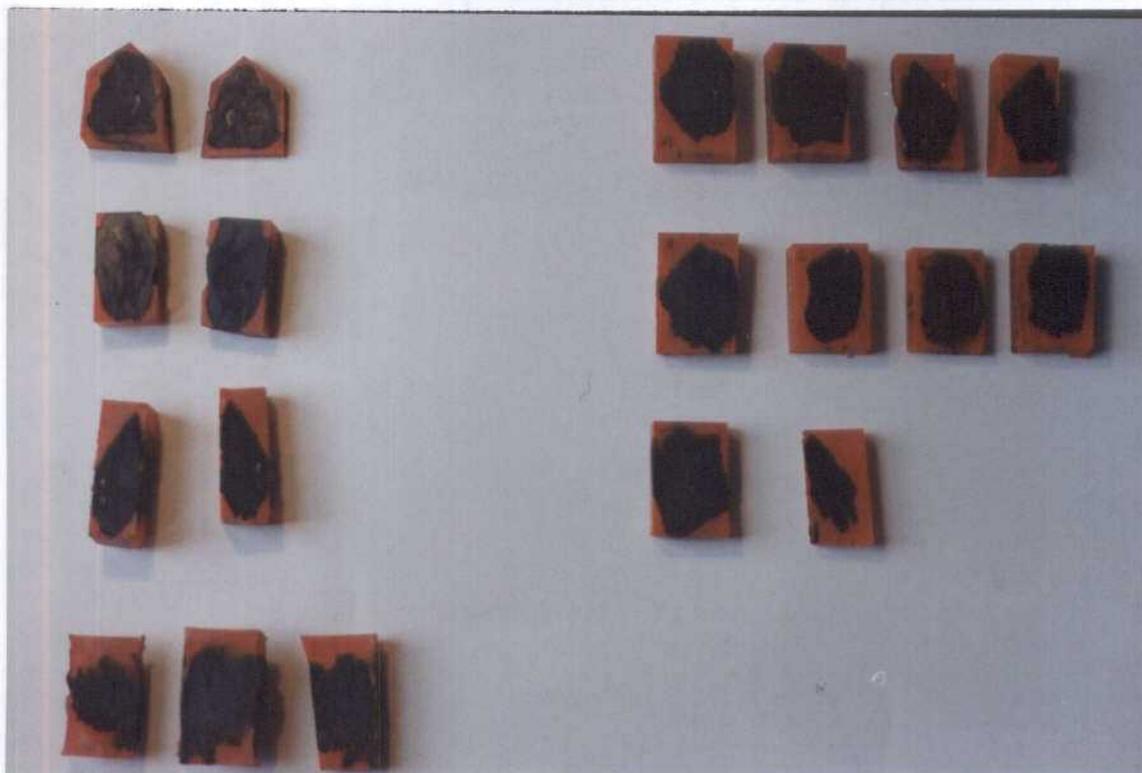
El método para contar fracturas se desarrolló originalmente en la URSS y más tarde fue usado por diversos grupos de investigadores en otros países.

Se recogen las muestras de carbón de forma diagonal a lo largo del frente de la capa, y una vez pulidas son observados por luz reflejada a 400 aumentos, pudiéndose obtener los diferentes factores:

- **Factor "O":** Es la distancia media entre fracturas. Se cuentan las fracturas encontradas a lo largo de una línea recta (10, 20 ó 100 mm).



Figs. 1 y 2 : Microscopio óptico de fluorescencia por reflexión. Muestras de carbones impregnadas con resinas epoxídicas teñidas con colorantes para resaltar su microfisuración.



- **Factor "L"**: Es la suma de todas las longitudes de las fracturas existentes en 1 mm².
- **Factor "S"**: Es el área total de las fracturas existentes en 1 mm².

Las fracturas pueden ser clasificadas en dos grandes tipos: **Microfracturas**, son las que aparecen como líneas sin bordes visibles y son menores de 1 μm de anchura, y las **Macrofracturas**, las cuales tienen bordes visibles y están comprendidas entre 1-100 μm de anchura.

Este método de conteo de fracturas tiene una serie de inconvenientes. Primeramente, la frecuencia de las fracturas depende de los microlitotipos. Además, el conteo incluye todas las fracturas, sin diferenciar entre las meramente geológicas y las inducidas por las labores mineras, o por el proceso de obtención y preparación de las muestras. Además tiene un problema práctico: necesita mucho tiempo para realizarse, desde la toma de muestras en el frente, el pulido de las muestras y el conteo de las fracturas. Durante el desarrollo de una mina, los resultados de las investigaciones llegarían tarde.

Las medidas realizadas sobre los carbones estudiados han permitido conocer el **Factor "O"** de cada carbón, así como el número de fisuras por cm (N/cm), y han podido clasificarse según la normativa soviética, utilizando la clasificación de la Tabla I.

TABLA I

	CLASE	Factor "O" (mm)	Fracturas/cm
CARBONES NO PROPENSOS.	I	1.6	0 - 6.25
	II	0.5	6.25 - 20
CARBONES PROPENSOS.	III	0.14	20 - 71.3
	IV	0.05	71.3 - 200
	V	0.008	200 - 225

Según los estudios y experiencias soviéticas, el límite entre carbones susceptibles a fenómenos gaseodinámicos y carbones no susceptibles, se sitúan en 30 fisuras/cm. Evidentemente, esto no quiere decir que todos los carbones de las Clase III a V sean susceptibles, ya que depende también de otros factores que se han manifestado conjuntamente.

La Tabla II, muestra los resultados obtenidos del estudio microfisural de los carbones.

TABLA II

	Factor "O" (mm)	Fisuras/cm	CLASE
14W	0.38	27	II-III
15W	0.27	37	III
B	0.72	16	I-II
W	0.62	19	I-II

Extraemos, como primera conclusión, atendiendo al valor del Factor "O", que ambos carbones, 14W y 15W, se encuentran situados en el límite entre carbones propensos a fenómenos gaseodinámicos y carbones no propensos. Es decir, entre carbones Clase II, donde la distancia media entre fracturas, o factor "O", es de 0.50 mm ("O"=0.50 mm), y Clase III ("O"=0.14 mm). Si el límite entre ambas clases es de 0.32 mm, estos carbones se mueven cerca de dicho valor, siendo el carbón 15W el que lo rebaja ligeramente (0.27 mm) pasando ya a carbones de riesgo; mientras que el carbón 14W supera dicho valor (0.38 mm) y pertenecería, por lo tanto, a carbón Clase II, no propenso.

Por lo tanto, los dos carbones objeto de estudio, según el estado microfisural y la clasificación soviética, se encontrarían en el límite entre carbones propensos y no propensos a fenómenos gaseodinámicos, presentando el 15W, con una distancia media entre fracturas de 0.27 mm, un riesgo mayor, siendo ya un carbón de atención especial.

Si del mismo modo atendemos al número de fracturas obtenidas por centímetro (N/cm), la conclusión es la misma. Es decir, que si el límite entre carbones susceptibles y no susceptibles a fenómenos gaseodinámicos es de 30 fisuras/cm, el carbón 15W presenta 37/cm, superando ligeramente el límite, y por lo tanto debe ser clasificado como de Clase III (dentro de los carbones con riesgo), mientras que el 14W presenta 27/cm, muy ajustado al límite, pero aún no considerado como propenso.

Respecto a los valores obtenidos en los carbones B y W, utilizados para comparar los resultados, se deduce que ambos se alejan del límite crítico, pudiéndose clasificar como Clase I ó II, pero nunca susceptibles a fenómenos gaseodinámicos. El valor del factor "O" aumenta a 0.72 y 0.62 mm (distancia media entre fracturas) y el N/cm disminuye a 19 y 16/cm, siendo el carbón B el que siempre presenta los mejores valores.

Las observaciones microscópicas también han mostrado las diferentes características existentes en sistemas de fracturas de los carbones. Podemos describir los carbones, a grandes

rasgos, desde el punto de vista microfisural y atendiendo al estudio por microscopía.

Las microfisuras o cracks, son microdiscontinuidades de recorrido variable (persistencia) y de espesor generalmente inferior a 1 μm , y que pueden tener un carácter intragranular (dentro de los granos macerales, sin sobrepasar sus bordes), intergranulares (cuando siguen los bordes de granos) y transgranulares (si cortan varios granos en su trayectoria).

- **Carbón 14W:** Su red microfisural se caracteriza por presentar un dominio de fisuras transgranulares e intergranulares, bordeando, acomodándose a los granos macerales (Figs.3 y 4), con una persistencia más acusada que en el resto de los carbones. Estas fisuras que atraviesan los granos y que persisten a lo largo de las muestras, suelen presentar una dirección regular, uniéndose en su recorrido fisuras intragranulares de menor importancia. La vitrinita, al igual que en el resto de los carbones, presenta una fisuración intragranular acusada con una red de fisuras muy bien desarrolladas y espaciadas más o menos regularmente.

- **Carbón 15W:** Este carbón presenta una red microfisural más desarrollada, compuesta por fisuras transgranulares e intragranulares repartidas irregularmente, mal interconectadas y alguna de ellas aisladas. Es un sistema fisural irregular en cuanto a persistencia y forma de las fisuras. Posee un menor grado de conectividad entre las microfisuras (Fig.5).

Mientras que el carbón 14W presenta una red con fisuras predominantemente de tipo transgranular, con acusada persistencia, con cierta regularidad en cuanto a forma y repetición, y con un grado de interconexión bien desarrollado, la red fisural del 15W presenta un mayor número de fisuras, predominando las intragranulares, con una menor persistencia, y las fisuras se distribuyen de forma más anárquica e irregular, con menor grado de conectividad.

El 14W muestra una jerarquía de fisuras en cuanto a la anchura y persistencia de las mismas. Las microfisuras transgranulares, como anteriormente se ha señalado, recorren las muestras con acusada persistencia y son las que presentan una mayor anchura. A ellas se unen fisuras intragranulares de menor tamaño tanto en anchura como en recorrido.

El 15W no muestra esta clara división. Digamos, por mera observación, que el poder de desgasificación parece menor en este carbón, aunque posea mayor número de fisuras, pero éstas están menos conectadas, son más irregulares y con una anchura menor.

Finalmente se puede decir que el diseño de la red de fisuras del 14W es mucho mejor para un proceso de desgasificación que el del 15W, con un sistema de fisuras que con su anchura y recorrido favorecen el escape del gas (fisuras transgranulares e intergranulares), al que se unen otro sistema de fisuras de menor anchura y repartidas de forma regular (intragranulares). Por el

contrario el diseño del sistema microfisural y de canales del 15W no favorece el escape del gas (aunque posea mayor número de fisuras) por carecer de fisuras que por su anchura, persistencia y recorrido canalicen el gas, presentando por el contrario, una maraña de fisuras y poros repartidos irregularmente.

- **Carbones B y W:** La fisuración de los carbones B y W es muy similar, siendo un sistema de microfisuración muy poco desarrollado, con escasas fisuras transgranulares y aisladas, aunque muy persistentes (Fig.6), y una red de microfisuración interna en la vitrinita muy regular.

2.4 - Microdureza Vickers.

La dureza es una propiedad de los cuerpos sólidos homogéneos y que determina la resistencia del cuerpo en cuestión a ser penetrado por otro cuerpo. En el carbón, la dureza únicamente puede ser determinada ensayando en superficies pulidas o en macerales puros, ya que sólo éstos se aproximan al grado de homogeneidad que requiere el ensayo. Esto implica que muchos de los métodos de ensayos de dureza existentes no sean aplicables al carbón, porque es imposible ensayar la dureza directamente y exactamente en el área seleccionada por el microscopio.

Para una determinación exacta de la dureza, se debe tener mucho cuidado en que la pirámide de diamante que se usa para penetrar, se sitúe en una zona del maceral, libre de fracturas y de impurezas minerales y que no esté influenciada por macerales o minerales adyacentes. Según Tertsch (1949), una medida no estará afectada por macerales o minerales adyacentes si el diámetro de la zona homogénea seleccionada en el maceral es cinco veces la longitud de la diagonal de la pirámide de diamante. Generalmente, sólo las vitrinitas satisfacen esta condición.

Una vez que la muestra de carbón es pulida, se selecciona el área a ensayar, comprobando que reúna la homogeneidad y condiciones ya mencionadas. Se sitúa el diamante en la posición elegida y se aplica una carga de 100 g. durante 15 segundos, con un tiempo total de 30 segundos desde el comienzo de la operación. Se miden las dos diagonales de la marca producida, calculándose la dureza Vickers (MV) mediante la fórmula:

$$MV_{kp/mm^2} = 1854,4.P / d^2$$

siendo P=100 g, y d la longitud de la diagonal en micras.

Un valor representativo de la dureza requiere por lo menos 10 medidas.

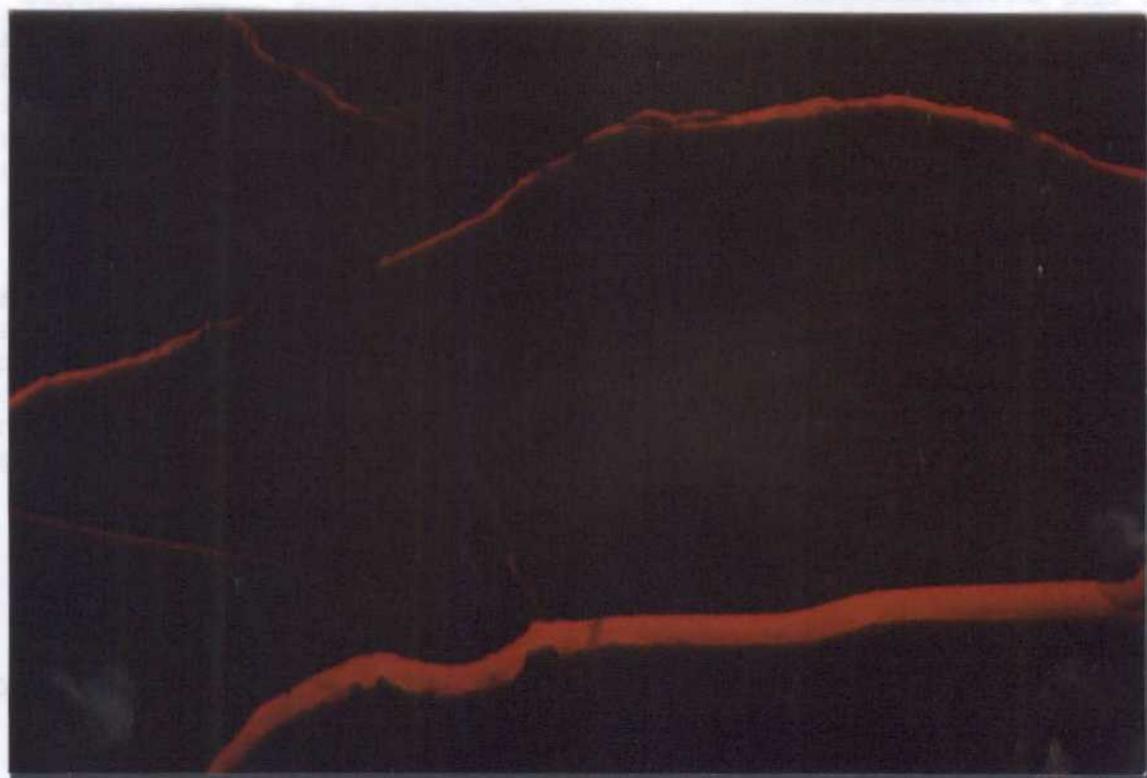
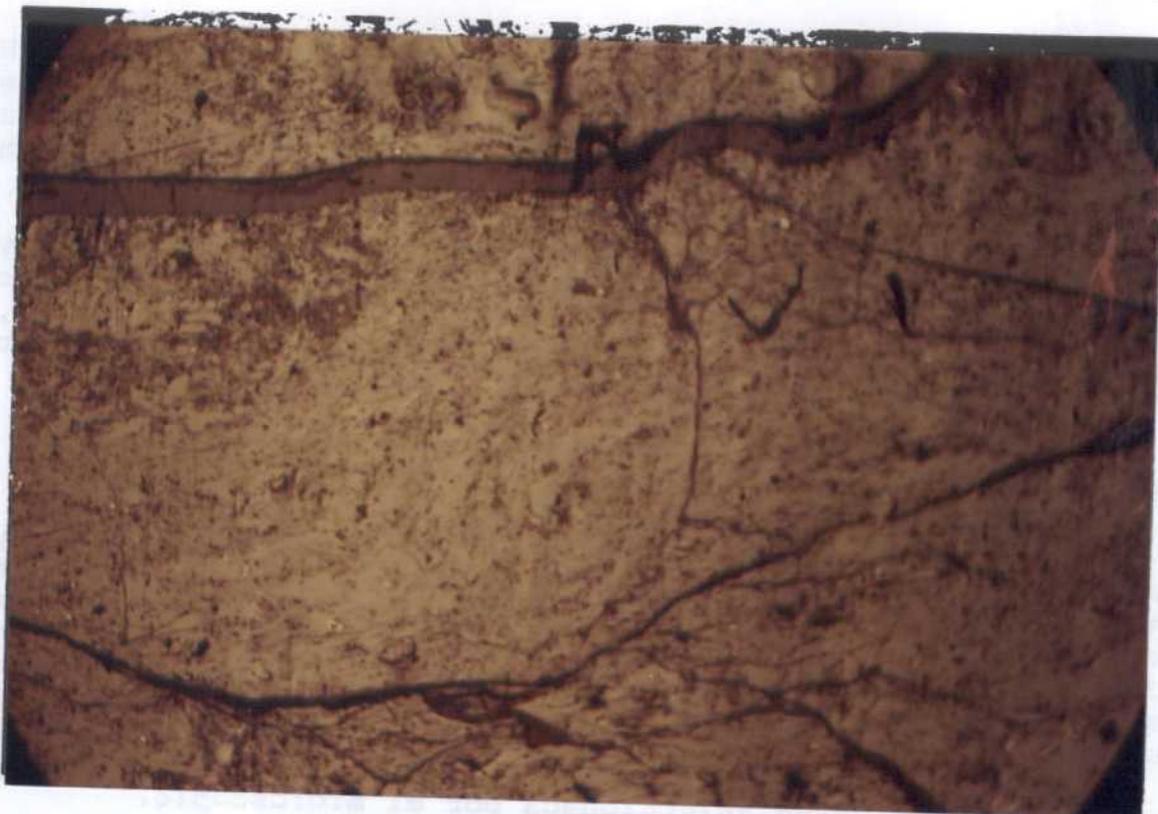


Fig. 3 .- Red microfisural del carbón 14W. Microscopía óptica de fluorescencia por reflexión (M.O.F.) (x50 aumentos). Fisuras transgranulares e intergranulares de gran persistencia y anchura, interconectadas regularmente por microfisuras intragranulares.

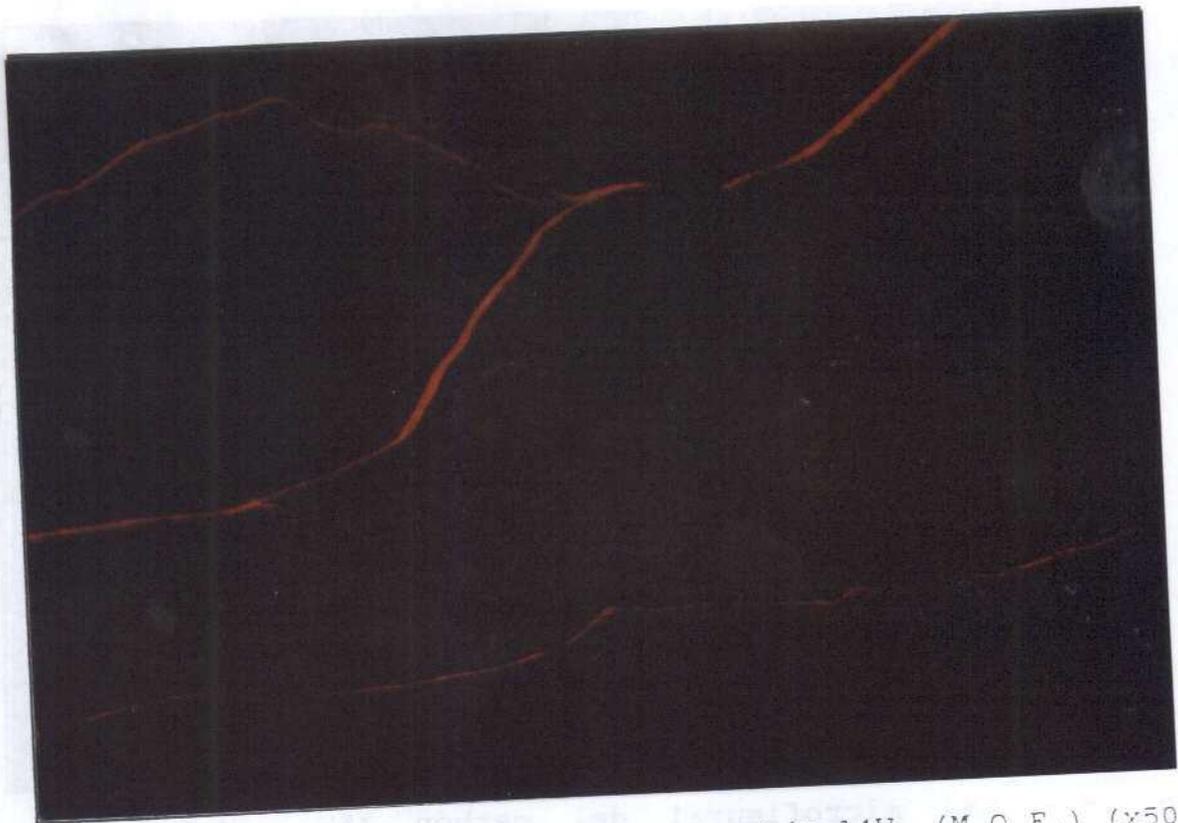
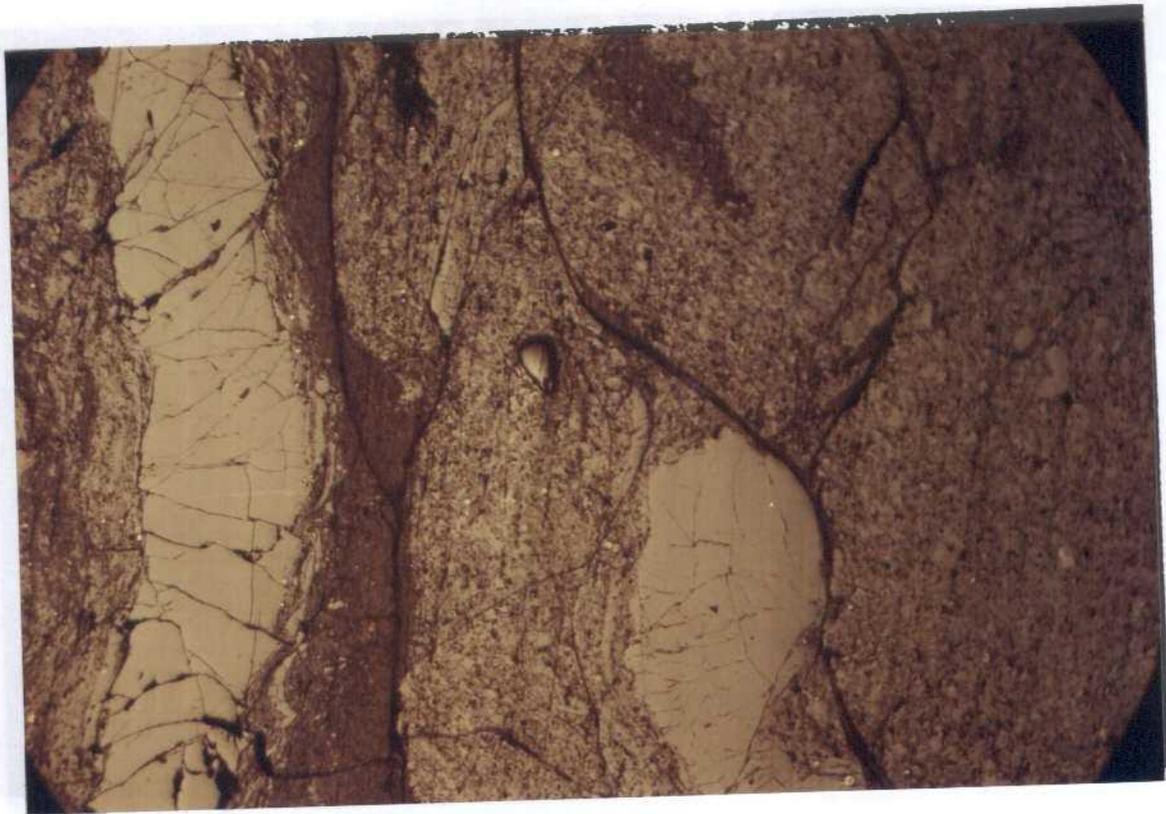


Fig. 4.- Detalle de microfisuras en el carbón 14W. (M.O.F.) (x50 aumentos). Red de fisuras transgranulares e intergranulares de gran persistencia, y microfisuras intragranulares dentro de la vitrinita.

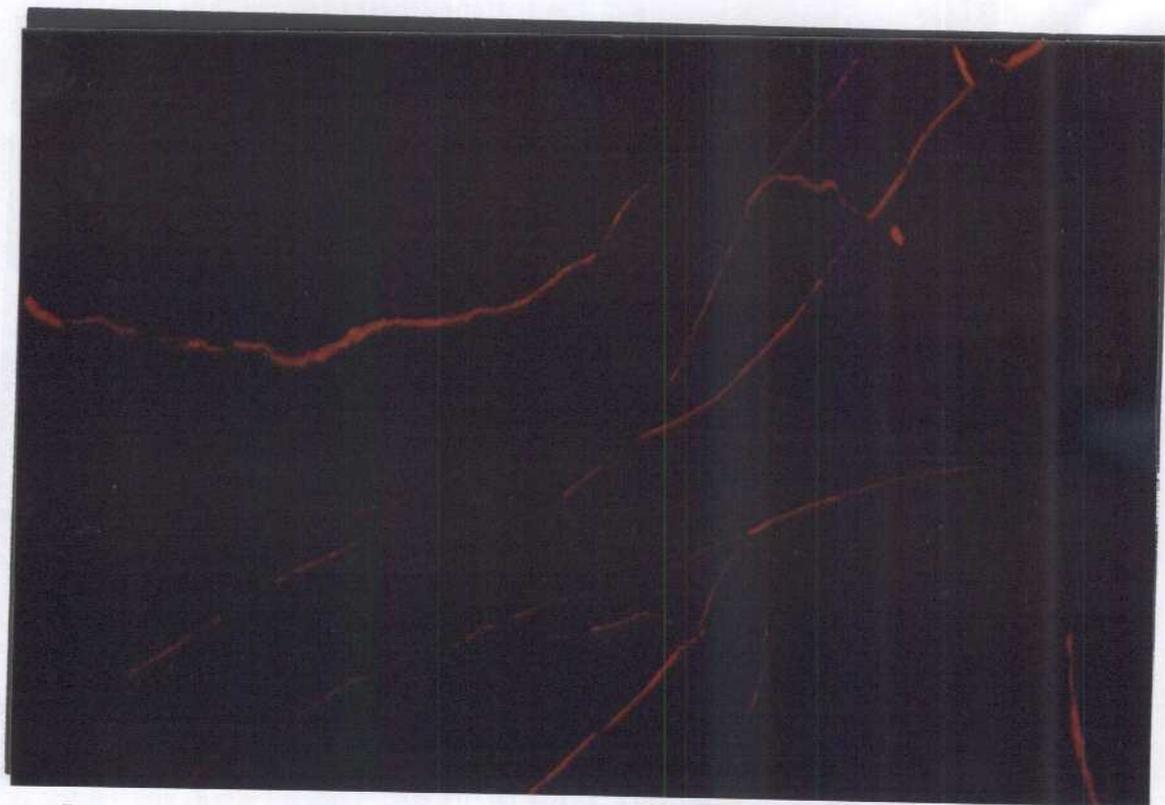
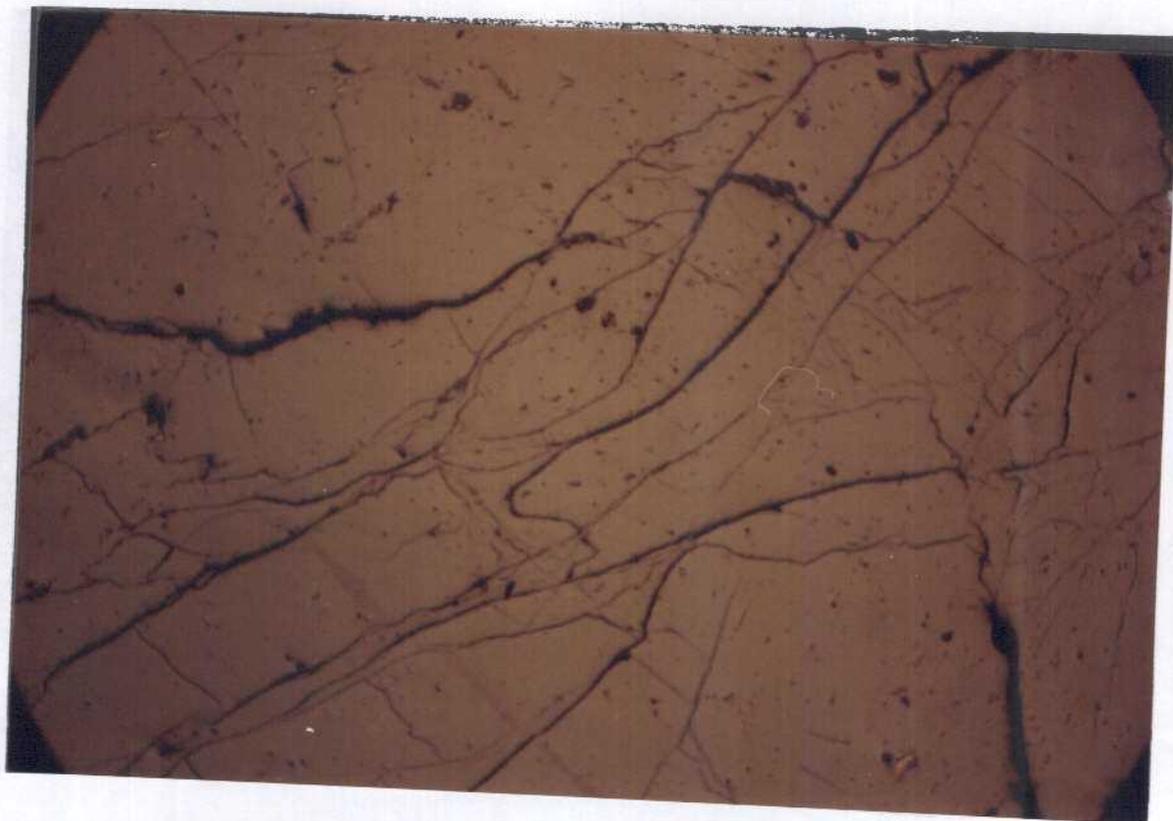


Fig. 5.- Red microfisural del carbón 15W. (M.O.F.) (x50 aumentos). Fisuras repartidas irregularmente con bajo grado de conectividad y con menor anchura que las de 14W. Mayor número de fisuras pero de menor tamaño y pobremente intercomunicadas.

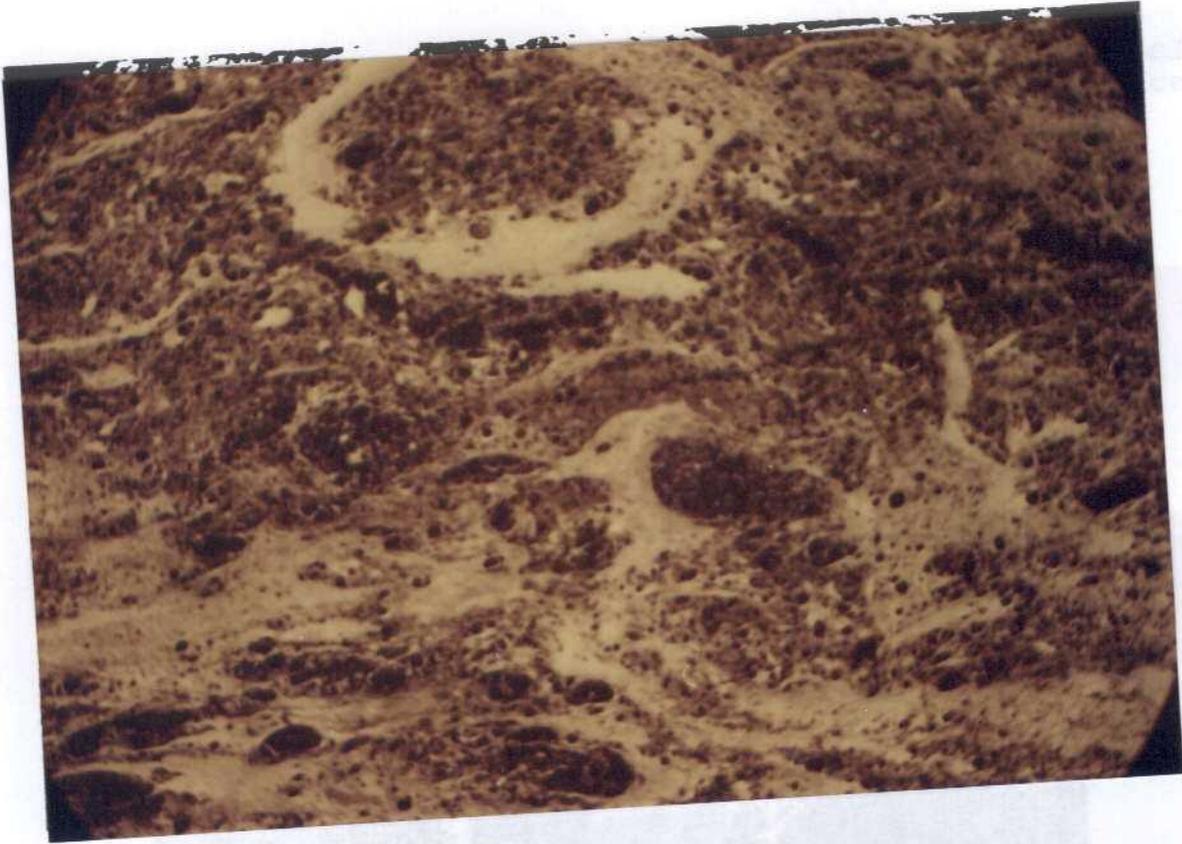


Fig. 6.- Red microfisural del carbón B. (M.O.F.) (x50 aumentos). Sistema de microfisuras muy poco desarrollado, observándose alguna fisura transgranular aislada y de gran recorrido.

La siguiente tabla contiene resultados de ensayos de microdurezas sobre vitrinitas en carbones de diferentes rangos.

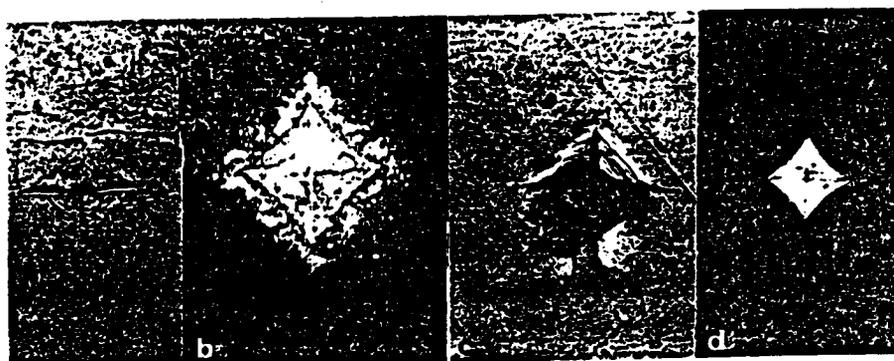


Fig. 7.- Marcas de microdureza Vickers. A) carbón de muy bajo rango. B) carbón de muy bajo rango. La superficie se cubrió de una película de hollín previamente a la medida. C) carbón medio en volátiles, con las esquinas rotas. D) antracita, cubierta con una fina capa de hollín.

Como puede observarse en las microfotografías (Fig. 7) la principal dificultad en la medida de las microdurezas es la determinación precisa de la longitud de las diagonales. Si la vitrinita examinada es de un carbón de muy bajo rango, suele ocurrir que únicamente se aprecia la imprisión de la diagonal E-W. En el caso de carbones de alto rango, la impresión de la marca aparece bajo el microscopio como un rectángulo oscuro y sus esquinas suelen estar rotas debido a la fragilidad de las vitrinitas. Normalmente, en la vitrinita es imposible producir una marca permanente, debido a la elasticidad de la antracita.

La curva de la figura 8 demuestra que la microdureza Vickers presenta un valor mínimo en los carbones con un contenido en carbono entre 88 y 92% (que corresponde a materia volátil entre

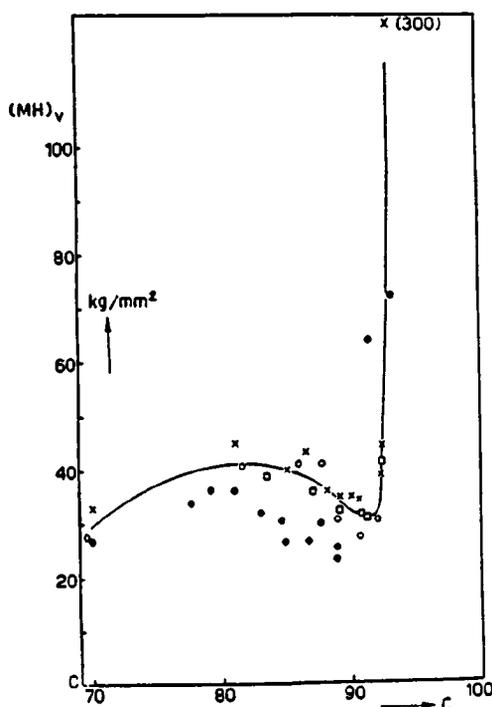


Fig. 8.- Microdureza Vickers frente al contenido en carbono. Según resultados de Krevelen, Honda & Sanada, Alpern y Heinze.

24 y 15 %). En este rango, las marcas están particularmente rotas, y por ello se ha llamado "zona de dureza frágil". Las vitrinitas que contienen menos del 88% de carbono, muestran una dureza más dúctil ("dureza dúctil"), y por encima del 92 % de carbono se observa un incremento de la "dureza elástica" en las vitrinitas.

Las durezas sobre las vitrinitas tienen una cierta importancia práctica, ya que ayudan a explicar el mayor o menor desarrollo del "cleat" de vitrinitas de diferentes capas en diferentes rangos.

El valor medio de la microdureza Vickers (MV) en los carbones estudiados ha sido:

MICRODUREZA VICKERS (Kp/mm²)

14W.....26.30
15W.....27.17

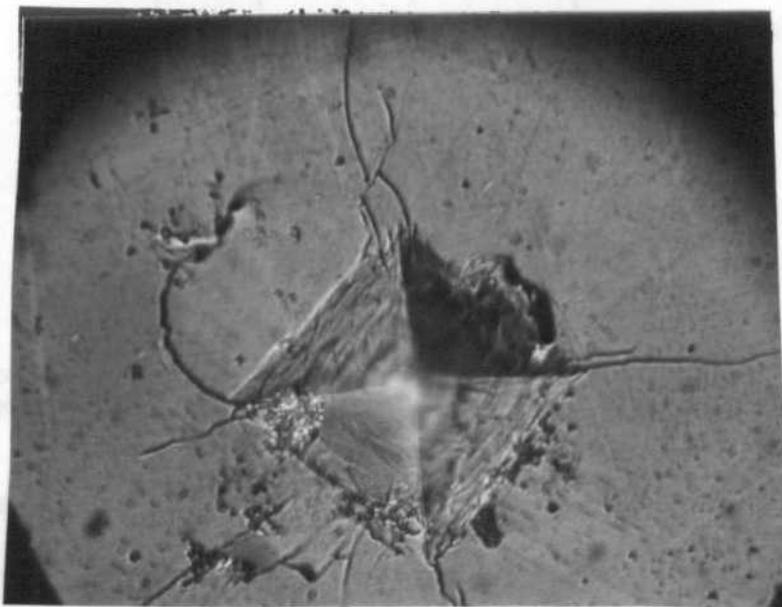
Las medidas de las MV sobre las vitrinitas de los carbones ensayados no han mostrado grandes diferencias. Se observa que generalmente, la MV en el carbón 14W con 26.30 Kp/mm² es ligeramente inferior a los resultados obtenidos en el 15W con una MV de 27.17 Kp/mm²

Quizás lo más significativo sea la geometría y la forma de las marcas. Las huellas en el 15W eran cuadrados perfectos y simétricos (isótropos) de cuyas esquinas se desarrollaban y

propagaban fisuras paralelas a los ejes diagonales del diamante, debido a la fragilidad de la vitrinita.

Las marcas producidas en el carbón 14W suelen presentar, generalmente, un caracter anisótropo, posiblemente debido a la tensión que el carbón ha tenido que sufrir a lo largo de la historia geológica y que permanece "fossilizada" en su textura, reveladas ahora en la geometría de las marcas. Las fisuras que se originan en las esquinas de la huella, no suelen propagarse paralelamente a los ejes diagonales de la marca, como ocurría en el 15W, sino que toman direcciones variables.

A) -



B) -

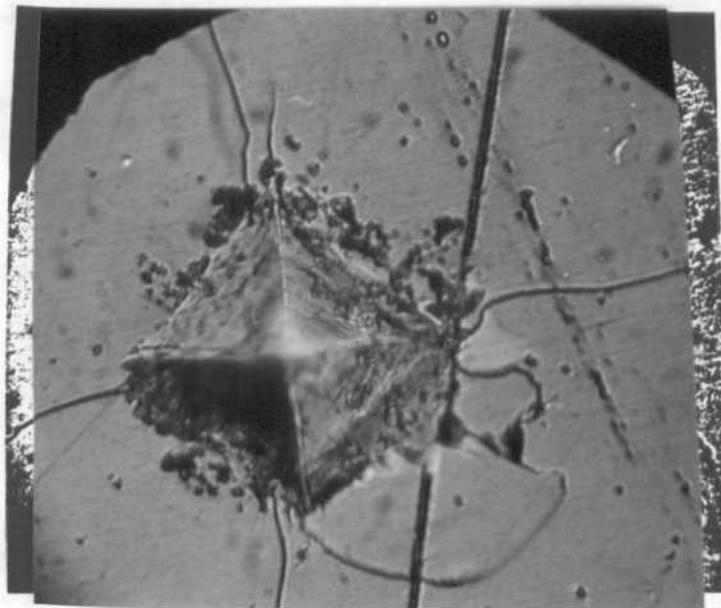


Fig. 9.- Marcas de microdureza Vickers. A)- Carbón 15W. Marca isotrópica. Obsérvense las fisuras que nacen en las esquinas y se propagan paralelamente a los ejes de la marca. B)- Carbón 14W. Marca influenciada por una fisura.

3.- PROPIEDADES FISICAS ELEMENTALES.

El conocimiento de las características físicas de los carbones, así como su interpretación petrográfica, resulta de gran ayuda para un correcto conocimiento de su estado geomecánico actual, así como para la evaluación de su comportamiento futuro.

Es decir, la medición de ciertas propiedades físicas junto con ciertos ensayos geomecánicos, proporcionan criterios válidos para:

- Calibrar el estado tensional actual de los carbones (microfisuración, gas, tensiones).
- Valorar la degradación potencial o comportamiento futuro de los mismos frente al gas y variaciones tensionales.
- Interpretar los posibles mecanismos de inestabilidad que los pueden afectar.

Las propiedades físicas elementales determinadas con tal fin han sido:

- 1- Densidad de la roca seca (ρ_d).
- 2- Densidad de los granos minerales (ρ_g).
- 3- Porosidad abierta (n_o).
- 4- Porosidad total (n).
- 5- Grado de relleno de los poros (S_r).
- 6- Índice de saturación de agua (W_s).
- 7- Absorción de agua. A)- Contenido en agua (W_i).
B)- Grado de saturación (S_i).
- 8- Succión capilar. C)- Coeficiente de capilaridad (C).
D)- Coef. de penetración capilar (A).

Para el cálculo de las propiedades 1, 3 y 6 se ha utilizado el método de la balanza hidrostática, mientras que para la 2 el método picnométrico. De estos resultados se han obtenido los valores de las propiedades 4 y 5, por medio de fórmulas que más adelante se expondrán.

3.1 - PROPIEDADES FISICAS RELACIONADAS CON LA NATURALEZA DE LOS LITOTIPOS.

3.1.1 - Densidad de la roca seca (ρ_d) :

Masa de roca seca (M_o) por unidad de volumen total de roca en bloque (V), incluyendo los espacios vacíos existentes en dicho volumen (volumen aparente). También se conoce como "densidad aparente".

$$\rho_d = M_o / V \text{ (Kg/m}^3\text{)}.$$

3.1.2 - Densidad de los granos minerales (ρ_g):

Masa de roca seca (M_o) por unidad de volumen de su parte sólida (V) sin considerar los espacios vacíos (volumen real).

$$\rho_g = M_o / V \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

Su determinación se realiza de forma experimental por el método picnométrico sugerido por Belikov et al., (1967).

Los principales pasos experimentales efectuados para la determinación del peso específico de los granos minerales por el método picnométrico son :

- Trituración previa de las muestras hasta que el diámetro medio de las partículas sea inferior a 0,22 mm.
- Eliminación de la humedad de las rocas en el horno a 60° C durante 48 horas.
- Eliminación del aire de la muestra por evaporación al vacío de 10^{-3} torr y reposo en los picnómetros hasta la total precipitación de la muestra.

En la Tabla III se presentan los valores obtenidos para la densidad de los granos minerales de los carbones estudiados. Como puede observarse, los valores obtenidos están comprendidos entre 1300 y 1800 Kg/m³ como ya indicaron otros autores.

El carbón "B" presenta un valor de ρ_g muy superior al resto de los carbones (1795 Kg/m³) debido a su mayor contenido en material detrítico (arcilloso).

3.2 - PROPIEDADES FISICAS RELACIONADAS CON LA CIRCULACION DE FLUIDOS.

Generalmente, el agente más importante de degradación de los materiales pétreos es el agua, ya que permite que otros agentes agresivos disueltos en ella accedan al interior de la roca, favoreciendo los procesos de deterioro, tanto físico como químico. Teniendo en cuenta que el fin último es conocer el comportamiento de los carbones respecto al gas, tensiones y estabilidad de los mismos, se ha prestado un especial interés a aquellas propiedades físicas que están relacionadas con la circulación de fluidos (agua/gas) en los carbones.

Así, la porosidad es una de las propiedades de mayor significación en la interpretación del comportamiento del gas en los materiales geológicos, ya que está íntimamente relacionada con el movimiento de los fluidos por el seno de dichos materiales.

Es generalmente aceptado que, entre los diversos componentes de las rocas, los espacios vacíos ejercen una influencia decisiva sobre determinados comportamientos físicos del material rocoso.

Dentro del estudio de los espacios vacíos o huecos, tienen particular interés su cuantificación, así como el conocimiento de la estructura tridimensional del sistema poroso comunicado. Dichos huecos comunicados tienen una gran influencia en propiedades tan significativas como la permeabilidad, capacidad de absorción y retención de fluidos, resistencia a la compresión y a la tracción, durabilidad, etc. Por ello una precisa caracterización de la porosidad y la distribución de tamaños de

poro es esencial en la explotación del carbón.

Los poros pueden considerarse como ensanchamientos o alargamientos locales del sistema poroso, o bien como "aberturas" más o menos individualizadas dentro de una roca o sedimento. Dichos poros se hallan conectados entre sí mediante conductos o canales por lo general de muy pequeño diámetro (capilares).

Los poros constituyen, en volumen, la mayor parte de la porosidad de una roca, y almacenan la mayor parte de los fluidos retenidos por la roca, mientras que los conductos entre poros ejercen un control decisivo sobre la permeabilidad.

Existen dos tipos de porosidad: - **Porosidad abierta o accesible.**
- **Porosidad incomunicada.**

La porosidad abierta está relacionada con poros y conductos porosos, así como fisuras principalmente intergranulares y transgranulares que permiten el acceso de los fluidos a la roca. Es el tipo de porosidad que presenta una mayor influencia sobre el escape del gas (D.I) ya que es la que ofrece la posibilidad de circulación de los fluidos (gas/agua) por el seno de los materiales.

La porosidad incomunicada está relacionada esencialmente con poros aislados y fisuras intragranulares aisladas de pequeño tamaño y pueden actuar como depósitos de gas libre.

La suma de ambos tipos de porosidad es lo que constituye la porosidad total de la roca.

La porosidad varía con una serie de factores granulométricos, entre los que destacan el tamaño, forma y distribución de los granos. También, en el caso del carbón, tienen importancia factores deposicionales y postdeposicionales (grado de compactación, presencia de minerales, etc).

Para la caracterización del sistema poroso se pueden utilizar diferentes técnicas, suministrando cada una de ellas un tipo de información que se complementa y permite conocer y analizar el sistema poroso:

- Observación directa del medio poroso: Efectuada a distintas escalas y sobre muestras preparadas de diferentes maneras (observaciones realizadas a simple vista, lente binocular, mediante microscopía de polarización, microscopía de fluorescencia, microscopía electrónica de barrido, etc.).

- Determinación por medios indirectos del porcentaje volumétrico de espacios vacíos (p.ej. mediante el método de la balanza hidrostática).

- Mediante el estudio de otras propiedades físicas relacionadas con la porosidad, siguiendo métodos de saturación, absorción de agua, higroscopía, succión capilar, secado, etc.

- Cuantificación del rango de tamaños de poro del material mediante porosimetría por inyección de mercurio.

En este trabajo la porosidad se ha estudiado, por su rapidez y comodidad, mediante métodos indirectos, aunque también se han realizado observaciones cualitativas de los espacios vacíos por vía microscópica, para una mejor caracterización de los mismos.

Se han considerado las siguientes propiedades, de acuerdo con la nomenclatura propuesta por la ISRM:

3.2.1 - Porosidad abierta (n_o):

Se puede definir como el volumen de espacios abiertos o comunicados (V_v) por unidad de volumen total de roca (V), expresado en %. También se conoce como porosidad efectiva.

$$n_o = (V_v / V) \times 100 \quad (\%).$$

3.2.2 - Índice de saturación de agua (W_s):

Este índice se refiere al contenido en agua que acepta la roca por saturación, y se define como el cociente entre el peso del agua contenido en la roca y el peso de la roca seca. Se expresa en porcentaje, mediante la fórmula:

$$W_s = (P_s - P/P) \times 100.$$

siendo P_s el peso de la muestra saturada con agua y P el peso de la muestra seca.

La relación existente entre el contenido en agua de saturación (W_s) y la porosidad accesible al agua (n_o) es:

$$W_s \times \rho_d = n_o \times \rho_{\text{agua}}$$

donde ρ_d es la densidad aparente de la roca seca y ρ_{agua} es la densidad del agua.

Esta propiedad nos muestra la cantidad de agua que el carbón es capaz de aceptar, aspecto que puede ser de gran interés en los carbones sometidos a inyecciones en capa, tan habituales en nuestras minas.

Entre los procedimientos experimentales utilizados en la determinación de estas propiedades cabe destacar el método de la **balanza hidrostática**, propuesto por Belikov et al., (1967). Dicho método permite calcular varias propiedades cuando se realiza sobre muestras previamente saturadas en agua mediante vacío:

- Densidad de la roca seca $\rho_d = (A/(B-C)) \times \rho_{\text{agua}}$
- Porosidad abierta $n_o = (B-A)/(B-C) \times 100$.
- Contenido en agua de saturación $W_s = (B-A)/A \times 100$.

siendo A la masa de la roca seca, B la masa de la roca saturada y C la masa de la roca sumergida.

Cabe señalar que la saturación de las muestras se ha realizado al vacío (10^{-3} torr) de acuerdo con el siguiente procedimiento experimental:

- Se determina previamente el peso de la muestra seca. Para ello, las muestras estuvieron sometidas a un secado en el horno a 60° C durante 48 horas.
- Se produce vacío sobre la roca seca durante 6 horas.
- Sin romper el vacío, se introduce lentamente agua hasta cubrir totalmente las muestras.
- Se mantiene la absorción de agua bajo vacío durante 12 horas.
- La absorción de agua continúa, ya sin vacío, durante otras 12 horas.
- Por último se determina el peso saturado al cabo de este tiempo, limpiando el exceso de agua en superficie con un paño húmedo.

En la Tabla III se expresan los resultados obtenidos, en forma de valor medio de las muestras ensayadas.

3.2.3 - Porosidad total (n):

En el volumen de espacios vacíos (V_v) por unidad de volumen total de roca (V), expresado en %

$$n = (V_v / V) \times 100 \quad (\%)$$

La porosidad total ha sido calculada a partir de la relación entre la densidad aparente de la roca seca (ρ_d) y el peso específico de los granos minerales (ρ_g), a partir de la fórmula:

$$n = (\rho_g - \rho_d / \rho_g) \times 100.$$

3.2.4 - Grado de relleno de los poros (Sr):

Es la relación entre el volumen de espacios abiertos o accesibles (V) y el volumen total de espacios vacíos (V_v), expresado en %

$$Sr = (V / V_v) \times 100 \quad (\%)$$

Su valor se obtiene del cociente entre ambas porosidades; es, por tanto, una medida de la porosidad abierta respecto a la total.

$$Sr = (n_o / n) \times 100 \quad (\%).$$

Con el fin de facilitar la comparación de las propiedades físicas de los carbones estudiados, se incluye un cuadro resumen de los valores obtenidos (Tabla III).

De los resultados podemos deducir que la capa 15W presenta mayor porosidad que el resto de los carbones, y a su vez es menor el grado de relleno de los poros, lo que indica que es el carbón que más gas puede contener en su interior y muestra mayor dificultad para liberarlo por poseer mayor porosidad atrapada. También deducimos que es el carbón que más agua acepta por saturación, por su mayor porosidad abierta, seguido muy de cerca por el 14W.

TABLA III.- Propiedades físicas elementales.

	Densidad de la roca seca. ρ^d (Kg/m ³)	Densidad de los granos minerales. ρ^s (Kg/m ³)	Porosidad Abierta. n_o (%)	Porosidad total. n (%)	Indice de Saturación de agua. W_s (%)	Grado de relleno de los poros. S_r (%)
14W	1.360	1.483	5.8	9.1	4.2	63.7
15W	1.284	1.472	6.5	14.6	5.1	44.5
W	1.358	1.457	3.4	7.2	2.5	47.2
B	1.700	1.795	3.1	5.5	1.8	56.3

3.2.5 - Absorción de agua.

La sorción de agua (sortividad) de un material abarca aspectos de absorción (entrada de líquido) y desorción (salida de líquido). Ambos son parámetros hidricos relevantes a la hora de calibrar el potencial de alterabilidad frente a la acción disgregadora del agua.

Las características petrográficas y la configuración del sistema poroso de las rocas (volumen de poros existentes y grado de conectividad entre ellos) condicionan el tiempo de absorción de agua cuando éstas son sumergidas en condiciones normales de presión y temperatura.

El estudio de esta propiedad puede mostrarnos el comportamiento de una capa de carbón que ha sido sometida a un proceso de inyección, la capacidad de absorber agua del carbón y su respuesta frente a la acción disgregadora de la misma. También de forma comparativa e indirectamente, nos puede mostrar el comportamiento del carbón frente al gas que pueda contener o absorber.

Se realizó el ensayo de absorción libre de agua por inmersión total estudiándose la evolución del contenido en agua de los carbones en el tiempo. Teniendo en cuenta la teoría sobre el comportamiento del flujo de agua a partir de una superficie saturada (Kalimeris y Hall, 1983), y que la absorción de agua depende de la raíz cuadrada del tiempo, se han construido las "curvas de absorción libre de agua", representando el "contenido en agua" respecto al tiempo (Fig.10).

El parámetro fundamental obtenido del ensayo de absorción de agua es el llamado "contenido en agua" o "contenido en humedad". El contenido en agua (W_i) se define como la masa de agua absorbida por una roca, a partir de su estado seco, por unidad de masa de roca seca, expresándose en %

$$W_i(t) = (M_i(t) - M_o) / M_o \times 100$$

donde M_o es la masa de la roca seca y $M_i(t)$ es la masa para un

cierto estado húmedo, en las condiciones de ensayo "i", que pueden depender del tiempo "t".

Otro parámetro que puede ser calculado es el "grado de saturación" (S_i), que es el contenido relativo en agua respecto al contenido máximo de agua que pueda absorber la roca (W_s).

$$S_i(t) = W_i(t) / W_s \times 100$$

Por lo tanto, toma valores de 0 a 100 y nos indica el porcentaje de espacios vacíos llenos de agua a lo largo del ensayo.

En la Fig.10 se presentan las curvas de absorción libre de agua (contenido en agua en función del tiempo) de los carbones ensayados, habiéndose representado la curva media dentro de cada variedad. En las Figs. 11 y 12 se representa el grado de saturación en función del tiempo.

Las curvas obtenidas, generalmente, presentan rasgos comunes :

- Tramo inicial recto con fuerte pendiente.
- Tramo medio de cambio gradual de pendiente (sólo en algunos).
- Tramo final de tendencia lineal y escasa pendiente.

Por tanto, se pueden diferenciar distintas etapas en el proceso de absorción de agua por parte de los carbones estudiados:

- Una "absorción rápida inicial" a ritmo constante frente al tiempo. Su duración suele corresponder al primer minuto y al cabo de ese tiempo y de forma gradual, disminuye la velocidad de absorción de agua.

- Una "absorción lenta final" y prácticamente constante frente al tiempo.

De la forma de las curvas se puede apreciar que la absorción de agua (los contenidos en agua que presentan los carbones y la velocidad con que se alcanzan) está íntimamente ligada con sus características petrográficas y sobre todo, de las características del sistema poroso (morfología, tamaño y proporción de espacios vacíos). De ahí, por ejemplo, la gran diferencia existente entre las curvas de absorción de agua de el carbón 15W (que muestra la mayor porosidad abierta) y el carbón B (la de menor porosidad abierta).

Se puede apreciar un comportamiento diferente entre el carbón 14W y 15W que refleja las diferentes características de sus sistemas porosos. Tras una primera etapa similar en ambos de absorción rápida y a ritmo constante, a partir de un punto de contenido en humedad ($W_i=4.2$), la absorción de agua en el 14W se estabiliza ya que su porosidad abierta es saturada; mientras que la absorción en el 15W aún continúa con un cambio gradual a ritmo más lento, debido a que posee mayor porosidad abierta y total.

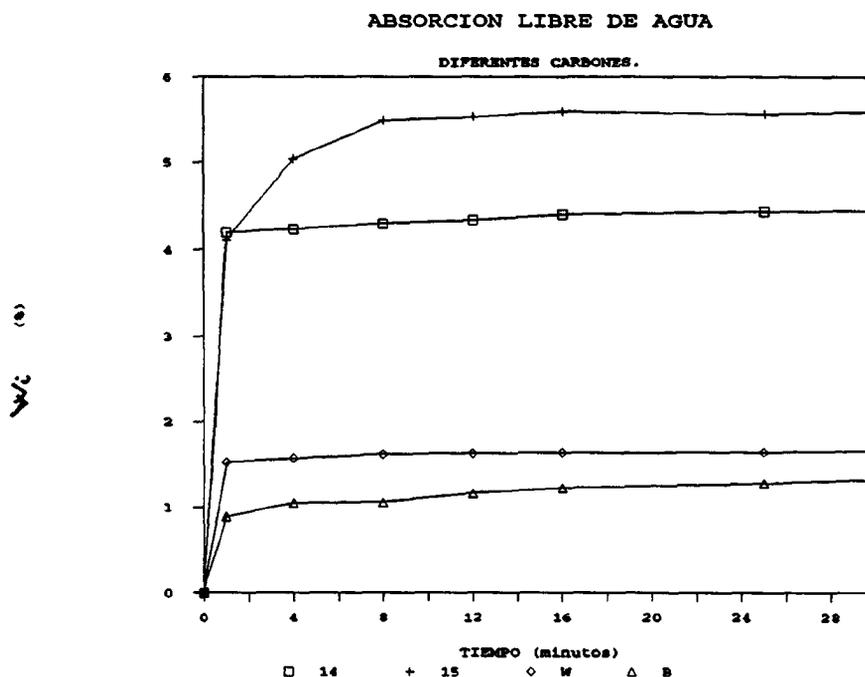


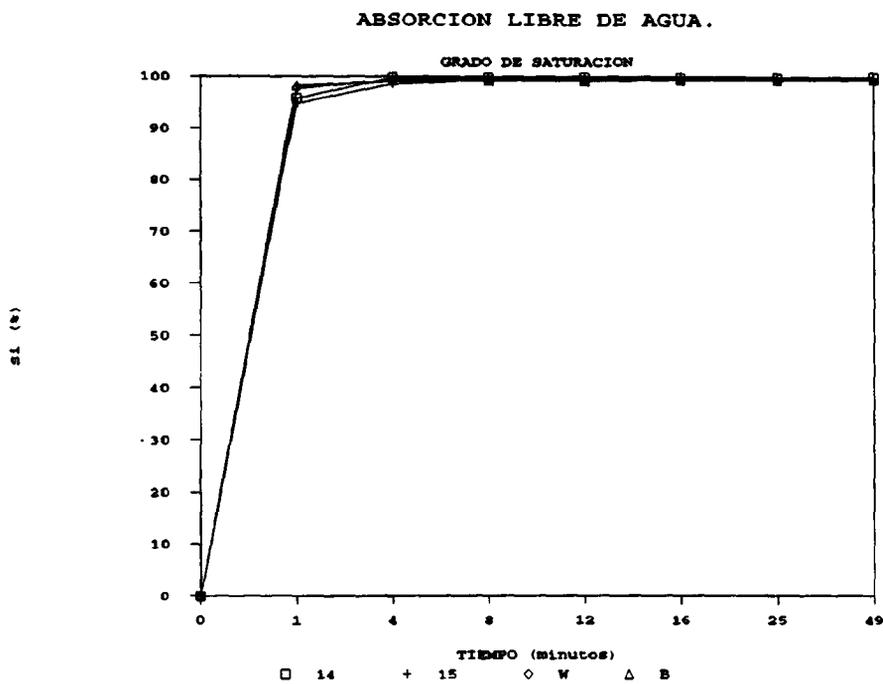
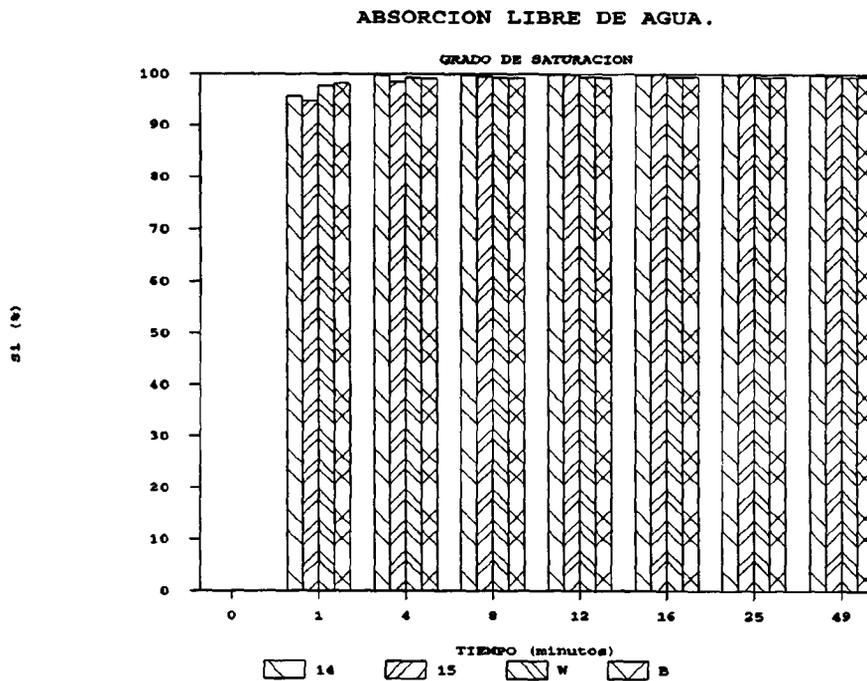
Fig. 10.- Curvas de absorción libre de agua por inmersión total. La forma de las curvas reflejan que la absorción de agua está íntimamente ligada con las características del sistema poroso (morfología, tamaño y proporción).

3.2.6 - Succión capilar:

Es un hecho bien conocido la capacidad que tienen los materiales porosos de succionar agua por encima del nivel que presenta la superficie líquida contenida en ellos.

Este fenómeno es debido al carácter hidrófilo que poseen los materiales rocosos, así como a la configuración de su sistema poroso (Torraca, 1982). En presencia de poros capilares, la presión de capilaridad es inversamente proporcional al tamaño de los capilares, de modo que será tanto mayor cuanto menor sea el diámetro de los conductos entre los poros.

La altura alcanzada por el agua en su movimiento ascendente dependerá, pues, en primera instancia, y para unas condiciones ambientales determinadas, más que de la cantidad de poros (porosidad volumétrica), del rango de distribución de los tamaños de los poros y, en especial, de los de menor radio de entrada.



Figs. 11 y 12.- Absorción libre de agua por inmersión total: Grado de saturación (Si) en función del tiempo (minutos). Puede observarse que todos ellos obtienen una saturación de más del 90% antes del primer minuto.

Así pues, las piedras con mayor proporción en microporos serán las que, en general, exhibirán mayores coeficientes de capilaridad (C).

Hay que tener en cuenta que la ascensión capilar también depende de otros factores, como las características del sólido (mineralogía), del líquido (pureza del agua) y de las condiciones ambientales.

Vos (1976), Mamillan (1981) y Kalimaris y Hall (1983), entre otros, presentan estudios sobre la cinética de los fenómenos capilares en los que se demuestra su dependencia lineal con la raíz cuadrada del tiempo.

Por lo tanto, considerando un volumen de roca (V) que absorbe una cantidad de agua (ΔM) por capilaridad a través de una superficie (S), durante un tiempo (t) y que asciende una altura (H), se pueden calcular los siguientes parámetros:

"Coeficiente de absorción capilar" o "coeficiente de capilaridad" (C), que es la cantidad de agua (en peso) tomada (ΔM) por unidad de superficie (S) de flujo.

$$\Delta M(t) / S = C t^{1/2} \quad (\text{kg/m}^2) \times t^{1/2}.$$

"Distancia penetrada" o "avance del frente húmedo", (H).

$$H(t) = A.t^{1/2}.$$

siendo "A" el coeficiente de penetración capilar expresado en ($\text{m/t}^{1/2}$).

Conociendo la porosidad abierta de la roca, n_o , y la densidad del agua, existe una expresión que relaciona los tres parámetros citados:

$$\Delta M/S = 10.n_o.H \quad (1), \quad \text{de donde:}$$

$$C = 10.n_o.A \quad (2)$$

El procedimiento empleado en los ensayos de succión capilar ha sido el siguiente : Una vez secadas las muestras a ensayar en estufa a 60^0 C durante 48 horas y pesadas (M_o), se colocan sobre un papel de filtro empapado continuamente en agua y se controla el peso a intervalos regulares frente a la raíz cuadrada del tiempo. El ensayo se realizó en condiciones normales de laboratorio (h.r :75%, T: 20^0 C).

A partir de estos valores se determinó $\Delta M(t)/S$ siendo:

$$\Delta M(t) = M_c / M_o.$$

donde M_c es el peso de la muestra en el tiempo (t).

En la Fig. 13 se representan los valores correspondientes al incremento en peso por unidad de superficie que experimentan los

carbones ensayados (expresado en gr/cm^2) en función de la raíz cuadrada del tiempo (en segundos).

En todas ellas puede corroborarse el comportamiento prácticamente lineal en el tramo inicial. La pendiente en dichos tramos lineales corresponde al coeficiente "C" de absorción capilar. De esta forma fue calculado "C" mediante la expresión :

$$C = (\Delta M/S.t^{1/2}) \cdot 100.$$

Conocido el coeficiente "C", se calculó el coeficiente de penetración, "A", a partir de la expresión (2).

En la Tabla IV se relacionan los valores de los dos coeficientes calculados para los diferentes carbones estudiados.

Algunos materiales rocosos, durante la absorción de agua, desarrollan tensiones en su seno que se traducen en una expansión volumétrica, cuando lo permite su estado de confinamiento. Esta propiedad es conocida también como expansión hídrica.

La alternancia de estados húmedos y secos en las rocas hacen que dichas tensiones se repitan periódicamente, pudiendo llegar a producirse un aumento de fisuración en los materiales. Una vez

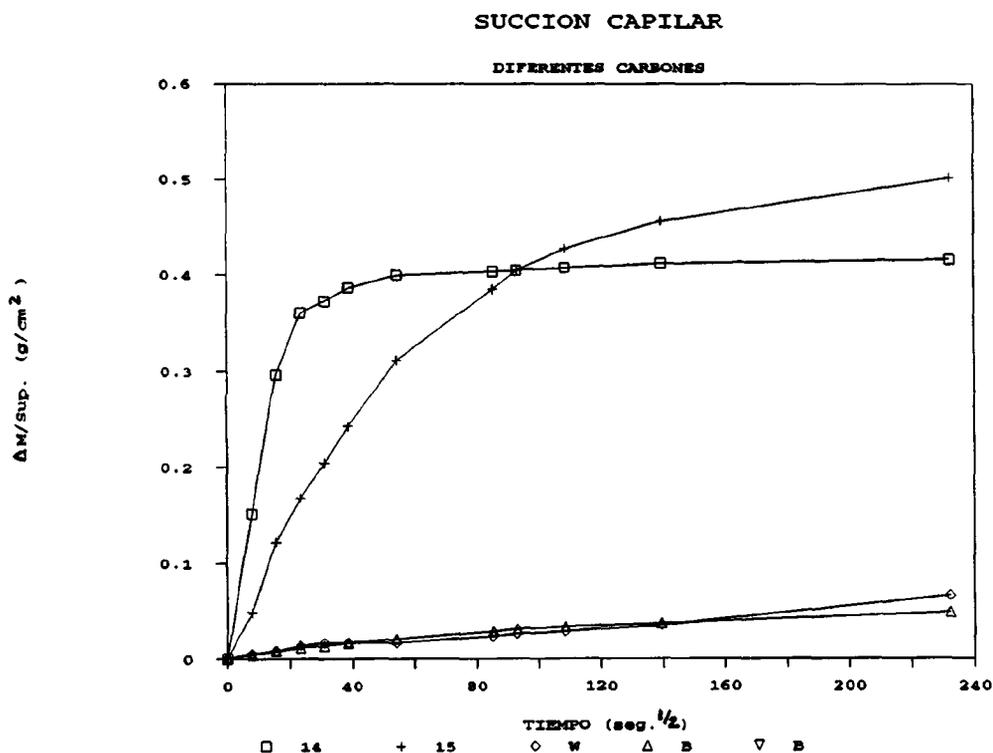


Fig. 13.- Absorción capilar: Incremento de peso por unidad de superficie en función del tiempo.

TABLA. IV

	Coeficiente de Absorción Capilar. C (gr/cm ² .t ^{1/2}) . 10 ³	Coeficiente de Penetración. A (cm.t ^{1/2}) . 10 ³
14W	23	0.390
15W	8	0.120
W	0.8	0.023
B	0.8	0.025

comenzado el proceso, el desarrollo de grandes fisuras suele ser ya muy rápido. Este hecho ha sido constatado a lo largo de los experimentos, durante los cuales todas las muestras presentaban un desmoronamiento o disgregación de partículas a lo largo de los ciclos de sequedad/humedad; esta disgregación era más acusada en las que la fisuración era más evidente (capa 14W). La pérdida en peso en algunas de las muestras, por el proceso mencionado, fue muy acusada.

Tanto la porosidad como el índice de saturación de agua (W_s) son un reflejo de la cantidad de vacíos o huecos existentes en la roca. Representando los valores de la porosidad abierta respecto al índice de saturación, se obtienen puntos perfectamente alineados (Fig.14), pero si se sustituyen los valores de la porosidad abierta por los de la porosidad total, en dicha figura, se pierde el carácter lineal entre ambas magnitudes, ya que se hace intervenir el volumen de poros no comunicados, que no intervienen en el valor de W_s . Los puntos representativos de los distintos carbones se apartan más o menos de la recta, dependiendo del grado de relleno de los poros (S_r).

Este ensayo también nos muestra el diferente comportamiento de los carbones 14W y 15W, y un comportamiento muy similar de los carbones "B" y "W". De este hecho se deduce que el sistema poroso del "14W" es muy diferente al del "15W". En el "14W" predominan las fisuras, conductos o canales (capilares) intercomunicados que favorecen la absorción capilar y la penetración por succión ($C=23$), mientras que en el carbón "15W" predomina un sistema poroso de poros aislados, o ensanchamientos difícilmente comunicados, capaz de retener mayor cantidad de agua, porque tiene mayor porosidad, pero necesita mucho más tiempo para absorber; de ahí, su menor coeficiente de capilaridad y de penetración ($C=8$).

El comportamiento de los carbones respecto al proceso de "absorción" es muy similar al proceso inverso, la desorción: la capa 14W, por las características de su sistema poroso (morfología, tamaño, proporción) es más favorable a una desorción rápida y total, mientras que el carbón 15W, capaz de contener más gas porque tiene mayor porosidad, presenta más dificultades al escape del gas, que sería más lento y necesitaría mucho más tiempo para una desorción total.

Al representar los valores de porosidad total frente al índice de saturación (Fig. 14) se observa que no existe una clara correlación lineal entre ambas magnitudes, ya que se hace intervenir el volumen de poros no comunicados, que no afectan al valor de W_s ; los puntos representativos de los diferentes carbones se apartan más o menos de la recta anterior dependiendo del grado de relleno de los poros.

Así pues, los carbones con un alto grado de relleno de los poros (S_r) (B, W, 14W) son los más próximos a la recta, mientras que los que presentan grados de relleno bajos se alejan de ella, caso del 15W.

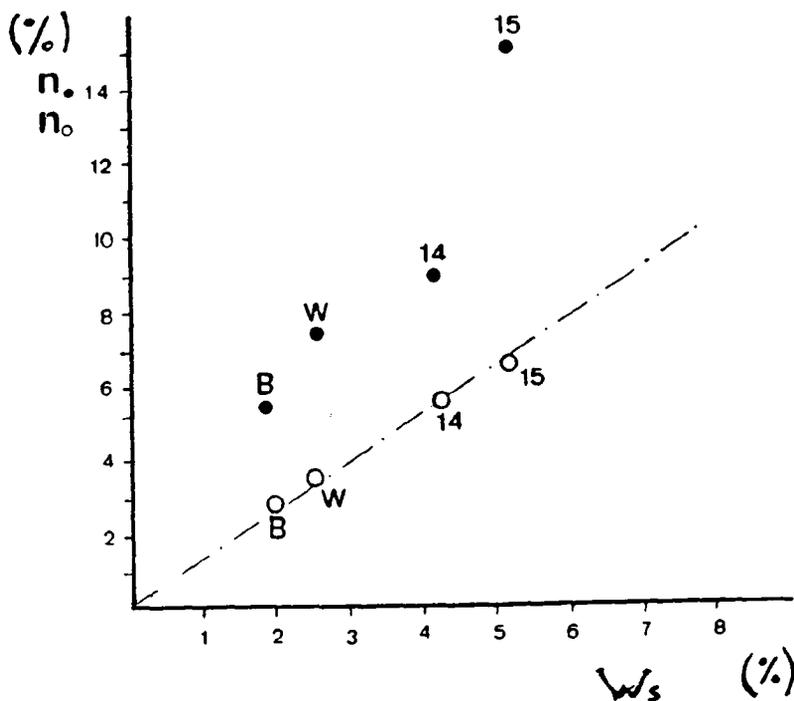


Fig. 14.- Relación de las porosidades (n, n_0) e índice de saturación (W_s) de los diferentes carbones. Los carbones con alto grado de relleno de poros (S_r) son los más próximos a la recta (14W, B, W). El carbón 15W, con un grado de relleno de los poros más bajo, se aleja más de la recta.

4. - PROPIEDADES DINAMICAS. VELOCIDAD DE PROPAGACION DE ONDAS ELASTICAS.

Uno de los ensayos no destructivos más significativos para el análisis, desde el punto de vista petrofísico, de materiales rocosos, es el estudio de las velocidades de propagación de ondas elásticas, tanto longitudinales (V_l), como transversales (V_t), ya que ambas están en función, no sólo de las características mineralógicas y texturales del medio, sino también del grado de alteración, física y/o química del mismo, de su contenido en fluidos (gas, agua), etc.

Es por ello que, con el fin de ampliar información sobre el grado de fisuración y porosidad de los carbones seleccionados y de su capacidad para retener y absorber fluidos, se han determinado las velocidades de propagación de ondas en dichos carbones. Por otra parte, estos valores permitirá calcular las constantes elásticas dinámicas de los materiales estudiados y su comparación con las estáticas.

En este trabajo, por motivos de tiempo y de instrumentación, únicamente se han podido obtener los valores de velocidad de propagación de las ondas longitudinales (V_l).

Las medidas fueron realizadas sobre probetas de forma cúbica (7x7x7 cm para el carbón 15W, y 5x5x5 cm en el 14W) (Fig.15), con ciertas irregularidades en el tamaño y forma, debido a la dificultad que presentaban los bloques recogidos para obtener buenas probetas. Pensamos, por ello, que los resultados, de alguna manera están condicionados por este factor.

A partir de una fractura natural, se han obtenido, en el caso del carbón 15W, cubos (7x7x7 cm) en los cuales puede apreciarse una dirección de fracturación predominante y bien desarrollada. Las medidas fueron realizadas perpendicularmente y paralelamente a la fracturación. Se realizó en mismo proceder para el carbón 14W.

Las medidas en los carbones B y W se realizaron sobre testigos de sondeos de 6 cm de diámetro extraídos perpendicularmente a la estratificación.

El equipo utilizado fue un equipo OYO MODEL-5217A que consta de dos parejas de transductores (una para las ondas transversales y otra para las longitudinales con una frecuencia nominal de 200 kHz para las ondas longitudinales, y 100 kHz para las ondas transversales). El voltaje generador del pulso fue de 200 V, habiéndose utilizado vaselina como interfase entre las probetas y los transductores (Fig.16). Los ensayos fueron realizados en condiciones de temperatura y humedad ambientales.

Los resultados promedios obtenidos de las velocidades de propagación de las ondas longitudinales (V_l) pueden verse en la Tabla V.

De estos resultados se puede deducir, como ya han señalado otros autores, que los espacios vacíos de las rocas hacen disminuir

TABLA V

	Ondas Longitudinales (V_L)	
	Fisuras.	⊥ Fisuras.
14W	800 m/s	500 m/s
15W	1.400 m/s	1.000 m/s
B	1.850 m/s	
W	1.700 m/s	

la velocidad, y esta disminución es mucho más acusada cuando los huecos son fisuras y fracturas. Dos rocas con idéntica porosidad, pero una de tipo de "poro" y otra de tipo "fisura", será ésta última la que presente menores valores de V_L .

Por lo tanto, aunque el 15W posee más porosidad que el 14W, es el 15W quien presenta una mayor velocidad, lo que significa que el 14W es un carbón con una fracturación y fisuración mucho más acusada (únicamente en cuanto a la anchura de las fisuras), como ya pudimos comprobar en el ensayo de succión capilar y estudio microscópico.

De todas formas, los valores obtenidos son inferiores a los valores que los autores conceden para los carbones, los cuales oscilan entre 2.200-2.700 m/s.

- **Constantes de elasticidad dinámicas: Módulo de Young y relación de Poisson.**

Las constantes elásticas de los materiales tradicionalmente se calculan por métodos estáticos, lo cual implica generalmente la destrucción de la muestra, al ser sometida a esfuerzos, o al menos, la variación de sus características petrofísicas por la creación mecánica de fisuras, y en el caso de los carbones la obtención y preparación de muestras resulta muy difícil y complicada. Sin embargo, los métodos dinámicos permiten calcular estas constantes sin necesidad de modificar las muestras, es decir, se trata de un ensayo no destructivo (NDT).

No obstante es bien sabido que las constantes determinadas de una u otra forma no coinciden, ya que los resultados son generalmente mayores cuando se determinan por métodos dinámicos.

En base a las fórmulas propuestas por la A.S.T.M (D. 2.845) en 1976, se puede calcular el módulo dinámico de Young (E_{din}) y la relación de Poisson dinámica (V_{din}) de los carbones estudiados, a partir de la velocidad de propagación de ondas.



6

Fig. 15.- Probetas cúbicas (7x7x7 cm) (15W) utilizadas para obtener V_L . Obsérvense las fracturas verticales.

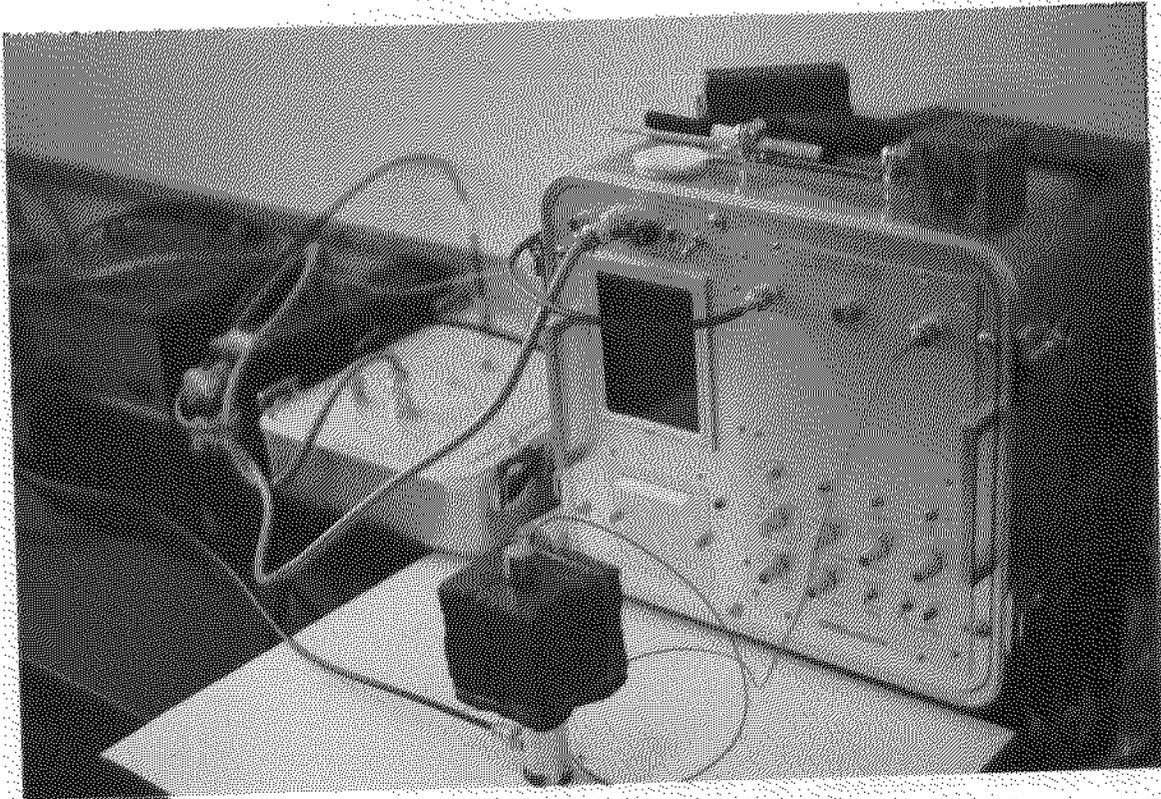


Fig. 16.- Equipo utilizado para calcular la velocidad de propagación de ondas en los carbonos estudiados.

4.1 - Variación de la velocidad.

La aplicación de las técnicas dinámicas actuales a los carbones, puede aportar mucha información valiosa sobre las características de los mismos.

Existe una serie de propiedades que hacen variar la velocidad de propagación de ondas, y que están en función de ciertos parámetros físicos:

- La velocidad aumenta con el incremento de la **presión de confinamiento** y la **presión diferencial**. La presión diferencial o presión efectiva, es la diferencia entre la presión de confinamiento y la presión de poro. Los contactos entre granos y las fisuras juegan un papel fundamental en este incremento; así, en rocas libres de fisuras, la velocidad es virtualmente independiente de la presión. La presencia de fisuras y contactos de grano causa una atenuación sustancial.

- La velocidad depende ligeramente del **grado de saturación** de la roca. Sólomente existe un aumento significativo de rocas secas a rocas 100% saturadas.

- La **viscosidad** del fluido de saturación es un parámetro que influye fuertemente en la velocidad. La velocidad aumenta con la viscosidad.

- La influencia de la **temperatura** es bastante insignificante. Un incremento de 100 °C causa una muy pequeña disminución de la velocidad, mientras no se supere el umbral de microfisuración térmico.

- Los **cambios de fase del fluido** en el medio poroso causa una variación sustancial de la velocidad.

- La velocidad depende de la **frecuencia** en un medio atenuante, y ésta aumenta ligeramente con ella.

5.- CONCLUSIONES.

El estudio e investigación de ciertas características intrínsecas de los carbones (sistema poroso, red microfisural, velocidad de propagación de ondas, microdurezas Vickers, etc) relacionadas directa o indirectamente con el gas y tensiones, han puesto de manifiesto que las diferencias existentes entre dichas características pueden explicar el diferente comportamiento de los carbones frente a los desprendimientos.

Se han utilizado dos carbones (14W, 15W) de dos capas estratigráficamente contiguas de una mina del Norte de España y con un comportamiento muy distinto frente a los fenómenos gaseodinámicos. Así, mientras la 15W es problemática y ha generado varios éstos fenómenos, la 14W no presenta problemas. De forma comparativa se han incluido otros dos carbones (Bethenergy, Waynesburg) de Pennsylvania (EEUU) con características y comportamiento muy diferente.

Los estudios por microscopía óptica de fluorescencia por reflexión, mediante los cuales se ha analizado el sistema microfisural de los carbones, muestran ya las primeras diferencias.

El 14W presenta una red con fisuras predominantemente de tipo transgranular, con acusada persistencia, regularmente repartidas, y con un grado de interconexión bien desarrollado. En la red fisural del 15W, que presenta un mayor número de fisuras, predominan las intragranulares, con una menor persistencia, se distribuyen de forma más anárquica e irregular y con menor grado de conectividad.

Podemos observar que el diseño de la red de fisuras, para un proceso de desgasificación, es mucho mejor en el 14W que el 15W. El 14W posee un sistema de fisuras con una anchura (superior a la del 15W) y recorrido (fisuras transgranulares e intergranulares de gran persistencia) que favorece el escape del gas, al que se unen otro sistema de fisuras de menor anchura y repartidas de forma regular (intragranulares).

Por el contrario, el diseño y distribución del sistema microfisural y de canales del 15W no favorece el escape del gas (aunque el número de fisuras sea mayor que en el 14W), ya que no tiene fisuras que canalicen el gas, presentando una maraña de microfisuras y poros repartidos irregularmente. Digamos que el poder de desgasificación en la 15W parece menor, aunque posea mayor número de fisuras.

En cuanto a la clasificación microfisural de los carbones por microscopía y utilizando la normativa soviética, extraemos como primera conclusión, atendiendo al valor del Factor "O" (distancia media entre fisuras), que ambos carbones, 14W y 15W, están situados en el límite entre carbones propensos y no propensos a fenómenos gaseodinámicos.

El Factor "O" del 14W es de 0.38 mm, y del 15W es de 0.27 mm.

Es decir, se sitúan entre carbones Clase II ("O"=0.50 mm) y Clase III ("O"=0.14 mm). Si el límite entre ambas clases es de 0.32 mm, el carbón 15W con 0.27 mm pasa al grupo de carbones de riesgo; mientras que el carbón 14W con un valor de 0.38 mm, pertenecería a carbones no propensos y sin riesgo.

Si del mismo modo atendemos al número de fracturas por centímetro (N/cm), la conclusión es la misma. Es decir, que si el límite entre carbones susceptibles y no susceptibles a fenómenos gaseodinámicos es de 30 fisuras/cm, el carbón 15W que presenta 37/cm, supera ligeramente el límite, clasificándose en Clase III (ya dentro de los carbones con riesgo), mientras que el 14W con 27/cm, muy ajustado al límite, aún no es propenso.

Respecto a los valores obtenidos para los carbones B y W, se deduce que ambos se alejan del límite crítico, pudiéndose clasificar como Clase I ó II, pero nunca susceptibles a fenómenos gaseodinámicos. El valor del factor "O" aumenta a 0.72 y 0.62 mm (distancia media entre fracturas) y el N/cm disminuye a 19 y 16/cm, siendo el carbón B el que siempre presenta los mejores valores.

El estudio realizado sobre las microdurezas Vickers (MV), muestra que la MV en el carbón 14W con un valor medio de 26.30 Kp/mm² es ligeramente inferior al obtenido en el 15W que es de 27.17 Kp/mm². Las marcas obtenidas en el 15W eran isótropas, mostrando una ligera anisotropía las marcas del 14W. Esta anisotropía puede ser debida a las "tensiones fósiles" que el carbón 14W ha acumulado en su textura como resultado de los diferentes estados tensionales que ha sufrido a lo largo de su historia geológica.

El estudio de ciertas propiedades físicas de los carbones relacionadas con la circulación y movimiento de fluidos por el seno del carbón, revelan las características del sistema poroso (morfología, tamaño, proporción de espacios vacíos) de las muestras estudiadas y sus diferencias, que reflejan, a su vez, su diferente comportamiento respecto al gas (absorción, desorción, circulación).

Se han realizado una serie de estudios (absorción de agua, succión capilar) y calculado un conjunto de propiedades (porosidad total, porosidad abierta, grado de relleno de poros, etc) encaminadas a obtener una precisa caracterización de la porosidad y distribución de tamaños de poros.

Los resultados muestran que la capa 15W, con una porosidad abierta del 14.6 %, presenta mayor porosidad que el resto de los carbones, seguido con un 9.1 % para el 14W. A su vez, es el carbón que menor grado de relleno de los poros presenta con un 44.5 % (frente al 63.7 % del 14W), lo que indica que el 15W es el carbón que más gas puede contener en su interior y muestra mayor dificultad para liberarlo, al poseer mayor porosidad aislada. También deducimos que es el carbón que más agua acepta por saturación, por su mayor porosidad abierta, seguido muy de cerca por el 14W.

Se realizó el ensayo de absorción libre de agua por inmersión total, donde se ha estudiado la evolución del contenido en agua respecto al tiempo, representado por las curvas de absorción.

Las curvas obtenidas generalmente presentan rasgos comunes:

- Tramo inicial recto con fuerte pendiente.
- Tramo medio de cambio gradual de pendiente.
- Tramo final de tendencia lineal y escasa pendiente.

Por tanto, se pueden diferenciar distintas etapas en el proceso de absorción de agua por parte de los carbones estudiados:

- Una "absorción rápida inicial" a ritmo constante frente al tiempo. Su duración suele corresponder al primer minuto y al cabo de ese tiempo y de forma gradual, disminuye la velocidad de absorción de agua.

- Una "absorción lenta final" y prácticamente constante frente al tiempo.

De la forma de las curvas se puede apreciar que la absorción de agua (los contenidos en agua que presentan los carbones y la velocidad con que se alcanzan) está íntimamente ligada con las características petrográficas de las rocas y sobre todo de las características del sistema poroso (morfología, tamaño y proporción de espacios vacíos). De ahí, por ejemplo, la gran diferencia existente entre las curvas de absorción de agua de el carbón 15W (que muestra la mayor porosidad abierta) y el carbón B (la de menor porosidad abierta).

Se puede apreciar un comportamiento diferente entre el carbón 14W y 15W, reflejo de las diferentes características de sus sistemas porosos. Tras una primera etapa similar en ambos de absorción rápida y a ritmo constante, la absorción de agua en el 14W se estabiliza, debido a que su porosidad abierta es saturada, mientras que la absorción en el 15W continúa a ritmo más lento, debido a que el agua continúa penetrando en los espacios vacíos más pequeños.

El estudio de succión capilar llevado a cabo también nos muestra el diferente comportamiento de los carbones 14W y 15W, y un comportamiento muy similar de los carbones "B" y "W". De esto se deduce, una vez más, que el sistema poroso del 14W es diferente al del 15W. En el 14W predominan las fisuras, conductos o canales (capilares) intercomunicados que favorecen la absorción capilar y la penetración por succión (Coef. de absorción capilar, $C=23$), mientras que en el carbón 15W predomina un sistema poroso de poros aislados, o ensanchamientos difícilmente comunicados, capaz de retener mayor cantidad de agua, porque tiene mayor porosidad, pero necesita mucho más tiempo para absorber, de ahí, su menor coeficiente de capilaridad y de penetración ($C=8$).

Por último cabe reflexionar que el comportamiento de los carbones respecto al proceso de "absorción" de un fluido (agua)

puede compararse con el proceso inverso, la "desorción" de otro fluido (gas). De ahí se deduce que la capa 14W, por el tipo de sistema poroso que posee, es más favorable a una desorción rápida y total, mientras que el carbón 15W, que es capaz de contener más gas porque tiene mayor porosidad, presenta más dificultades al escape del mismo, la desorción sería más lenta y necesitaría mucho más tiempo para una desorción total.

Por último, señalar la gran importancia que la técnica de velocidad de propagación de ondas puede jugar en el proceso de caracterización de los carbones, por su facilidad de manejo, rapidez y gran volumen de información válida que puede aportar (fisuración, porosidad, humedad, composición, presión de confinamiento, cambios de fase de fluido, grado de saturación, constantes elásticas, etc).

6 - BIBLIOGRAFIA.

- A.S.T.M (D. 2845), 1976: **Standard Method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock.** A.S.T.M. Standards.
- Belikov, B.P; Zaleskii, B.V; Rozanov, Y; Sanina, E.A y Timchenko, I.P. (1967): **Methods of Studing the physicommechanical properties of rocks.** Physical and mechanical properties of rocks. B.V. Zaleskii (Ed). Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem. pp. 1-58.
- Bourbié, T; Coussy, B; Zinszener, B. **Acoustic of Porous Media.** Editions Technip, 1986.
- Curl, S.J. (1978): **Methane prediction in Coal Mines.** Report Number ICTIS/TR04, IEA Coal Research, London.
- Farmer, I.W & Pooley, F.D (1967): **A hypothesis to explain the occurrence of outbursts in coal, based on study of West Wales outbursts coal.** Int. J, Rock Mech. Min. Sci. 4, 189-193.
- Kalimaris y Hall (1983): **Absorption and desorption of porous building materials.** Materials Science and Restoration, Pros. Int. Coll. F.H. Wittmann (Ed). Edition Lack and Chemic, pp. 57-66.
- Linsey J. Jackson. **Outbursts in Coal Mines.** Report number ICTIS/TR25, May 1984, IEA Coal Research, London.
- Mamillan, M. (1981): **Connaissances actuelles des problèmes de remontées d'eau par capillarité dans les murs.** The conservation of Stone II. R. Rossi-Manaresi (Ed), pp. 59-72.
- Martínez Hernando, A. (1987): **Estudio petrofísico y de alteración de rocas graníticas de Castilla y León con fines ornamentales.** Seminario de Investigación. Facultad de geología, Universidad de Oviedo.
- Pomeroy C.D. (1956): **Creep in Coal at room temperatures.** Nature 178; 279-280.
- Shepherd, J; Rixon, L.K; Griffiths, L. (1981): **Outbursts and Geological Structures in Coal Mines: A Review.** Int. J. Rock Mech, Min, Sci, & Geomech, Abstr. Vol.18, pp.267-283.
- Stach, E; Mackowsky; Taylor; Chandra. (1982): **Coal Petrology.** 3ª ed.
- Suárez del Río, L.M. (1982): **Estudio petrofísico de materiales graníticos geomecánicamente diferentes.** Tesis Doctoral. Facultad de Geología, Universidad de Oviedo.
- Tatham, R.H. (1982): **Vp/Vs and lithology.** Geophysics, 47(3), pp.336-344.

- **Torraca, G. (1982): Porous building materials: Materials science for architectural conservation.** Int Cent. for the Study of Preservation and Restoration of Cultural Property. ICCROM, Roma.
- **Unsworth, J.F & Gough H. (1989): Characterization of Coals by automated optical image analysis.** The Royal Microscopical Society. 313-341.
- **Vos, B.H. (1976): Waterabsorption and drying of materials.** The conservation of Stone I; Proc. of Int. Symp. Bologna. R.Rossi-Manaresi (Ed). pp.679-694.

6 - AGRADECIMIENTOS.

Deseo hacer constar mi agradecimiento al **Grupo de Petrofísica y Alteración del Area de Petrología (Facultad de Geología)** de la Universidad de Oviedo (en el seno del cual se ha realizado el trabajo), especialmente a su director **M. Montoto San Miguel** que ha ofrecido toda clase de facilidades humanas y materiales para poder llevar a cabo este estudio.

**LOCALIZACION DE ZONAS DE RIESGO EN EL AREA COMPRENDIDA
ENTRE LOS POZOS M.LUISA-SAMUÑO-SOTON-VENTURO, A PARTIR
DE LAS ESTRUCTURAS GEOLOGICAS.**

Proyecto de Derrabes.
I.T.G.E.
Seguridad Minera.

03/Julio/1990

INDICE.

I - Introducción.

II - La Cuenca Carbonífera Central.

- 2.1 - Caracteres Generales.
- 2.2 - Litología.
- 2.3 - Tectónica.

III - Dominios definidos: (M. Luisa-Samuño-Venturo-Sotón).

- 3.1 - Características Geoestructurales.
- 3.2 - Estratigrafía.
- 3.3 - Zona María Luisa-Samuño.
- 3.4 - Zona Sotón-Venturo.

IV - Tectónica de la zona.

- 4.1 - Zona María Luisa-Samuño.
- 4.2 - Zona Sotón-Venturo.

V - Zonas de posibles Riesgos.

- 5.1 - Resumen de las experiencias y estudios internacionales.
- 5.2 - Análisis de los accidentes ocurridos en la C.C.C.
- 5.3 - Zonas de riesgo en el área estudiada.

VI - Conclusiones.

I - INTRODUCCION.

Para conocer las zonas de riesgo y zonas problemáticas de cualquier explotación subterránea, es imprescindible conocer de antemano la estructura geológica sobre la que se asienta. El contexto geológico con sus estructuras (pliegues, fallas, diaclasas, esquistosidades, etc) que será el marco soporte (esqueleto) de la explotación. Su preciso conocimiento permitirá diseñar y construir con la geometría más apropiada la explotación minera, nos mostrará las zonas con mayor riqueza, y nos dará a entender las zonas donde el riesgo es más acentuado, o predecir qué proceso se puede desencadenar, y por lo tanto, las precauciones y medidas a tomar en dichas zonas, y así, actuar convenientemente antes y no a posteriori.

En esta línea, se ha seleccionado una zona de la Cuenca Carbonífera Central (C.C.C.), delimitada por los pozos M. Luisa-Samuño-Sotón-Venturo, para llevar a cabo un estudio geoestructural a nivel "macro", cartografiando las estructuras mayores, estudiando sus características, y sin olvidar las propiedades geomecánicas de la litología existente en la zona objeto de estudio, poder delimitar las zonas de mayor riesgo dentro del dominio seleccionado.

La metodología ideal para predecir las zonas de mayor riesgo, sería añadir y complementar al estudio geoestructural una serie de medidas intrínsecas del carbón y hastiales, como el rango del carbón, porosidad, fisuración, humedad, gas y tensiones en las zonas que la estructura geológica revelan como problemáticas. Es decir, la identificación de la estructura geológica, junto con medidas de varios parámetros del gas y de los sistemas de tensiones, puede ser la más útil y mejor manera de predecir y pronosticar las zonas propensas a desprendimientos, y con ello, tomar las medidas de seguridad más idóneas.

El ámbito de explotación de los pozos viene condicionado en parte por la disposición geológica de los paquetes productivos, más concretamente por la disposición geoestructural. Se han investigado los factores geológicos que influyen en el diseño de las explotaciones y en la seguridad de las mismas, es decir, los factores geológicos que intervienen decisivamente en la zonificación de riesgos geotécnicos: la litoestratigrafía, la fracturación y propiedades geomecánicas de dichas litologías y la macroestructura geológica.

Se debe ir a una metodología donde se establezcan criterios que tengan en cuenta tres conceptos: las características geológicas del macizo rocoso (litología y estructura, principalmente); las características geomecánicas y las condiciones de explotación.

Es inevitable comenzar las investigaciones haciendo una síntesis geológica de la C.C.C., en la que se recojan los aspectos importantes de todo estudio geomecánico: litoestratigrafía, macroestructuras, red de fracturación y estructuras menores. Primero las estructuras meso y macrogeológicas como soporte que realmente va a definir el comportamiento estructural. Y en segundo

lugar, los datos de escala macro y microgeológicos que junto con los parámetros resistentes del macizo y condiciones isotrópicas del mismo, nos ayudan a establecer los criterios de comportamiento mecánico de los terrenos.

De este modo seguiremos una metodología de trabajo de lo general a lo particular, para que desde la comprensión del esquema geológico-soporte (Geología de la C.C.C.), pueda abordarse el estudio de la zona representativa, y por último el análisis detenido de las condiciones geológico-geomecánicas de los pozos escogidos.

II - LA CUENCA CARBONIFERA CENTRAL.

2.1 - Caracteres Generales.

La Cuenca Carbonífera Central de Asturias, (C.C.C.), constituye una de las unidades estructurales mejor definidas de la Cordillera Cantábrica, situada en su vertiente septentrional acomodándose a la disposición general de la Rodilla Astúrica, constituyendo su núcleo y se prolonga largamente por el extremo SE. El conjunto está cabalgado en sus bordes occidental y meridional (Región de Pliegues y Mantos) y cabalga a su vez la unidad situada al este (Manto de Ponga), originando en su frente algunas escamas asociadas (la de Laviana) que forman tránsito con ella. Los materiales de que consta la serie de la Cuenca son exclusivamente de edad carbonífera (salvo la base estructural, visible en el borde E, que es ordovícica o cambro-ordovícica). Por el NE la cobertura mesozoica oculta los materiales de la cuenca, cuya prolongación es visible por la existencia de algunos afloramientos aislados del zócalo que sobresalen por la superficie (El Sueve, Viñón, etc).

La cuenca de sedimentación, de origen parálico, se desarrolló entre el Viseense (quizás Tournesiense) y el Estefaniense, llegando a alcanzar casi 6.000 m. de potencia. Los materiales que integran la C.C.C. son fundamentalmente marinos (aprox. 80%) y en menor proporción continentales y de transición.

En su mitad inferior se caracteriza por una alternancia de areniscas y pizarras con intercalaciones de carbón, y en menor frecuencia bancadas de caliza, y algunos niveles de microconglomerados (Grupo Lena). En la mitad superior se repite esta caracterización, aunque disminuye la presencia de caliza y aparecen pudingas y brechas y se observan niveles de gonfolitas (Grupo Sama).

A lo largo de la sucesión de la Cuenca se presenta según García Loygorry et al (1971), unas 65 ó 70 capas de carbón aunque no todas ellas son explotables y de potencias comprendidas entre 0.50 y 1.80 m. Estas capas se agrupan convencionalmente en conjuntos o paquetes que, de acuerdo con el léxico minero se conocen con Caleras o Entrecalizas, Generalas, San Antonio, María Luisa, Sotón, Entrerregueras, Sorriego, Modesta y Oscura (Carbonífero Productivo) (Fig. 1).

Sobre este conjunto litoestratigráfico se ha desarrollado una tectónica hercínica complicada, de varias fases, por lo tanto, con varias direcciones de esfuerzos tangenciales y, en consecuencia, varios sistemas de pliegues y fallas, que llegan a dar modelos de interferencias. Los materiales aparecen replegados, originando estructuras complejas. En líneas generales se observa la existencia de una estructura sinclinal más o menos compleja, originada por la interferencia de pliegues. Esta estructura posee un eje de dirección NE-SW, cuyo núcleo principal se sitúa en la zona de Sama y otro accesorio en la de El Entrego (zona de estudio). La prolongación meridional de esta estructura define dos nuevos sinclinales importantes, uno con eje E-W siguiendo el valle del río Turón, y otro con eje N-S en la zona de Moreda, perpendicular al trazado del valle del Aller (Fig. 1).

2.2 - Litología.

Los materiales de la C.C.C. son de origen sedimentario, entre los cuales debemos citar:

Areniscas: Con una heterogeneidad bastante amplia distinguiéndose al menos cuatro grupos, areniscas cuarcíticas, calcáreas, arcillosas y microconglomeráticas.

Pizarras: Según el medio de sedimentación encontramos pizarras marinas o continentales, incluyendo dentro de estas últimas a las de origen palustre. Petrológicamente se pueden distinguir las pizarras micáceas, calcáreas, arenosas y bituminosas. Las pizarras continentales (generalmente arenosas o bituminosas) presentan un aspecto mejor estratificado. Sobre las pizarras de la Cuenca no hubo un metamorfismo importante como para que se desarrollaran una pizarrosidad alta o media, por lo que podrían describirse como meras lutitas, más o menos estratificadas. En las zonas de mayor tectonización, no obstante, se pueden observar esquistosidades que difieren claramente de los planos de sedimentación.

Conglomerados: Se deben distinguir cuatro tipos: silíceos (pudingas), calcáreos (gonfonitas), poligénicos (de Olloniego) y brechas mineralizadas.

Calizas: Se inicia la sedimentación del Carbonífero con un episodio calizo (serie Griotte) y sigue con potentes acumulaciones calcáreas (Caliza Montaña) en su base. Existen además, otros litosomas calcáreos entre los cuales destaca la Caliza Masiva (o Escalada o Peña Redonda), y algunas bancadas de poca potencia que se sitúan ya en el Westfaliense C., base del Carbonífero Productivo. A partir de ahí decrece la importancia de la sedimentación calcárea, llegando a desaparecer prácticamente de las series altas de la Cuenca.

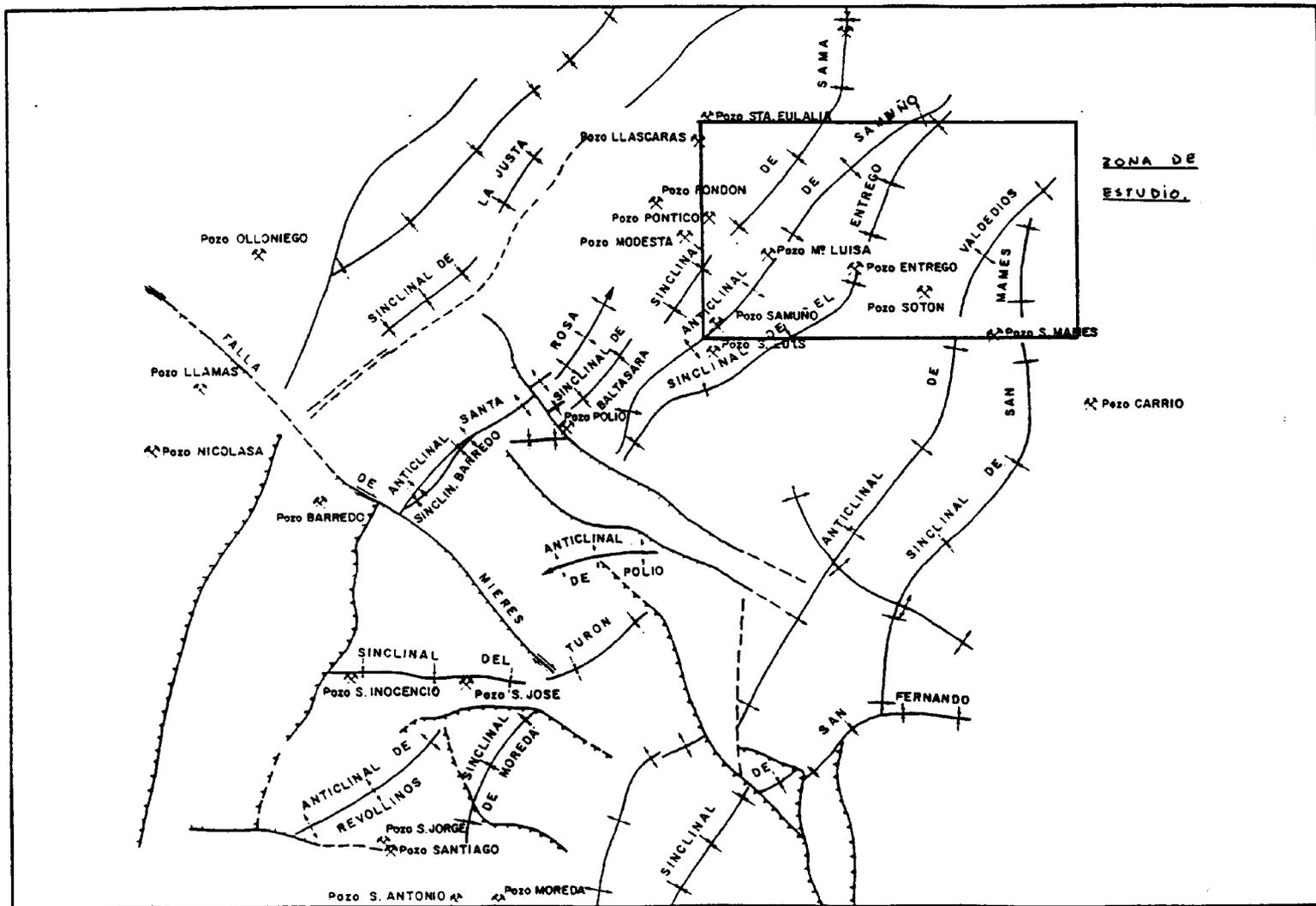
Rocas volcánicas: Petrológicamente son toba litocristalinas de composición riolítica, interestratificadas.

Tonstein: 2 cmts de espesor dentro de la capa Lonzanita (Sotón). Son arcillas, esencialmente caolinita bien estratificada.

Carbón: Con un contenido muy variable en materiales volátiles, son generalmente hullas a excepción de alguna capa de la zona sur que podría darse como antracita. Parece que el aumento en volátiles va de Sur a Norte.

2.3 - Tectónica.

Fig. 2



La tectónica de la C.C.C. es polifásica. Por el Oeste es cabalgada por la Región de Pliegues y Mantos, y por el Este cabalga a la Región de Mantos.

Los cabalgamientos, cuyos frentes tienen dirección N-S, obedecen a empujes de direcciones W-E. Con posterioridad a su emplazamiento, los mantos son deformados por pliegues.

El estilo tectónico es de pliegues y menos importancia fallas. Los pliegues responden a dos sistemas: el longitudinal, de trazado casi N-S, y el transversal de tendencia E-O, que es algo posterior y deforma a los longitudinales. Los pliegues longitudinales son paralelos al trazado de los cabalgamientos (N-S), mientras que los transversales, más lasos y algo posteriores a los longitudinales, se disponen en abanico, observando una tendencia E-W. La superposición de los dos sistemas da lugar a la interferencia de pliegues (Fig. 2).

Las fallas se agrupan fundamentalmente en tres familias de direcciones E-W, NW-SE y NE-SW, cada cual, con distintas características geométricas, propiedades dinámicas y edad.

- Fallas E-W, de carácter inverso hundiendo el labio Norte.

- Fallas NW-SE, no muestran relación con las estructuras del Arco Astúrico, relacionadas con las emisiones volcánicas del Pérmico. Suelen ser normales, con cierta componente horizontal dextrógira y hundimiento del labio Sur.

- Fallas NE-SW, postcretácica, paralela al cabalgamiento NW, muestra su carácter de falla inversa

Existe una falla, de dirección E-W, muy importante que delimita a la Cuenca por el sur, es la Fálía de León.

En cuanto a las estructuras menores, se han identificado tres direcciones de esquistosidad de fractura. La primera de dirección E-W y buza hacia el N suavemente. La segunda, de dirección 50-60 al E y buza fuertemente hacia el N y la tercera va hacia el E buzando subhorizontalmente al N. Las dos primeras son esquistosidades de plano axial, mientras que la tercera va asociada a fenómenos de Kink-fold, y debe corresponder a un "strain-slip-cleavage".

III - DOMINIOS DEFINIDOS: (MARIA LUISA-SAMUÑO)-(VENTURO-SOTON).

3.1 - Características Geoestructurales.

Estructuralmente la zona o dominio objeto de estudio, está situado en la cubeta definida por los sinclinales de El Entrego y Sama; entre ellos se intercala el anticlinal de Samuño (Figs. 1, 2).

3.2 - Estratigrafía.

El ámbito estratigráfico de esta zona abarca todo el Carbonífero Productivo, íntegramente, desde Caleras hasta Modesta-Oscura.

Las características de los paquetes en dicho dominio son:

PAQUETE GENERALAS: En la zona objeto de estudio, tiene una potencia de 336 m. y está dividida en tres episodios: dos de influencia marina y uno continental, en el que se concentran 4 de las 5 capas de carbón existentes. Sólo dos son explotables, 1 y 2 Generala. Predomina ligeramente la sedimentación pizarrosa sobre la arenosa.

PAQUETE SAN ANTONIO: Tiene 398 m. de potencia, y está dividido en 4 tramos (2 continentales y 2 marinos) que encierran 10 pasos de carbón. Destacan la 1, 2 y 3 San Antonio como explotables. La litología es predominantemente pizarrosa (71%) y moderadamente arenosa.

PAQUETE MARIA LUISA: Aproximadamente de 270-318 m. de potencia en esta zona, está dividido en 4 episodios marinos y 4 continentales. En los tramos de sedimentación continental se incluyen ocho carboneros importantes y cinco capas explotables (M. Teresa, Julia, S. Gaspar, S. Luis y M. Luisa). Predomina la sedimentación limoarcillosa, con suelos de vegetación y pizarras azufrosas, y también bancos de areniscas bien estratificadas. En los tramos marinos, apenas poseen carbón, y predomina las series areniscosas o microconglomeráticas potentes, junto con series pizarrosas competentes.

PAQUETE SOTON: Su potencia en la zona es de 394-409 m. dividido en 5 tramos continentales y 5 marinos. En los tramos continentales, con 17 pasos de carbón muy concentrados, existe un predominio de la sedimentación pizarrosa, con suelos de vegetación muy desarrollados. Los tramos marinos, con 21 pasos de carbón, la mayoría de orden centimétrico, predomina una sedimentación areniscosa en bancadas de orden decamétrico.

PAQUETE ENTRERREGUERAS: Con una potencia de 311-334 m., de los que 275 son de régimen marino y 59 continentales. En los tramos marinos hay 7 pasos de carbón, la sedimentación es arenosa en la base y pizarrosa en el techo. En los continentales (3 tramos) existen 14 pasos, importantes y explotados. La sedimentación es pizarrosa y ocasionalmente microconglomerática.

PAQUETE SORRIEGO: De unos 325 m. de espesor. Un sólo ciclo en el que existen varias capas de carbón en la parte alta, y varios niveles de gonfolitas.

PAQUETE MODESTA-OSCURA: Sólo presente en el núcleo de los sinclinales de Sama y El Entrego. Existe una alternancia de tramos marinos y continentales con varias capas explotables. Los tramos continentales están asociados a bancos de gonfolitas.

3.3 - Zona María Luisa-Samuño.

En esta cubeta cuyo eje mayor es de dirección NE-SW, afloran los materiales más modernos del Carbonífero Productivo, representado

por los paquetes Modesta, Oscura y Sorriego, que ocupan el núcleo de los citados sinclinales. El rumbo general de las estructuras es N 60 E, que corresponde al plegamiento longitudinal.

El sinclinal de Sama tiene cierres periclinales, situados en el pozo Mosquitera, por el N y la zona del pozo Modesta por el S. Este pliegue muestra una disposición bastante simétrica, con plano axial vertical y flancos buzando 60 aproximadamente. El eje está inclinado al N.

Al E del sinclinal de Sama se encuentra el anticlinal de Samuño, algo más apretado, cuyo plano axial buza hacia el E, siendo el flanco W el más verticalizado (70) y el flanco E el más tendido.

Entre el sinclinal de Sama y el anticlinal de Samuño incide oblicuamente (30) la falla de Cadavio, prácticamente vertical, asociada probablemente al plegamiento, y que acaba siendo absorbida por el movimiento diferencial entre paquetes, en la dirección de a capa. A estas estructuras, sigue al E el sinclinal de El Entrego, de dirección NE-SW, pero replegado por el sistema transversal de pliegues originando interferencias. Este sinclinal tiene un plano axial inclinado, vergente hacia el E, y además contiene una falla que rompe la charnela, bajando el labio SE.

3.4 - Zona Sotón-Venturo.

Corresponde al núcleo del sinclinal de El Entrego, que afecta a los niveles estratigráficos más altos de la Serie Productiva. Las labores mineras vienen definidas por el plegamiento cruzado (longitudinal y transversal) del núcleo sinclinorial de El Entrego y el tránsito anticlinal a la cubeta de San Mamés.

El dominio estratigráfico se centra en la mitad inferior del Carbonífero o Serie Productiva, es decir, paquetes Generales, S. Antonio, M. Luisa, Sotón, Entrerregueras y Sorriego, a excepción de Modesta-Oscura.

El pozo Venturo se emboquilla cerca de un nivel de gonfolitas del paquete Modesta-Oscura, en el cierre periclinal de un repliegue del sinclinal de El Entrego. Está muy próximo a la traza del eje de dicho pliegue, que cabecea hacia el SW, y es retrovergente en su disposición regional.

Las capas tienen una inclinación de 65-70, en dirección NE-SW, suavemente deformadas por el plegamiento transversal. El ámbito de la explotación queda definido por las zonas axiales, aproximadamente, del sinclinal del Entrego y el anticlinal de Sotondio.

La red de fracturación no parece muy desarrollada a escala regional, mientras que el diaclasamiento adquiere distintas densidades. Se exceptúan las diaclasas mayores o relacionadas con el pliegue, que adquieren gran continuidad.

IV - TECTONICA DE LA ZONA.

Este apartado se refiere únicamente a la descripción de las líneas estructurales de escala regional, que afectan al ámbito de la zona o dominio definido.

4.1 - Zona M. Luisa-Samuño.

El El ámbito estructural de esta zona está definido por tres pliegues: a)- Sinclinal de Sama.
b)- Anticlinal de Samuño.
c)- Sinclinal de El Entrego.

Los tres son pliegues asimétricos y de cierta vergencia NW.

El flanco SE del sinclinal de Sama tiene una inclinación próxima a los 70, y en él se integran los paquetes Sorriego y Entrerregueras, en tránsito al anticlinal de Samuño.

El anticlinal de Samuño tiene en el flanco NW verticalizado (casi 70) el flanco SE relativamente tendido (45-50); entre los dos flancos, la zona de charnela (Pq. Sotón) es relativamente estrecha, respondiendo el cierre a un radio de curvatura de unos 40 m. El plano axial está inclinado buzando casi 70 al SE. Las labores del pozo Samuño están condicionadas por el cierre periclinal al SW del sinclinal del Entrego.

El núcleo del anticlinal de Samuño se bifurca en dos anticlinales y un sinclinal muy laso producido por el sistema transversal de pliegues que afecta a la Cuenca. A lo largo del plano axial se pierden las capas de carbón por una fractura asociada al plano axial y con el mismo rumbo que el eje del pliegue, que las desplaza con un salto poco acentuado hundiendo relativamente el flanco SE, lo cual es un fenómeno geodinámico frecuente en toda la C.C.C. Cierta tipo de fallamiento suele ir asociado a los pliegues en la zona del plano axial, contenido o subparalelo a ella.

El flanco SE del anticlinal de Samuño da paso al sinclinal de El Entrego, donde se explota la zona axial del sinclinal (Paq. Sorriego), que se cierra periclinamente hacia SW, mientras que hacia el NE se abre hasta dar una zona de charnela suavemente curvada. El flanco SE está tendido y en la zona del planoaxial-charnela se observa muy fracturado y probablemente acompañado por una falla asociada. En esta zona las capas adquieren una fuerte pendiente y se verticalizan a medida que nos introducimos en el flanco NW del anticlinal de Sotondio.

La dirección estructural predominante es NE-SW, siguiendo las líneas generales de la Cuenca en esta zona. Las capas de carbón explotadas tienen un rumbo N50E, ajustándose subparelamente a la dirección de los ejes de los pliegues, cuyos planos axiales se observan normalmente volcados de vergencia NE.

Esta dirección de los ejes corresponde al plegamiento longitudinal, y solamente los pliegues bifurcados del anticlinal de Samuño, que

giran hasta direcciones E-W y casi N-S podrían interpretarse como consecuencia del sistema transversal, que se produjo con posterioridad, deformando los longitudinales.

No existe una red de fallas importantes, y ni siquiera locales, a excepción de las asociadas al núcleo del sinclinal de El Entrego, que llevan los mismos rumbos que los ejes de los pliegues. En la cartografía consultada se refleja la falla de Cadavío asociada al flanco NW del anticlinal de Samuño, la cual en algunas zonas no puede llegar a observarse, quizás porque estas fallas regionales en determinadas zonas quedan dentro de la deformación plástica a gran escala, mientras que en otras la deformación es frágil con gran trastorno de las capas, rotas y microplegadas.

Por lo tanto, los elementos estructurales de primer orden son los pliegues, y secundariamente las fallas detectadas

Las tectonizaciones menores, tales como diaclasamientos, esquistosidades o plegamientos menores asociados, de orden métrico o menor, son linealidades y estructuras que juegan un papel geomecánico importante dentro de la escala métrica o decamétrica, en la cual no se mueve este estudio, pero sería muy interesante realizarse en estudios posteriores y de mayor profundidad en los detalles.

De todas formas, se puede observar que la fracturación menor estaría representada por diaclasas agrupadas en familias, que dependiendo de la litología, varían en frecuencia y desarrollo, siendo las pizarras las que presentan mayor densidad de fracturas y por lo tanto mayores problemas de estabilidad.

4.2 - Zona de Sotón-Venturo.

El dominio geoestructural de Sotón-Venturo está en gran parte incluido dentro del sinclinal de El Entrego, en su parte NE. Este sinclinal, que en la parte de M. Luisa está bien definido por un sólo plano axial, se va ensanchando hacia Sotón hasta dar formas asimiladas a los modelos de plegamiento cruzado de los dos sistemas que actúan en la Cuenca: el longitudinal (dirección NE-SW), y el transversal (de dirección casi ortogonal, NW-SE). En esta parte, el eje del sinclinal se ha ramificado en tres, intercalando entre dos sinclinales, un anticlinal poco pronunciado (anticlinal de Venturo). Es decir, el dominio está definido por las tres ramificaciones del sinclinal de El Entrego en su parte Norte: sinclinal norte de El Entrego, anticlinal de Venturo y sinclinal sur de El Entrego, que limita con el anticlinal de Valdedios.

El anticlinal de Venturo es un pliegue suave y algo asimétrico con el flanco S verticalizado. Lleva pequeñas fallas longitudinales asociadas al plano axial, que han sido deformadas, al igual que el eje, por el sistema transversal de pliegues.

El sinclinal sur de El Entrego no parece estar excesivamente cerrado, con buzamientos de 55 y 60 a ambos lados del plano axial,

por lo que se le puede dar como pliegue simétrico. Lleva dos fallas asociadas, longitudinales a ambos lados de la charnela, que se han producido a través de niveles pizarrosos poco competentes.

Esta estructura está separada del anticlinal de Valdedios, que hace de separación de otra gran estructura: la cubeta de San Mamés, explotada por los pozos Carrió, Cerezal y San Mamés. Este flanco sur del sinclinal de El Entrego (o flanco N del anticlinal de Valdedios) está prácticamente verticalizado, y llega a dar localmente buzamientos invertidos.

La dirección general estructural dominante es de NE-SW, siguiendo las lineaciones de la Cuenca. Las direcciones de las capas se ajustan subparalelamente a los ejes mayores de los pliegues, llegando a ángulos de 20-25 con ellos. Estos ejes, a su vez, se observan normalmente algo volcados, con los flancos Sur verticalizados.

No existen fallas regionales importantes que atraviesen la zona. Si, en cambio, hay fallas locales asociadas al plegamiento, capaces de producir saltos de orden decamétrico en las capas a las que afecta. Se han apreciado fallas longitudinales a la estructura, asociadas al plano axial del sinclinal Sur de El Entrego. En términos relativos, tienen poca importancia al no producir desplazamientos que afecten grandemente a las capas. Otro tipo de fallas son las observadas en disposición transversal u oblicua respecto al eje del pliegue, y asociadas a los mismos. Estas fallas detectadas en los transversales de los pozos, forman unos 30 con los ejes de los pliegues, a los que pueden desplazar distancias de hasta 50-70 m.

Existen otros tipos de tectonizaciones menores, como son ciertas esquistosidades de fractura que aparecen en zonas muy comprimidas, o a la red de diaclasamiento, que se entienden como líneas estructurales que condicionan la estabilidad de los huecos mineros, que no pueden ser tratadas en este estudio, y que sería muy interesante un estudio posterior.

Resumen. La zona elegida para realizar el estudio, está caracterizada estratigráficamente por una alternancia de pizarras y areniscas con intercalaciones de carbón; por un predominio alto de pliegues asimétricos sobre cualquier otra deformación, y desde el punto de vista mecánico por repeticiones cíclicas de episodios competentes y más o menos frágiles, que predominan sobre series litológicamente más plásticas.

V - ZONAS DE POSIBLES RIESGOS.

5.1 - Resumen de las experiencias y estudios.

Basado en una extensa bibliografía sobre investigaciones geológicas

de zonas propensas a desprendimientos, se ha podido concluir que las estructuras geológicas juegan un papel primordial. Así, estructuras como las fallas de arrastre, fallas de strike-slip, cabalgamientos y pliegues tumbados son especialmente propensos a desprendimientos. Dentro y fuera de las estructuras geológicas parecen existir anomalías de tensiones y de gas.

A continuación se presenta una recopilación bibliográfica de algunas observaciones realizadas en diferentes zonas carboníferas del mundo, que ponen en evidencia la relación entre los desprendimientos ocurridos, ciertas estructuras geológicas y las características del carbón.

West Wales (Reino Unido).

Los estudios y observaciones realizadas en este yacimiento de antracitas, muestran que de los 192 desprendimientos ocurridos en las 9 explotaciones estudiadas, en todos los casos había trastornos geológicos y un tipo de carbón blando en los alrededores. Pescod (1947-48) dedujo que la principal estructura asociada a los desprendimientos era un pliegue anticlinal, seguido en segundo término, por suelos "enrollados-ondulados" (Floor roll) a partir del cual la capa se adelgaza. Nelson (1937) y Dix (1941) hicieron algunas descripciones de estructuras a escala megascópica y de mina, y en trabajos posteriores describieron las estructuras regionales de la zona. (Fig. 3)

Muchos de los pliegues descritos son anticlinales y había otros dentro del carbón que están aparentemente ligados a procesos de arrastre. Otros tipos de pliegues presentan en su charnela espesores de carbón de hasta tres veces el espesor del flanco. Y en algunos casos (3d, e) el muro de la capa de carbón no está plegado, lo que sugiere que despegó del techo y se desplazó por una zona de arrastre o cabalgamiento.

Rocky Mountains Coalfields (Canada).

Los desprendimientos están asociados a fallas y a techos ondulados. Patching (1962) afirma que los desprendimientos están generalmente asociados con anomalías estructurales, con la debilidad del carbón o con las concentraciones de esfuerzos en las capas debido a la proximidad de una falla o pliegue.

Belgica y Francia.

Las capas donde se produjeron desprendimientos estaban fuertemente deformadas por pliegues, principalmente abiertos y tumbados y afectados por fallas de arrastre y normales. Se observó que los desprendimientos ocurren en las regiones próximas a zonas de charnela del pliegue, principalmente reclinados y tumbados y a lo largo de fallas, especialmente de arrastre.

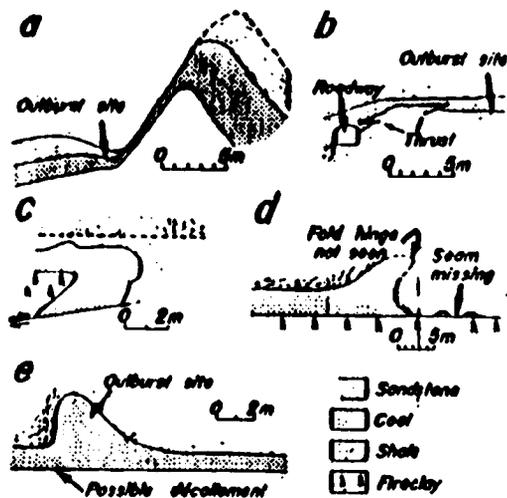


Figura 3.- Secciones de algunas estructuras asociadas con desprendimientos en el West Wales (Reino Unido) (a)- Anticlinal. (b)- Fallas conjugadas. (c)- Falla de arrastre y pliegue tumbado. (d)-Anticlinal y adelgazamiento de capa. (e)-Anticlinal y posible cabalgamiento.

Japón.

Ujihira & Hashimoto (1976) encontraron en el Ishikari Coalfield de Hokkaido, que los desprendimientos tienden a ocurrir donde las fallas inversas o normales son interceptadas con corrimientos (desplazamientos) de una magnitud similar a los espesores de la capa de carbón.

Bowen Basin, Queensland (Australia).

Esta zona presenta fallas de arrastre, de strike-slip y normales, compatibles con la cinemática del régimen compresivo E-W de la fase deformacional. Todos los desprendimientos ocurrieron sobre dichas fallas.

Southern Coalfield of New South Wales (Australia).

Todos los desprendimientos fueron asociados con carbón "blando", diques, fallas o combinaciones de estos. Uno de los desprendimientos más importantes estuvo asociado a fallas verticales de menor importancia, que intersectaban a otra falla principal, lo cual producía que el carbón estuviese altamente desmenuzado y fracturado. Las últimas observaciones y estudios en esta zona muestran que sólo ocurren los desprendimientos en las proximidades de las fallas de strike-slip, mientras que las fallas normales no son propensas a desprendimientos.

Existe una serie de factores geológicos que controlan el que ocurran o no desprendimientos: algunas propiedades fundamentales del carbón tales como su "rango" y la naturaleza de los planos principales de esquistosidad ("cleat"), junto a la presencia de estructuras geológicas tales como fallas y pliegues. Estas estructuras son los lugares donde se concentran las tensiones, y los grandes volúmenes de gas. La estructura geológica, el campo de tensiones existente, el método minero utilizado, la velocidad de avance y la presencia de gas, son variables interdependientes que controlan la presencia de los desprendimientos.

Se considera que las estructuras geológicas a escala mesoscópica y a nivel de mina, muestran el lugar donde se concentran los esfuerzos y el gas (Fig. 4) y probablemente el 90% de los desprendimientos ocurren en tales sitios. La naturaleza de estas estructuras ha sido muy poco estudiada en las capas de carbón.

La geometría de una estructura puede afectar directa o indirectamente en el desarrollo de los desprendimientos en un área. Por ejemplo, la orientación del "cleat" con respecto a la dirección minera en capas altamente tensionadas pueden influenciar en el drenaje del gas en el frente y representa un factor importante en la desencadenación de un desprendimiento. La geometría de una estructura en sí misma puede reflejar también los campos de tensiones, las zonas sobretensionadas originadas por los mecanismos de su formación, lo cual puede tener una influencia directa sobre la intensidad de la estructura y , como consecuencia, su riesgo a desprendimientos.

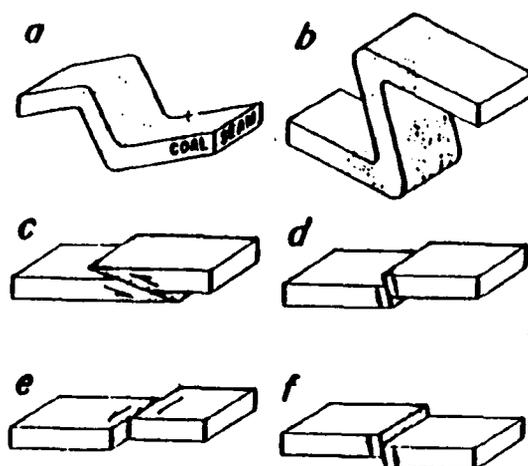


Fig. 4.- Bloques diagramas de estructuras geológicas en capas propensas a desprendimientos. a)- Anticlinal asimétrico (tipo "Kink"). b)- Pliegue tumbado. c)- Falla de arrastre. d)- Falla inversa. e)- Falla de strike-slip. f)- Falla normal. Las flechas indican el movimiento relativo de los bloques.

La figura 4 representa dos tipos de pliegues y cuatro tipos de fallas. La descripción sistemática de las fallas y pliegues están convenidas en textos como Price (1966) y Ramsay (1967). La geometría del pliegue tipo "Kink" (4a) cuando se produce en estratos, es de tal forma que los estratos menos competentes (en nuestro caso, el carbón) a lo largo de toda su longitud por el pliegue (núcleo y flancos) suele estar, generalmente, comprimida y triturada. Los pliegues con un perfil similar al de 4b serán más propensos a desprendimientos en las zonas de los núcleos, donde el carbón sufre una considerable deformación por el flujo ductil, o incluso, flujo cataclástico a que es sometida la capa en el proceso de plegamiento.

De igual modo, existen muchas diferencias en la forma, estilo y en

la intensidad de deformación para los diferentes tipos de fallas. Las fallas inversas, las de arrastre y las de strike-slip (Fig. 4c, d, e) son fallas conocidas como propensas a desprendimientos. Generalmente suelen estar constituidas por amplias zonas de cizalla con material fracturado ("gouge"), al contrario de lo que ocurre en una falla normal (4f) que presenta zonas relativamente estrechas y de una simple fractura.

Teniendo en cuenta las observaciones realizadas, es necesario realizar trabajos geológicos detallados y más profundos en aquellos lugares propensos a desprendimientos, con el fin de establecer la naturaleza exacta de las estructuras, antes de valorar su papel en los mecanismos que puedan aparecer. Una vez conocido esto, la investigación puede ser dirigida directamente a aclarar la interacción que pudiera haber entre la estructura geológica existente y las otras precondiciones previas necesarias para que ocurra un desprendimiento: el gas y las tensiones.

5.2 - Análisis de los accidentes ocurridos en la C.C.C.

Con el objetivo de poder comparar y aplicar las conclusiones extraídas por otros autores en diferentes campos mineros del mundo, a la Cuenca Carbonífera Central, se ha realizado un análisis de los informes que sobre los accidentes ocurridos en la minería asturiana posee la Jefatura de Minas, y que abarca el periodo 1963-1989. Basándonos en la información aportada por dichos informes, y teniendo en cuenta únicamente aquellos accidentes que están relacionados directa o indirectamente con aspectos geológicos (trastornos) deducidos de la lectura y análisis de sus respectivos informes, extraemos, como primera conclusión, la ausencia de desprendimientos de grandes dimensiones, limitándose la mayoría de ellos a pequeños volúmenes de carbón, fragmentos de techo, etc; y que algunos de ellos pueden ser considerados como desprendimientos instantáneos (D.I.), pero también de escasa importancia, desde el punto de vista de sus dimensiones, localizados estos últimos, casi exclusivamente, en la Cuenca de Aller.

Por la información que sobre los accidentes aportan los informes, no nos es posible asociarlos con las grandes estructuras geológicas de la Cuenca (pliegues, fallas, cabalgamientos, etc), centrándose toda la información al entorno inmediato del lugar del accidente, es decir, a escala de capa, o como sumo, a escala de la mina.

Por lo tanto, las causas de los accidentes, desde un punto de vista geológico, se limitan a aspectos de pequeña escala y que podemos resumir de la siguiente forma:

- Variación de la potencia de las capas: Representa un 32 % de los accidentes. Es una causa muy extendida en todas las minas y zonas mineras. Estas zonas son propensas a accidentes que según la geometría, la denominación es diferente (en cuña, en campana, anchurón, etc).

- Repuelgo: Es la causa del 19 % de los accidentes. También son zonas propensas y donde se suelen tomar especiales medidas de seguridad en el sostenimiento.

- Fallas: (23%). Se han tenido en cuenta los accidentes ocurridos próximos a la falla y dentro de la misma. No se ha podido obtener información sobre el tipo de falla, ni de sus características.

- Características intrínsecas de la capa: Representa un 46 % de los accidentes. Se han incluido todas las características geológicas intrínsecas de la capa que influyen en el comportamiento mecánico de la misma y en su heterogeneidad: la naturaleza del carbón (blando, duro, revolcado, deleznable, triturado, en polvo, etc), la naturaleza de los hastiales (falso muro, falso techo, etc), intercalaciones de diferentes materiales en la capa (bastión, estériles, tierra, arcilla, borrasco, fusca, etc.), la estructura de la capa (laminada, plegada, revolcada, arrosariada, etc).

- Otras causas: (19%). En este apartado hemos incluido el cambio de buzamiento de la capa, la inflexión que sufren alguna de ellas, y el plegamiento de las mismas.

5.3 - Zonas de posibles riesgos en la zona estudiada.

Para acercarnos y deducir las zonas de posibles riesgos en el área estudiada, únicamente a partir del estudio y observación de las estructuras geológicas existentes, se han realizado una serie de pasos:

A)- Primeramente se ha realizado una cartografía a escala 1:25.000 de los materiales geológicos, diferenciando los distintos paquetes, cuyas características estratigráficas y litológicas ya han sido expuestas y cuyo comportamiento geomecánico puede ser medianamente deducido de su composición litoestratigráfica (frágil, dúctil, etc).

Se ha cartografiado las estructuras geológicas mayores (pliegues, fallas, cabalgamientos, etc) y sus interferencias, así como los diferentes materiales (paquetes) se amoldan al marco geológico estructural soporte.

B)- Se han realizado tres cortes geológicos (A-A', B-B'-B'', C-C') perpendicularmente a las líneas generales de la Cuenca, con el fin de conocer la geometría de los principales pliegues existentes en el dominio definido (sinclinal de Sama, anticlinal de Samuño, y sinclinal de El Entrego), conocer también, las características de sus flancos (verticales, tumbados, etc), de sus planos axiales asociados a fallas, el juego y tipo de fallas, etc.

C)- Se han resaltado las grandes estructuras existentes en la zona objeto de estudio, fruto del proceso tectónico sufrido (pliegues, fallas), pudiéndose observar sus direcciones principales y sus interferencias.

D)- Se han demarcado, como paso último, y como resultado de las observaciones y estudios previos, las zonas de riesgo de la zona estudiada diferenciando:

- Zonas de alto riesgo: Son zonas donde el riesgo, presumiblemente es mayor, por coexistir características y factores negativos.
 - . Zonas donde interfieren pliegues.
 - . Zonas donde interfieren planos axiales y fallas.
 - . Zonas donde interfieren diferentes fallas originando dominios muy fracturados y triturados, donde el material estará geomecánicamente muy degradado.
 - . Zonas donde interfieren fallas, planos axiales y cierres periclinales de pliegues.
- Zonas de riesgo: Son zonas que generalmente siempre deben ser catalogadas como problemáticas.
 - . Zonas de charnela de los pliegues.
 - . Zonas de fallas.
- Zonas de riesgo moderado: Son las zonas donde el riesgo no es evidente y depende mucho de la litología existente, del grado de fisuración y fracturación de los materiales, de las estructuras menores existentes en el área.
 - . Flancos verticalizados.
 - . Flancos invertidos.

Las características más importantes a destacar, en las diferentes estructuras observadas dentro del área estudiada serían:

- Sinclinal de Sama: Cierre periclinal al S.
- Anticlinal de Samuno: Pliegue apretado y asimétrico. Flanco NW verticalizado. Charnela estrecha. Cierres periclinales. Interferencia de pliegues. Flanco NW asociado a la falla de Cadavio.
- Sinclinal de El Entrego: Pliegue replegado por el sistema transversal. Plano axial que contiene una falla que rompe la charnela. Cierres periclinales con fallas. Zona plano axial y charnela muy fracturada. Flanco S verticalizado.
- Anticlinal de Venturo: Flanco S verticalizado. Con fallas longitudinales asociadas al plano axial.
- Sinclinal Sur de El Entrego: Lleva dos fallas asociadas longitudinalmente a ambos lados de la charnela.

VI - CONCLUSIONES.

Las estructuras geológicas nos muestran el lugar donde se concentran las tensiones y el gas, y probablemente el 90% de los

desprendimientos ocurren en tales sitios. La geometría de las estructuras en sí misma y el conocimiento de su génesis, puede reflejar los diferentes campos de tensiones existentes en la zona, las áreas sobretensionadas originadas por los mecanismos de su formación y los lugares "trampa" donde el gas puede estar acumulado.

Se ha comprobado que estructuras geológicas como las fallas de arrastre, fallas inversas, fallas de strike-slip, cabalgamientos y pliegues tumbados, son especialmente propensas a desprendimientos.

Es posible, a partir de un estudio detallado de las principales estructuras geológicas existentes en un área, conocer y predecir las zonas de riesgo y zonas problemáticas en dicha área.

El estudio del marco geológico soporte del área comprendida entre los pozos María Luisa-Samuño-Sotón-Venturo, únicamente a nivel macrogeológico como soporte que realmente define el comportamiento estructural, nos ha permitido conocer y delimitar las zonas de riesgo, donde confluyen aspectos geológicos (charnelas, planos axiales de pliegues, fallas, etc.) que presumiblemente, según experiencias y estudios, el que exista riesgo de desprendimiento es mucho mayor. Así se ha podido cartografiar zonas de alto riesgo, zonas de riesgo y zonas de riesgo moderado, según los factores geológicos que influyen.

El conocimiento previo de estas zonas es muy útil para poder actuar y tomar, a priori, las precauciones y medidas más apropiadas.

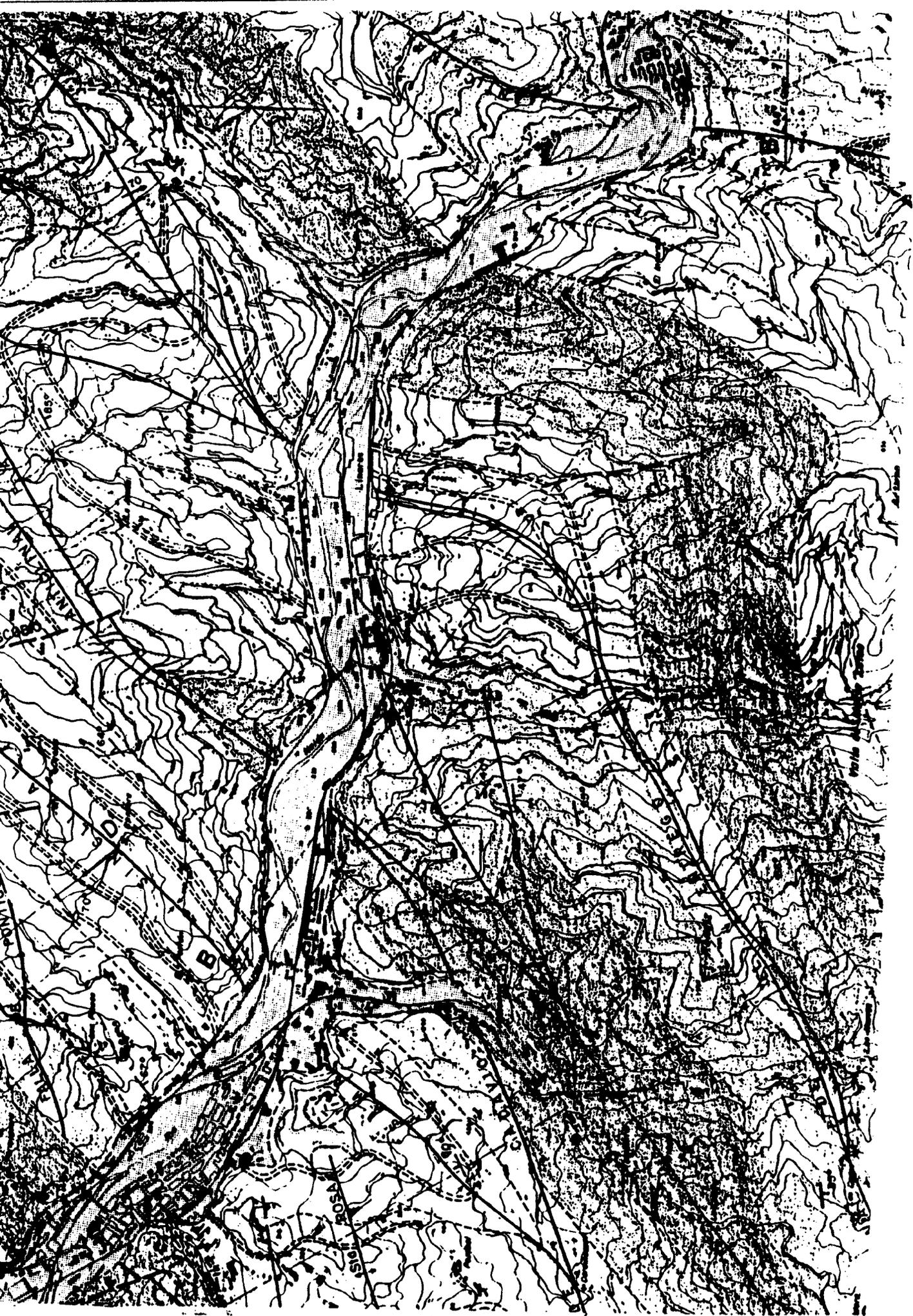
A este primer imprescindible paso, como paso previo y de acercamiento al problema, se le debe de añadir y complementar con otra serie de estudios y medidas más concretas de las zonas vástamente delimitadas, siguiendo una metodología de trabajo de lo general a lo particular, donde se incluirían estudios más detallados de las tectonizaciones menores (diaclasamientos, "cletat", plegamientos menores, etc.), junto con una serie de medidas intrínsecas del carbón y los hastiales.

Es decir, que la identificación de la estructura geológica, junto con medidas de varios parámetros del gas y sistemas de tensiones, puede ser la más útil y mejor manera de predecir y pronosticar las zonas propensas a desprendimientos, y con ello tomar las medidas de seguridad más idóneas.

Por lo tanto, se debe ir a una metodología de lo general a lo particular, para que desde una comprensión del esquema geológico soporte, se establezcan criterios que tengan en cuenta tres conceptos para la zonificación de riesgos:

- a)- Las características geológicas del macizo rocoso (litología y estructura, principalmente).
- b)- Las características geomecánicas de los materiales (carbón, hastiales), el sistema de gas y tensiones.
- c)- Las condiciones de explotación.

Si se llega a una mejor interpretación y entendimiento del papel de las estructuras geológicas, las tensiones y el sistema de gas en el carbón, entonces será posible planificar métodos mineros y desarrollar nuevos y mejores sistemas para combatir los desprendimientos en las zonas propensas a ellos de las capas de carbón.





ENTRADA NOROCCIDENTAL

ESCABO

SANTO

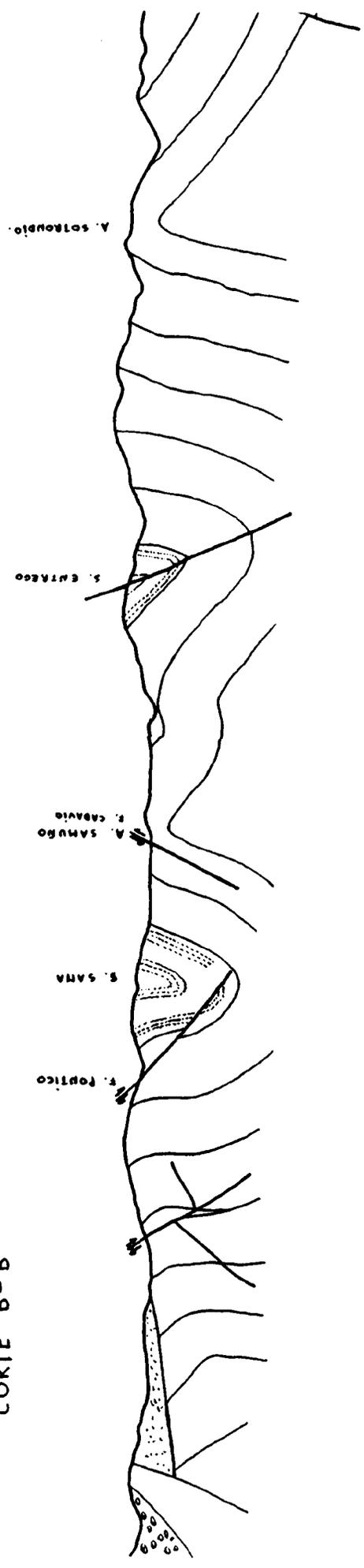
SANTA ROSA

1950

CORTE A-A'



CORTE B-B'



SUGERENCIAS GEOLOGICAS EN

SEGURIDAD MINERA:

EXPLORACIONES DE CARBON.

Antonio Martínez Hernando.
Proyecto de Derrabes.
I.T.G.E.
Octubre, 1990.

SUGERENCIAS GEOLOGICAS PARA SEGURIDAD MINERA.
EXPLORACIONES DE CARBON: METODOLOGIA DE ESTUDIO GEOLOGICO.

I.T.G.E. Octubre 1990.

Para conocer las zonas de riesgo y zonas problemáticas de cualquier explotación subterránea, es imprescindible conocer de antemano la estructura geológica sobre la que se asienta. El contexto geológico con sus principales estructuras (pliegues, fallas, diaclasas, esquistosidades, etc) serán el marco soporte (esqueleto) de la explotación. Su preciso conocimiento permitirá diseñar y construir con la geometría más apropiada, la explotación minera, nos mostrará las zonas con mayor riqueza, y nos dará a entender las zonas donde el riesgo es más acentuado, o predecir qué proceso se puede desencadenar, y por lo tanto, las precauciones y medidas a tomar en dichas zonas.

Es necesario tratar de diseñar el trazado de los trabajos mineros de tal forma que se puedan evitar las áreas con altas concentraciones de tensiones, y planear las operaciones mineras para que la energía de deformación pueda ser disipada de forma segura durante la extracción. Donde no sea posible evitar las zonas de riesgo, se deben tomar medidas apropiadas para reducir el contenido en gas por debajo del valor crítico y redistribuir las zonas de altas tensiones para crear áreas seguras para el trabajo.

Según las experiencias mineras, las observaciones y estudios realizados, las zonas de riesgo aparecen donde confluyen aspectos geológicos (charnelas, planos axiales de pliegues, fallas, trastornos geológicos, etc.) que presumiblemente, el que exista riesgo de desprendimiento es mucho mayor. Por ello, es muy interesante poder cartografiar zonas de alto riesgo, zonas de riesgo y zonas de riesgo moderado, según los factores geológicos que influyen.

Las zonas peligrosas coinciden, principalmente, con dislocaciones geológicas y se caracterizan por presentar:

- Una estructura dislocada.
- Reducida resistencia.
- Elevado contenido en gas.
- Elevada velocidad de desorción.
- Elevadas tensiones.
- Reducida permeabilidad al gas.

Tres son los principales factores que producen tensiones, y que contribuyen al desarrollo de los desprendimientos, las tensiones de los gases presentes en el carbón, las tensiones geológicas debidas a los trastornos tectónicos, tanto a gran escala como a pequeña escala, y tensiones inducidas por las excavaciones mineras. Todas estas tensiones se superponen a las tensiones vírgenes propias del medio debidas a la profundidad y compresión de las capas de carbón y los estratos contiguos.

Basado en una extensa bibliografía sobre investigaciones geológicas de zonas propensas a desprendimientos, se ha comprobado que las estructuras geológicas juegan un papel primordial. Así, estructuras como las fallas de arrastre, fallas inversas, fallas de strike-slip, cabalgamientos y pliegues tumbados son especialmente propensos a desprendimientos. Dentro y fuera de las estructuras geológicas parecen existir anomalías de tensiones y de gas.

Las tensiones y deformaciones en el carbón y en las rocas tienen dos causas principales: tectónicas y las producidas por la actividad humana. Los trastornos tectónicos pueden ser de gran escala tales como fallas o pliegues, o de pequeña escala, tales como irregularidades en la microestructura del carbón.

Existe otra serie de factores geológicos que controlan el que ocurran o no desprendimientos: algunas propiedades fundamentales del carbón tales como su "rango", su microfisuración, su textura, la permeabilidad, y la naturaleza de los planos principales de esquistosidad ("cleat"), junto a la presencia de estructuras geológicas tales como fallas y pliegues.

Estas estructuras geológicas muestran, tanto a nivel mesoscópico como a nivel de mina, los lugares donde se concentran las tensiones y los grandes volúmenes de gas, y probablemente, el 90% de los desprendimientos ocurren en tales sitios. El carbón, es un material fácilmente quebradizo y fracturable, por ello, cuando los depósitos de carbón son sometido a cabalgamientos, cizallamientos, fallamientos, plegamientos y otros procesos de trastornos geológicos, pueden desarrollar un alto grado de fracturación con una baja resistencia de cizalla. Las más importantes condiciones geológicas para que aparezcan desprendimientos son la presencia de fracturas y zonas de cizalla en el carbón asociados con las mayores y menores fallas y pliegues.

La estructura geológica, el campo de tensiones existente, el método minero utilizado, la velocidad de avance y la presencia de gas, son variables interdependientes que controlan la presencia de los desprendimientos en las capas de carbón.

Por lo tanto, es inevitable iniciar el estudio haciendo una síntesis geológica, en la que se investigue y recoja los factores geológicos que influyen en el diseño de las explotaciones y en la seguridad de las mismas, es decir, los aspectos geológicos que intervienen decisivamente en la zonificación de riesgos geotécnicos: la micro y macroestructura geológica,
la litoestratigrafía,
la fracturación,
las propiedades geomecánicas de las litologías.

Primero las estructuras meso y macrogeológicas como soporte que realmente va a definir el comportamiento estructural. Y en segundo lugar, los datos de escala macro y microgeológicos que junto con los parámetros resistentes del macizo y condiciones isotrópicas del mismo, nos ayudan a establecer los criterios de comportamiento

mecánico de los terrenos.

De este modo seguiremos una metodología de trabajo de lo general a lo particular, para que desde la comprensión del esquema geológico-soporte, primeramente, y estudio de las estructuras geológicas, a escala de pozo, el levantamiento litoestratigráfico de los mismos y las caracterizaciones geomecánicas de los macizos rocosos, en segundo lugar, irán definiendo las zonas de riesgos, cuyo estudio debe abordarse en una segunda fase a mayor detalle, aportando información sobre las propiedades intrínsecas de los materiales involucrados (carbón y hastiales), propiedades mecánicas, propiedades elásticas, fisuración, permeabilidad, porosidad, etc.

PRIMERA FASE: A - Estudio "macrogeológico".

* Cartografía y estudio de las estructuras mayores (meso y macrogeológicas).

B - Estudio "micro", a nivel de mina.

* Cartografía y estudio de las estructuras menores.

Objetivos: Delimitar las zonas de riesgos y zonas problemáticas. Clasificarlas por el número e importancia de los factores que confluyen. (Zonas de alto riesgo, de riesgo, y de riesgo moderado).

SEGUNDA FASE: C - Estudio a todas las escalas, de la zona concreta ya delimitada en la fase anterior como "zona de riesgo" y que nos preocupa. Abarcando desde la escala "macro", a medidas microscópicas (fisuración, rango, etc). Donde se incluirían estudios más detallados de las tectonizaciones menores (diaclasamientos, "cleat", plegamientos menores, etc.), junto con una serie de medidas intrínsecas del carbón y los hastiales.

D - Medidas intrínsecas de:

- Gas y tensiones.

- Carbón y hastiales.

- Características intrínsecas de la capa.

PRIMERA FASE:

1.- Estudio Cartográfico-Estructural:

- Escala 1:25.000
- Escala 1:10.000

* Objetivos:

- Conocer las estructuras geológicas del área. (Tipos de pliegues, tipos de fallas, cómo interfieren, etc).
- Conocer la geometría de las estructuras. La geometría de una estructura puede afectar directa o indirectamente en el desarrollo de los desprendimientos en un área. La geometría de una estructura en sí misma y el conocimiento de su génesis, puede reflejar los diferentes campos de tensiones existentes (tensiones residuales o "fósiles"), las áreas sobretensionadas originadas por los mecanismos de su formación, y los lugares "trampa" donde el gas puede estar acumulado, lo cual puede tener una influencia directa sobre la intensidad de la estructura y, como consecuencia, su riesgo a desprendimientos.
- Conocer la tectónica de la zona. (Diferentes fases tectónicas, esquistosidad, diaclasamiento, metamorfismo).
- Conocer la distribución de los diferentes materiales existentes en la zona y su disposición espacial.
- Distribución de las capas. Un detallado conocimiento de la posición y espesores de los estratos que rodean a la capa de carbón es esencial para todos los métodos de predicción.
- Zonas mineralógicamente más ricas.
- Zonas más problemáticas y de mayor riesgo, deducidas del análisis global de las estructuras.
- Estimar las reservas.
- Diseñar la explotación minera.
- Delimitar las zonas de riesgo, alto riesgo y riesgo moderado.

2. - Estudio Estratigráfico-Sedimentalógico:

Puede ser de gran importancia y utilidad conocer el ambiente sedimentario en el que se forma el carbón, pues condiciona en gran medida las características y propiedades del mismo (geometría y calidad), así como sus componentes y su contenido en cenizas y en azufre. Así, los carbones formados en llanuras deltaicas suelen tener capas con geometría tabular y con un alto contenido en cenizas y azufre, mientras los formados en llanuras de inundación fluviales, presentan capas con geometría elongada y tienen, por lo general, bajo contenido en azufre y volátiles.

El conocimiento de la sección estratigráfica anterior y posterior a la capa de carbón es de gran importancia, para conocer la proporción de metano que las capas y estratos de los alrededores pueden aportar, así como su número y posición respecto a las capas

de carbón. La porosidad, permeabilidad y tensiones de los estratos contiguos son de gran importancia. Un lecho poroso que es también permeable podría contener también gas y lo expulsaría como una capa de carbón cuando es explotada.

* Objetivos:

- Conocer el modelo general de sedimentación.
- La caracterización y correlación de las capas.
- Calidad del carbón.

3. - Estudio Geoquímico-Sedimentológico-Paleontológico:

* Objetivos:

- Conocer la génesis de las capas (hidrología del medio, proximidad o distabilidad de la cuenca, procedencia terrígena o química de las fracciones inorgánicas, etc.)
- Mejoras en los trabajos de preparación y concentración.
- Eventual aprovechamiento de elementos enriquecidos en las cenizas.
- Contaminación atmosférica e hidrológica.
- Nuevas tecnologías de utilización del carbón, etc.

Teniendo en cuenta las observaciones efectuadas, es necesario realizar trabajos geológicos detallados y más profundos en aquellos lugares ya revelados por los estudios anteriormente realizados, como propensos a desprendimientos, con el fin de establecer la naturaleza exacta de las estructuras, antes de valorar su papel en los mecanismos que puedan aparecer. Ahora, la investigación puede ser dirigida directamente a aclarar la interacción que pudiera haber entre la estructura geológica existente y las otras precondiciones previas necesarias para que ocurra un desprendimiento: el gas y las tensiones.

Se impone un segundo estudio a menor escala y con mayor detalle de las zonas de riesgo ya delimitadas por las observaciones y estudios anteriores, donde hay que superponer a todos los datos geológicos y estructuras menores, las propiedades geomecánicas y comportamiento físico del carbón y hastiales, dentro del contexto que definen el gas y las tensiones existentes. Por ejemplo, la orientación del "cleat" con respecto a la dirección minera en capas altamente tensionadas pueden influenciar en el drenaje del gas en el frente y representa un factor importante en la desencadenación de un desprendimiento.

SEGUNDA FASE:

4. - Estudio del ámbito estructural y litoestratigráfico de las zonas problemáticas:

- A) - Zonas próximas a pliegues:
- . Flancos invertidos.
 - . Flancos verticales.
 - . Zonas de charnela.
 - . Zonas de núcleo de pliegue.
- B) - Zonas próximas a fallas: En Australia todos los desprendimientos han ocurrido en fallas (Hargraves, 1983a) aunque no todas las fallas de las zonas propensas a desprendimientos son lugares de desprendimientos. Los principales tipos de fallas que parecen estar más asociados a los desprendimientos son, las fallas de cabalgamientos (fallas inversas de bajo ángulo) y fallas de strike-slip. Si el grado de cizallamiento y dislocación originado por las fallas y cabalgamientos es prolongado e intenso, se fracturan los cristales de las rocas y éstas se degradan más y más a cristales más pequeños y más finos, y a veces se desarrolla una pronunciada foliación. Esta masa finamente triturada se denomina milonita (proceso de milonitización). La presencia de milonita es a menudo un indicativo de la zona propensa a desprendimientos, pues estas zonas acumulan gas en el carbón por su fina microfisuración. Por lo tanto, los datos a indagar son:
- . Clase de falla.
 - . Tipo de movimiento.
 - . Tipo de deslizamiento.
 - . Tipo de giro.
 - . Zona triturada, grado y espesor.
- C) - Todo tipo de trastornos geológicos (repueigos, anchurones, etc). Es muy importante las contorsiones de la capa y las variaciones de su espesor.
- D) - Análisis de la red de fracturación del entorno inmediato (para conocer los problemas de estabilidad):
- Grado de inestabilidad.
 - Grado de fracturación: Tamaño medio y máximo de los bloques y cuñas.
 - Permite obtener las relaciones angulares entre las diferentes familias de discontinuidades y sus relaciones con las estructuras geológicas mayores.
 - Relacionar las deformaciones que se producen en las galerías con las diferentes estructuras geológicas que atraviesa.
 - Optimización del sostenimiento de galerías.

- E) - **Diaclasamiento de las diferentes litologías:** Relacionar las diaclasas y fracturas con pliegues, fallas, labores, etc. Investigadores australianos han demostrado que es posible predecir las fallas de strike-slip y por lo tanto las zonas propensas a desprendimientos, mostrando un incremento del número de diaclasas en las labores mineras.
- F) - **Zonas de cizalla.** Que indicarian la presencia de una concentración de tensiones y/o planos de debilidad, y la presencia de bolsas de gas y carbón pulverizado. Por ello, todos los desprendimientos están asociados a zonas de cizalla aunque no todas las zonas de cizalla son propensas a desprendimientos.

5. - Medidas y características intrínsecas:

A)- **Capa de carbón:** Aquellas características geológicas intrínsecas que influyen en el comportamiento mecánico de la capa y en su heterogeneidad: la naturaleza del carbón (blando, duro, revolcado, deleznable, triturado, en polvo, etc); las intercalaciones de los diferentes materiales (bastión, estériles, tierra, arcilla, borrasco, fusca, etc); la estructura de la capa (laminada, plegada, revolcada, arrosariada, etc); las diferentes familias de fisuras, la pendiente, la potencia, el grado de dislocación, etc.

B)- **Naturaleza de los hastiales:** Las tensiones de los estratos del techo y muro influye en la existencia de desprendimientos en la capa de carbón. Los fuertes estratos pueden romper e inducir desprendimientos de carbón. La existencia de grandes espesores en la zona inmediata a la capa que se explota, se ha observado, que son lugares propensos a desprendimientos. La rigidez de los estratos próximos favorecen la acumulación de energía y su repentino relajamiento cuando el límite de deformación es excedido.

En algunas minas, los lugares donde se producen los desprendimientos están en los estratos superiores o inferiores, más que en la propia capa de carbón, particularmente en areniscas.

El estudio principalmente se centrará en:

- Estudio litológico (areniscas, pizarras, calizas,..)
- Comportamiento mecánico:
 - . Resistencia a la compresión.
 - . Resistencia a la tracción.
 - . Módulos elásticos.
- Permeabilidad.
- Fisuración y diaclasamiento.
- Espesor.

C)- Gas y Tensiones: Son los factores de primordial importancia y que todas las teorías sobre mecanismos de desprendimientos enfatizan, por lo tanto deben ser estudiadas e investigadas en profundidad.

- Gas: Es el más importante factor relacionado con los desprendimientos. Puede encontrarse en estado libre en poros y fisuras, e íntimamente ligado a la materia (gas asociado) formando un complejo inestable. En la propia formación del carbón, agua, dióxido de carbono y metano, se producen en proporciones muy variables. El CO₂ se produce primeramente en el proceso de descarboxidación pero gran parte escapa porque no es atrapado por los otros materiales formadores del carbón. El metano se produce en grandes cantidades en los últimos estados de coalificación y es atrapado en el carbón. Por ello el gas de las capas de carbón de alto rango es principalmente metano. En algunas partes del mundo, cuando el carbón es afectado por la intrusión de rocas ígneas, se origina CO₂ por un proceso neumatolítico que desplaza al metano. Otros gases que algunas veces se encuentran son el nitrógeno y el sulfuro de hidrógeno.

El gas se desprende en el momento en que la presión exterior de la capa es inferior a la del gas que hay en los poros del carbón. El caudal depende de la velocidad de desorción de la capa, velocidad que está en función de la cantidad total de gas que contiene, de la textura del carbón, de la fisuración y permeabilidad del carbón y, para una capa dada, de su grado de dislocación: de ahí el papel esencial de las presiones de los terrenos.

La capacidad de un carbón para admitir gas depende del área de superficie interna la cual a su vez está relacionada con el rango (a mayor rango mayor capacidad de absorción), con la naturaleza del gas y la presión del gas (a mayor presión mayor capacidad de adsorción). El gas también se puede presentar en los estratos porosos adyacentes.

En resumen, el caudal gaseoso es tanto más elevado (y por tanto la velocidad de desorción es más grande) cuanto mayor es el contenido de gas en el carbón, cuanto menos materias volátiles contenga, cuanto más dividida esté su textura y, para una capa dada y en un punto dado, cuanto mayor abertura tenga esta capa, esté más dislocada, esté sometida a tensiones más intensas.

- Tensiones: Las tensiones en la corteza terrestre son el resultado de las actividades de las fuerzas tectónicas, fuerzas gravitacionales o tensiones residuales debido a cargas tectónicas, térmicas o gravitacionales. Las tensiones en los macizos mineros son el resultado de la acumulación y suma de las tensiones residuales "fósiles" (energía de deformación elástica almacenada en lugares estructurales), y las originadas propiamente por las labores mineras. Los desprendimientos están, generalmente precedidos, por una redistribución de las tensiones en el carbón y en los estratos adyacentes, que producen la fracturación de ambos, carbón y roca. La fracturación puede ser inducida o por tensiones geológicas o por tensiones mineras.

D)- Carbón:

1 - Estudio microscópico.

- **Composición petrográfica.** El significado del contenido maceral en el problema de los desprendimientos no se conoce aún. Algunos autores creen que las tensiones del carbón está determinado por el contenido maceral.

- **Textura del carbón.** La capacidad de absorción del carbón, depende del área de superficie interna del mismo, aumentando con la misma. Cuanto más fina es la textura del carbón, mayor es el área de superficie interna.

- **Rango.** En general, los carbones de alto rango, como las antracitas y carbones bituminosos de bajo contenido en volátiles, son más propensos a desprendimientos que los carbones de bajo rango, probablemente debido a su mayor capacidad para absorber gas. (Aquí el rango se refiere al rango químico definido por el porcentaje de materia volátil y cenizas). Cuando el rango aumenta, aumenta también la capacidad absorción y disminuye la permeabilidad. Otra alternativa para conocer el rango de los carbones es la reflectancia de la vitrinita, la cual también depende de su deformación. En Australia, todos los carbones cuyas vitrinitas superan la reflectancia de 1.10, son propensos a desprendimientos.

- **Porosidad y microfisuración.** Dos factores muy importantes y que deben ser profundamente estudiados. Ambos controlan, entre otras propiedades, el contenido en gas, el poder de absorción y la velocidad de desorción. El carbón puede ser considerado como un medio poroso recorrido por una red de fisuras. A causa de su fina porosidad poseen superficies internas muy extendidas (100-200 m²/g) y por ello capaces de absorber grandes cantidades de metano, que aprovechan las microfisuras que están intercomunicadas para escapar a cierta velocidad hacia el hueco de la mina.

El carbón puede ser clasificado en varias clases por el número de fisuras y sus anchuras que se observan al microscopio. Por lo tanto, el conjunto de poros y fisuras de la masa carbonosa, juegan un papel importante en la manera en que el gas pasa del estado adsorbido al estado libre.

2 - Dureza del carbón. Los desprendimientos en el West Wales están asociados a zonas de carbón "blando", donde el carbón está virtualmente sin una estructura sedimentaria identificable y microscópicamente es muy diferente al carbón normal. El carbón "blando" se suele encontrar cerca del techo o muro de la capa o en pequeñas bolsadas de espesor variable dentro de la capa, a menudo ocupando toda la sección de la capa. Es posible reconocer una transición gradual entre el carbón normal y el carbón tipo "desprendimiento" con un incremento del aspecto cizallado. En Australia a este carbón se la llama "gouge" y se cree que se forma por un proceso de cataclasis.

3 - Humedad natural.

4 - Planos principales de fracturación ("cleat").

Los planos "cleat" son diaclasas o fracturas regulares y muy frecuentes que corresponden a planos de esquistosidad en el carbón, que favorecen la extracción, el nacimiento de fracturas inducidas y el escape del gas. Se conocen dos tipos: "face cleat" o principal, corresponde a la dirección dominante de fracturación y se caracteriza por planos lustrosos que se extienden varios metros, y el "butt cleat" o secundario formado por fracturas irregulares y cortas y aproximadamente perpendiculares al principal. El conocimiento de este tipo de superficies es muy importante en el proceso de desgasificación de la capa, y facilitan los trabajos de extracción.

5 - Características mecánicas y elásticas. Las zonas frágiles y friables se consideran como peligrosas. En ausencia de los efectos dinámicos del gas, las tensiones y el módulo elástico del carbón son los que rigen la fractura mecánica de los desprendimientos. El riesgo del carbón a romper (estallar) depende de su capacidad para acumular energía de deformación elástica. Un índice comunmente usado es el índice de energía de deformación Wet, que es la relación entre la energía de deformación elástica y la energía de deformación permanente, obtenido por simples ciclos de carga-descarga en ensayos de compresión uniaxial. Se ha encontrado que los carbones con $Wet > 5$ son muy propensos a desprendimientos.

Hanes et al. (1983) recopilaron las investigaciones geomecánicas de áreas con riesgos de desprendimientos en Australia (esfuerzo de compresión uniaxial, tensión vertical, módulos de elasticidad, superficie de fractura y porosidad), y los resultados representan una reducción en el esfuerzo y superficie de fractura de alrededor del 20% en los lugares de desprendimiento, acompañado también con una baja porosidad y baja permeabilidad.

6 - Permeabilidad. La permeabilidad es considerada como el principal factor que controla la emisión del gas dentro de las minas. La permeabilidad del carbón y los estratos contiguos tienen un considerable efecto sobre la migración y emisión del gas. Se puede definir como la habilidad del carbón para transmitir el gas cuando existe a través de él una presión o un gradiente de concentración de gas.

No debe ser confundida con la porosidad la cual controla la capacidad del carbón para almacenar gas en estado libre. La permeabilidad se divide en micropermeabilidad, que es la permeabilidad de los poros, y la macropermeabilidad que es la permeabilidad de las fisuras.

Un carbón sólido sin fracturas tiene muy baja permeabilidad y se puede considerar como virtualmente impermeable. El flujo, únicamente a través de los microporos, es muy pequeño comparado con el flujo total del gas. Los macroporos o fracturas proporcionan la principal vía de flujo para el metano. Estas fracturas pueden

existir en las capas de carbón virgen o pueden ser inducidas por las labores mineras.

La capacidad de flujo de un carbón fracturado depende del número y anchura de las fracturas y su continuidad en la dirección del flujo. La permeabilidad de una capa de carbón depende también de las concentraciones de otras fases fluidas, incluyendo el agua.

5 - Velocidad de desorción. Un importante indicador del riesgo a desprendimientos de una capa es la velocidad a la cual el gas es emitido del carbón, que depende, entre otras muchas cosas, de la concentración del gas, de la distribución del gas en el carbón (que depende del rango), del grado de microfisuración y milonitización, de la viscosidad y tipo del gas, etc.

6 - Calidad: Los desprendimientos tienden a ocurrir en los carbones más económicos, tales como antracitas y carbones bituminosos de alto rango.

- . Naturaleza del carbón (grado de hullificación).
- . Contenido en cenizas.
- . Contenido en volátiles.

CONCLUSIONES.

Es posible, a partir de un estudio detallado de las principales estructuras geológicas existentes en un área, conocer y predecir las zonas de riesgo y zonas problemáticas en dicha área.

Es decir, que la identificación de la estructura geológica, junto con medidas de varios parámetros del gas y sistemas de tensiones, puede ser la más útil y mejor manera de predecir y pronosticar las zonas propensas a desprendimientos, y con ello tomar las medidas de seguridad más idóneas.

Por lo tanto, se debe ir a una metodología de lo general a lo particular, para que desde una comprensión del esquema geológico soporte, se establezcan criterios que tengan en cuenta tres conceptos para la zonificación de riesgos:

- a)- Las características geológicas del macizo rocoso (litología y estructura, principalmente).
- b)- Las características geomecánicas de los materiales (carbón, hastiales), el sistema de gas y tensiones.
- c)- Las condiciones de explotación.