



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

ESTUDIO DE LAS CARACTERISTICAS DEL
CALENTAMIENTO Y COMBUSTION ESPONTANEA
EN CAPA DE LAS HULLAS SUBBITUMINOSAS
PENINSULARES

MEMORIA

Septiembre, 1992



01126

INDICE

- 1.- ANTECEDENTES
- 2.- OBJETIVOS
- 3.- INTRODUCCION
- 4.- AUTOCOMBUSTION DEL CARBON
 - 4.1.- MECANISMO DE LA AUTOCOMBUSTION
 - 4.2.- PROPIEDADES DE LOS CARBONES EN RELACION CON LA AUTOCOMBUSTION
- 5.- FUEGOS EN MINA
 - 5.1.- ORIGEN DE LOS FUEGOS
 - 5.2.- INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES GEOMINERAS
 - 5.2.1.- Factores geomineros que intervienen
 - 5.2.2.- Propiedades del carbón
 - 5.2.3.- Condiciones geológicas
 - 5.2.4.- Factores mineros
 - 5.3.- PREVENCIÓN, DETECCIÓN Y LUCHA CONTRA LOS FUEGOS
- 6.- ESTUDIO DE LAS MINAS SUBTERRANEAS DE LIGNITO
 - 6.1.- MINAS ANALIZADAS
 - 6.2.- TRABAJOS REALIZADOS EN MINA
 - 6.3.- RESULTADOS OBTENIDOS
 - 6.4.- TRABAJOS REALIZADOS EN LABORATORIO
- 7.- RESUMEN Y CONCLUSIONES
- 8.- BIBLIOGRAFIA
- 9.- ANEXOS

Nº SICOAN 92115

1.- ANTECEDENTES

El presente proyecto de investigación surge de la necesidad planteada por el sector de la minería subterránea del carbón español de profundizar en el análisis de los factores que determinan la aparición de focos de autocombustión en las minas de lignito con vistas a proporcionar metodologías de valoración del riesgo y de detección precoz que permitan evitar la aparición de fuegos en las labores o al menos limitar su frecuencia y extensión.

En Diciembre de 1989, el Comité Mixto de OCICARBON acordó su participación en el proyecto de investigación, cuya ejecución fue encomendada a la Fundación Gómez Pardo. Para la realización de los trabajos contemplados en el proyecto, la Fundación Gómez Pardo ha contado con la colaboración de AITEMIN y del Laboratorio Oficial José María de Madariaga (LOM), a través de los convenios que mantiene con dichas entidades.

2.- OBJETIVOS

Los objetivos generales que se plantearon en la investigación eran mejorar el conocimiento existente sobre los mecanismos de oxidación del carbón, las causas que favorecen la aparición de combustiones espontáneas en la mina, la influencia de los métodos de explotación y de las condiciones geológicas del yacimiento, los procesos que aceleran el autocalentamiento y los medios que pueden emplearse para reducir el riesgo o, en su caso, para limitar la extensión de un fuego en la mina.

3.- INTRODUCCION

Los fuegos en las minas subterráneas de carbón constituyen uno de sus problemas históricos que, en determinados casos, han condicionado la viabilidad de explotación de ciertas capas. Aunque en la minería española del carbón, el problema se encuentra ahora localizado en las minas de lignitos de las cuencas de Teruel y Cataluña, sin embargo existen otras explotaciones que sin sufrir este fenómeno de forma habitual, si han contabilizado algún fuego de mayor o menor importancia en términos de pérdidas de reservas, durante el laboreo de algunas de sus capas (p.e. Cuenca Central Asturiana y Cuenca del Guadiato). Es importante resaltar que el método de explotación aplicado juega un papel fundamental en la evitación de los fuegos. No obstante, las exigencias de productividad crecientes que se plantean a la minería subterránea del carbón, está conduciendo a un cambio radical, allí donde geológicamente es factible, de los métodos de explotación que se han venido utilizando desde tiempos inmemoriales, en la búsqueda de mejores rendimientos de conjunto. Por lo tanto y a pesar de que actualmente el problema de los fuegos se concentra en la minería de los lignitos, conviene despertar la atención de aquellas minas que teniendo antecedentes históricos en el laboreo de sus capas, pretenden modificar ahora los métodos de explotación que han venido aplicando.

El fenómeno de la autocombustión se fundamenta en la propiedad del carbón de adsorber el oxígeno del aire y reaccionar químicamente con él de forma exotérmica, lo que unido a su baja conductividad térmica ($\approx 7 \times 10^{-4}$ cal/s.cm.k) que favorece la acumulación del calor de reacción, da lugar a la elevación progresiva de la temperatura de la masa de carbón afectada. Desde un punto de vista físico-químico, el fenómeno está regido por la mayor o menor capacidad del carbón para adsorber el oxígeno del aire y por su mayor o menor afinidad cara a desencadenar la reacción de oxidación de la materia carbonosa, incluso a temperatura ambiente; además existen otros factores que activan el fenómeno, como el contenido en azufre pirítico, determinando su conjunto, la susceptibilidad del carbón a la autocombustión.

Con relación a la autocombustión del carbón en las minas subterráneas de lignito españolas, que como se sabe aplican fundamentalmente el método de explotación por subniveles con sutiraje, la experiencia en las explotaciones de Teruel, cuyos lignitos presentan la susceptibilidad más acusada, demuestra que la ventilación juega un papel fundamental en cuanto a la prevención del fenómeno, siendo el caudal y la velocidad del aire de ventilación secundarios los factores de los que depende la disipación del calor generado en la oxidación inevitable del carbón en contacto con dicha corriente de ventilación. En la mina Oportuna han constatado que las superficies de carbón en contacto con la atmósfera de la labor, poco o nada barridas por la corriente de ventilación, son puntos favorables para la aparición de focos de autocombustión; en este sentido, las campanas originadas en las bóvedas de los subniveles, son un ejemplo claro de lo anterior.

En las explotaciones por tajo largo los focos de autocombustión se localizan fundamentalmente en la zona del postaller debido a la débil corriente de ventilación que oxida el carbón pero no es capaz de disipar el calor generado.

4.- AUTOCOMBUSTION DEL CARBON

4.1.- MECANISMO DE LA AUTOCOMBUSTION

La combustión espontánea del carbón se produce por la acumulación del calor liberado en la interacción del oxígeno del aire con el carbón a temperatura ambiente. Es en esencia, un proceso físico-químico que comienza con la adsorción del oxígeno por el carbón y continúa con la reacción exotérmica de oxidación de la materia carbonosa en los macroporos y microporos, cuyo calor de reacción varía de 2 a 4 cal/ml de O₂ consumido en CNPT. Si la cantidad de calor producido es mayor que la cantidad de calor disipado por la masa de carbón, se produce un calentamiento que acelera el proceso de oxidación.

El mecanismo del proceso en su etapa inicial, consiste por lo tanto en:

- Una adsorción rápida del O₂ sobre la superficie del carbón, con desprendimiento de humedad.
- Una reacción superficial de oxidación lenta de la materia carbonosa con desprendimiento de CO y CO₂.

4.1.1.- Fenómenos que favorecen la autocombustión

Aunque en la literatura se menciona la influencia de diversos factores en el desencadenamiento del proceso de autocombustión, sin embargo, todos los autores coinciden en afirmar que es la oxidación de la materia carbonosa contenida en el carbón la responsable principal de su combustión espontánea.

Entre los fenómenos que pueden contribuir al calentamiento del carbón, acelerando el proceso de oxidación de la materia carbonosa, se pueden citar a la oxidación de las piritas

presentes en el carbón, la fracturación del carbón debida a los movimientos del terreno, la adsorción de vapor de agua en los poros del carbón y la acción bacteriana.

La pirita (S_2Fe) puede estar contenida en el carbón en concentraciones superiores incluso al 10% en los carbones españoles. En un principio se atribuyó el origen de la autocombustión al calor generado por la oxidación de las piritas. Sin embargo, posteriormente se demostró que la pirita contenida en el carbón tan solo contribuye al proceso disgregando el carbón en fragmentos más pequeños, exponiendo al aire una mayor superficie, y también elevando la temperatura de la materia carbonosa mediante el calor liberado por su propia oxidación. La existencia de pirita puede tener un efecto apreciable en el fenómeno de autocombustión si se encuentra en concentraciones superiores al 5% y finamente dividida. Cuando se encuentra en forma de nódulos o láminas su contribución al calentamiento inicial es muy pequeña.

La oxidación de la pirita en presencia de aire húmedo, tiene lugar según la reacción:



Los productos de reacción tienen un volumen mayor que la pirita original, provocando la fragmentación del carbón en cuyo seno está embebida, exponiendo así una mayor superficie de carbón al aire.

Otro fenómeno que puede producir la elevación de la temperatura de la masa de carbón, es el hinchamiento producido por la penetración del agua. Este proceso es endotérmico, pero simultáneamente se produce una liberación mayor de energía producida por la interacción entre el fluido y la superficie del carbón.

Debido a su carácter higroscópico, el carbón genera una gran cantidad de calor al absorber agua. Cuando el agua se absorbe en forma de vapor, su calor latente de vaporización se suma al calor anteriormente citado, incrementándose así la temperatura de la masa de carbón considerablemente.

El calentamiento debido a los movimientos del terreno y a la acción bacteriana no tienen importancia práctica.

4.1.2.- Interacción superficial oxígeno-carbón

El mecanismo por el que se produce la interacción entre el oxígeno y el carbón no se conoce exactamente todavía, debido principalmente a que no se ha establecido totalmente la naturaleza química del carbón. Sin embargo, la mayoría de los autores consideran que la interacción carbón-oxígeno es esencialmente un fenómeno superficial, cuya naturaleza depende del tiempo de exposición, de la temperatura y del tipo de carbón.

Dado que es un fenómeno superficial, la velocidad de oxidación aumenta al disminuir el tamaño de las partículas y, alcanza un valor máximo por encima del cual la subdivisión de las partículas ya no tiene ningún efecto.

Las fuerzas de atracción entre el oxígeno y la superficie del carbón pueden variar en un rango amplio que va desde las fuerzas físicas hasta los enlaces químicos estables.

A temperatura ambiente, al fijarse el oxígeno sobre los grupos reactivos de la superficie del carbón durante la fase inicial del proceso, se forma un compuesto intermedio de carácter oxidante, denominado peróxido complejo. El grado de formación de este complejo es función de la naturaleza del carbón; cuanto mayor es el rango del carbón menor es el grado de formación de peróxido complejo. Obviamente, el grado de formación del complejo será tanto mayor cuanto menor sea el tamaño de los partículas de carbón.

El peróxido complejo permanece estable a una temperatura inferior a 70 °C, a partir de la cual se descompone, siendo mayor la velocidad de descomposición al aumentar la temperatura. Sin embargo, incluso a temperaturas superiores a 250 °C, una cantidad apreciable de peróxido complejo se mantiene sin descomponerse durante varias horas.

La descomposición del peróxido complejo da lugar a la formación de moléculas simples tales como CO, CO₂ y H₂O, principalmente.

4.2.- PROPIEDADES DE LOS CARBONES EN RELACION CON LA AUTOCOMBUSTION

Un carbón puede ser más ó menos susceptible a la autocombustión, dependiendo de determinadas propiedades que analizamos seguidamente.

4.2.1.- Rango

El rango del carbón es uno de los factores que determinan su susceptibilidad a la autocombustión, de manera tal que, como regla general, los lignitos presentan la susceptibilidad máxima, disminuyendo hacia las antracitas. Esta afirmación se basa en que en las pirólisis de los carbones de bajo rango:

- A temperaturas bajas (≈ 170 °C), se producen componentes volátiles ricos en hidrógeno con bajas energías de activación, cuya oxidación constituye una fuente de calor importante, y
- A temperaturas elevadas (≈ 300 °C), se producen radicales libres altamente reactivos que también se oxidan fácilmente liberando calor.

Naturalmente para la formación de estos componentes y su colaboración al proceso de autocombustión, es preciso alcanzar temperaturas muy por encima de 100 °C, por lo que el autocalentamiento inicial debe ser originado por otro tipo de procesos físico-químicos basados en otras propiedades del carbón.

4.2.2.- Volátiles

La referencia existente sobre la influencia del contenido en materias volátiles sobre la susceptibilidad a la autocombustión del carbón, son los ensayos sobre el particular

realizados por el antiguo Bergbau-Forschung sobre muestras de carbón provenientes de minas alemanas. En dichos ensayos, realizados a 40 °C, se midió la "velocidad de oxidación del carbón" ($\text{mgO}_2/\text{kg}\cdot\text{min}$), tras 10 h y 100 h de exposición al O_2 respectivamente. Los resultados se muestran en la figura 1.

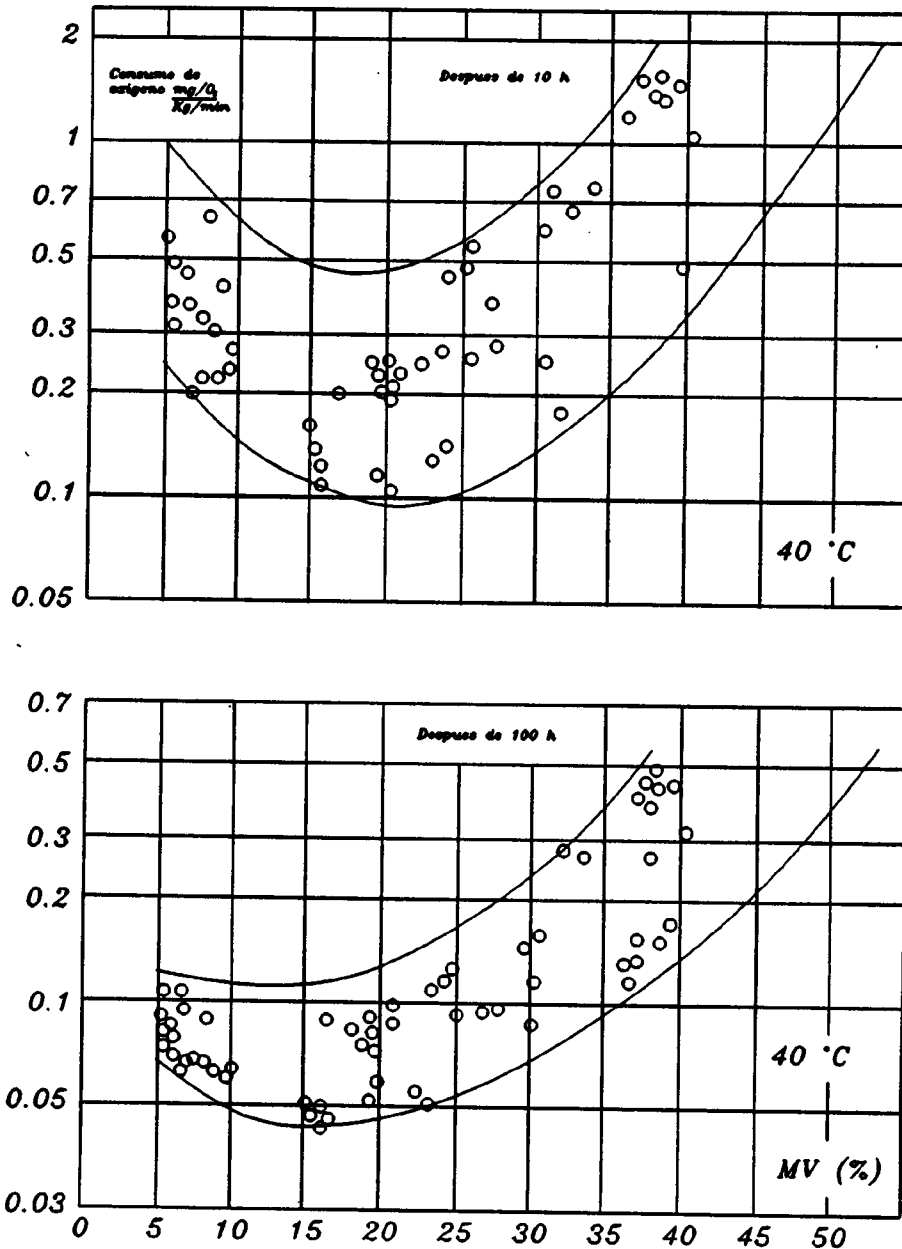


Figura 1.- Velocidad de oxidación en función del contenido en volátiles (MOP)

Como se observa la velocidad mínima corresponde a los carbones con un contenido en volátiles comprendido entre el 15% y el 25%, aproximadamente. Se aprecia también que con 10 h de exposición, las antracitas y las hullas con alto contenido en volátiles se comportan de forma análoga respecto al consumo de oxígeno (alta velocidad de oxidación), sin embargo tras 100 h las antracitas se "saturan" mientras que las hullas continúan su oxidación aunque con menor velocidad.

Este hecho confirma también que los carbones de bajo rango (lignitos o hullas subbituminosas) tienen una avidez superior por el oxígeno y por tanto una susceptibilidad mayor a la autocombustión.

También se observa que la velocidad de oxidación está directamente asociada al tiempo de exposición del carbón a la acción del oxígeno, resultando una función de \sqrt{t} .

Como se observa en la figura 2, la velocidad de oxidación disminuye en función del tiempo, siendo mayor esta disminución en los carbones de mayor rango.

La velocidad de fijación del oxígeno a una temperatura determinada, es mayor en el comienzo de la oxidación y va disminuyendo continuamente con el tiempo, según progresa la oxidación.

Durante la oxidación el carbón pierde propiedades de adsorción, disminuyendo el ΔP a medida que aumenta la oxidación y por lo tanto disminuyendo también su velocidad de oxidación.

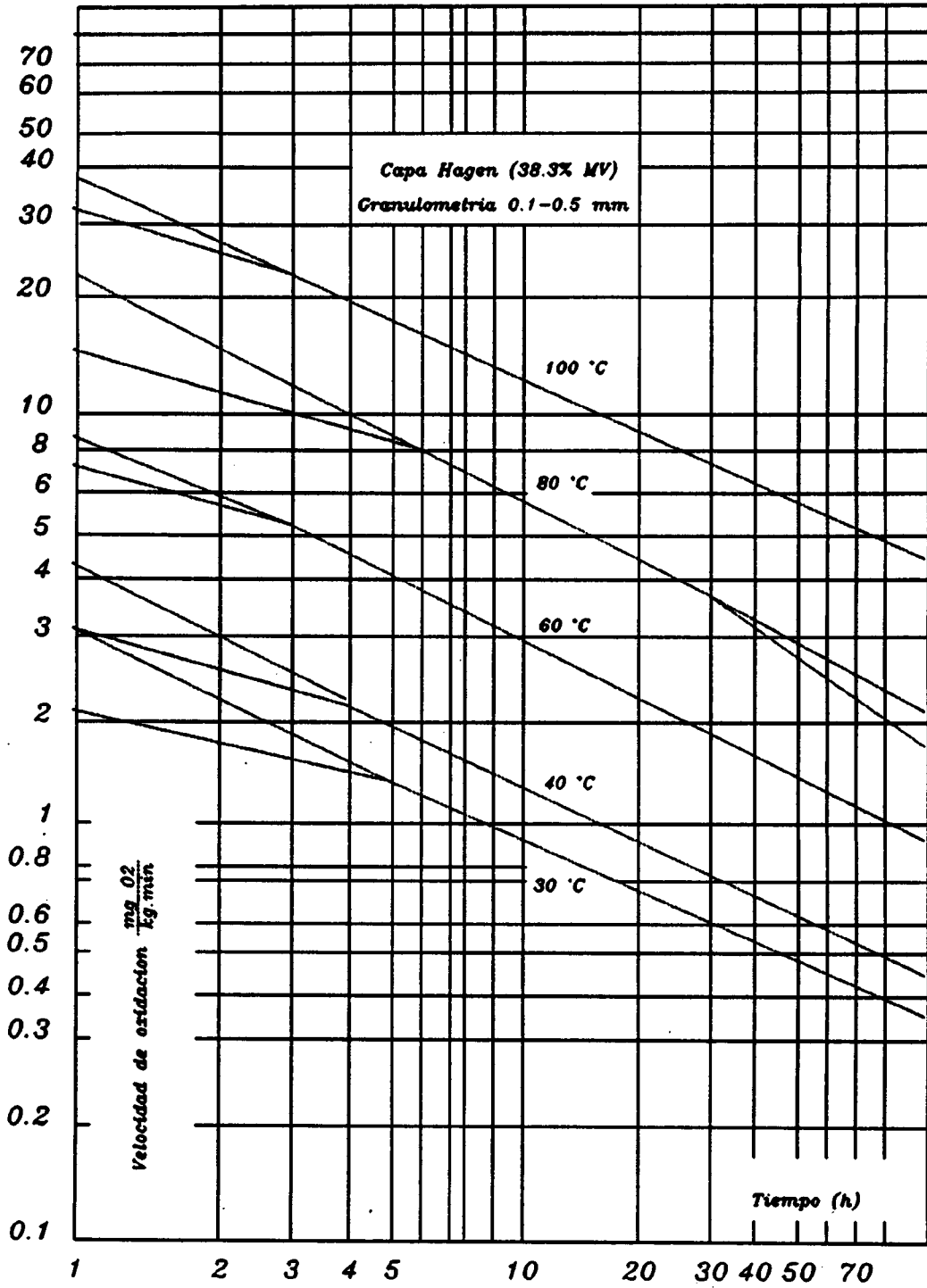


Figura 2.- Variación de la velocidad de oxidación en función del tiempo

4.2.3.- Constituyentes petrográficos

Ciertos macerales del carbón son más propensos a reaccionar con el oxígeno que otros, como es el caso de la fusinita y la vitrinita. La vitrinita es la más susceptible, mientras que la susceptibilidad de la fusinita aumenta con la temperatura.

Chamberlain y Hall estudiaron distintos grados de oxidación entre los grupos micropetrográficos de carbones ingleses. Los componentes micropetrográficos eran la inertinita, la exinita y la vitrinita. Cada uno de los componentes se calentó a 50, 100 y 150 °C en atmósfera de oxígeno. Las exinitas mostraron una reactividad mayor que los otros dos componentes.

La mayor velocidad de oxidación de la exinita mostró que podían servir como puntos del carbón favorables para la generación de calor.

La exinita tiene una relación hidrógeno/carbono mayor que otros macerales, por lo que puede ser más susceptible a la oxidación debido a la riqueza en hidrógeno.

También determinaron que la mayor parte del contenido de la exinita era la exudanita y que ésta reacciona fuertemente con la alteración térmica. Por ello la existencia de grandes concentraciones de exudanita y especialmente si está diseminada, puede contribuir a la tendencia del carbón a la autocombustión.

Pandolfo (1898) investigó la reactividad de los macerales y observó que la fusinita mostraba gran capacidad para adsorber vapor de agua a medida que progresaba la oxidación. En cambio la vitrinita mostraba un pequeño cambio.

4.2.4.- Granulometría

La velocidad de oxidación aumenta con la disminución de la granulometría del carbón. La explicación se encuentra en que para una misma cantidad de carbón, una menor granulometría tiene una mayor superficie activa para reaccionar con el oxígeno. La cantidad de oxígeno consumido por el carbón y el desprendimiento de calor correspondiente, depende de la magnitud de la superficie específica del carbón.

En la figura 3 se encuentra el resultado de las mediciones realizadas con muestras de hulla alemana de alto contenido en volátiles, de diferentes granulometrías.

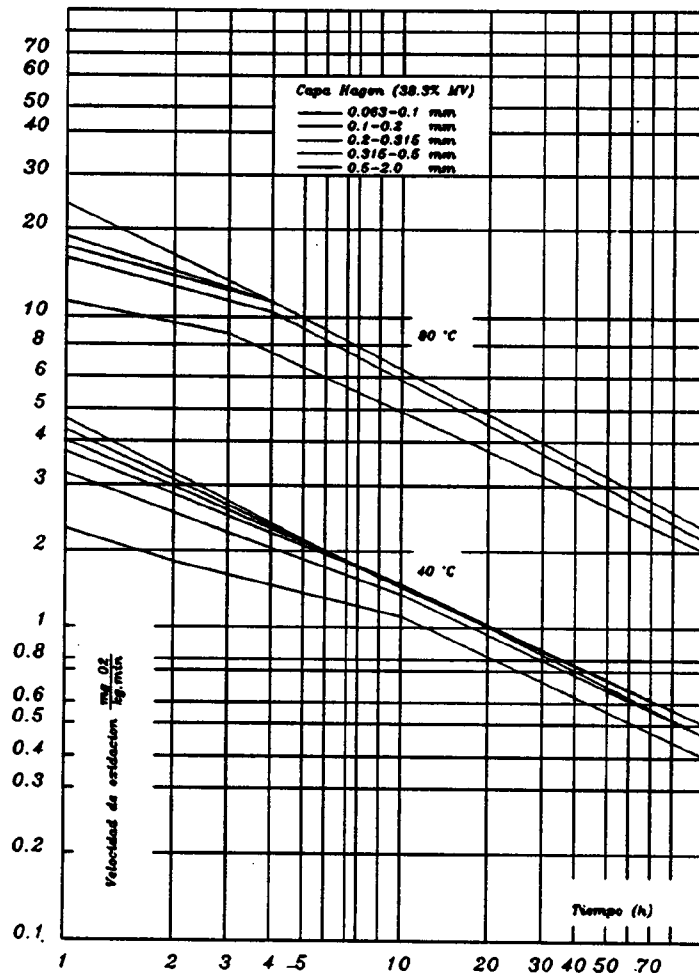


Figura 3.- Influencia del tamaño de grano sobre la velocidad de oxidación

Según Schmidt el grado de oxidación a baja temperatura, es proporcional a la raíz cúbica de la superficie específica.

Scott sin embargo, llegó a la conclusión que para tamaños mayores a 0,83 mm, la velocidad de oxidación es directamente proporcional al área superficial. Para tamaños menores, la porosidad del carbón permite el paso del oxígeno sin reaccionar.

4.2.5.- Pirita

El carbón contiene piritas, generalmente de hierro, con concentraciones que a veces superan el 13%. En un principio ya se sospechó que el calor producido en la oxidación de la pirita a temperatura ambiente era el causante del calentamiento espontáneo del carbón. Actualmente, ha quedado demostrado que la pirita presente en el carbón únicamente ayuda a que se produzca la oxidación de la materia carbonosa debido a la fracturación que produce en el carbón y el consiguiente aumento de la superficie libre expuesta al aire, y también por el aumento de temperatura producido por su propia oxidación.

Como ya mencionamos, para que la pirita contribuya al autocalentamiento del carbón, ha de presentarse finamente dividida y en proporciones superiores al 5%. Si se encuentra presente en forma de nódulos, cuñas, o en formas muy cristalizadas, contribuye muy poco al calentamiento inicial.

Por lo tanto, el contenido de pirita en el carbón favorece la reacción con el oxígeno y su oxidación acelera el proceso de calentamiento espontáneo. En la figura 4 se muestra la influencia del contenido en pirita sobre la velocidad de calentamiento con muestras de carbón de St. Georges.

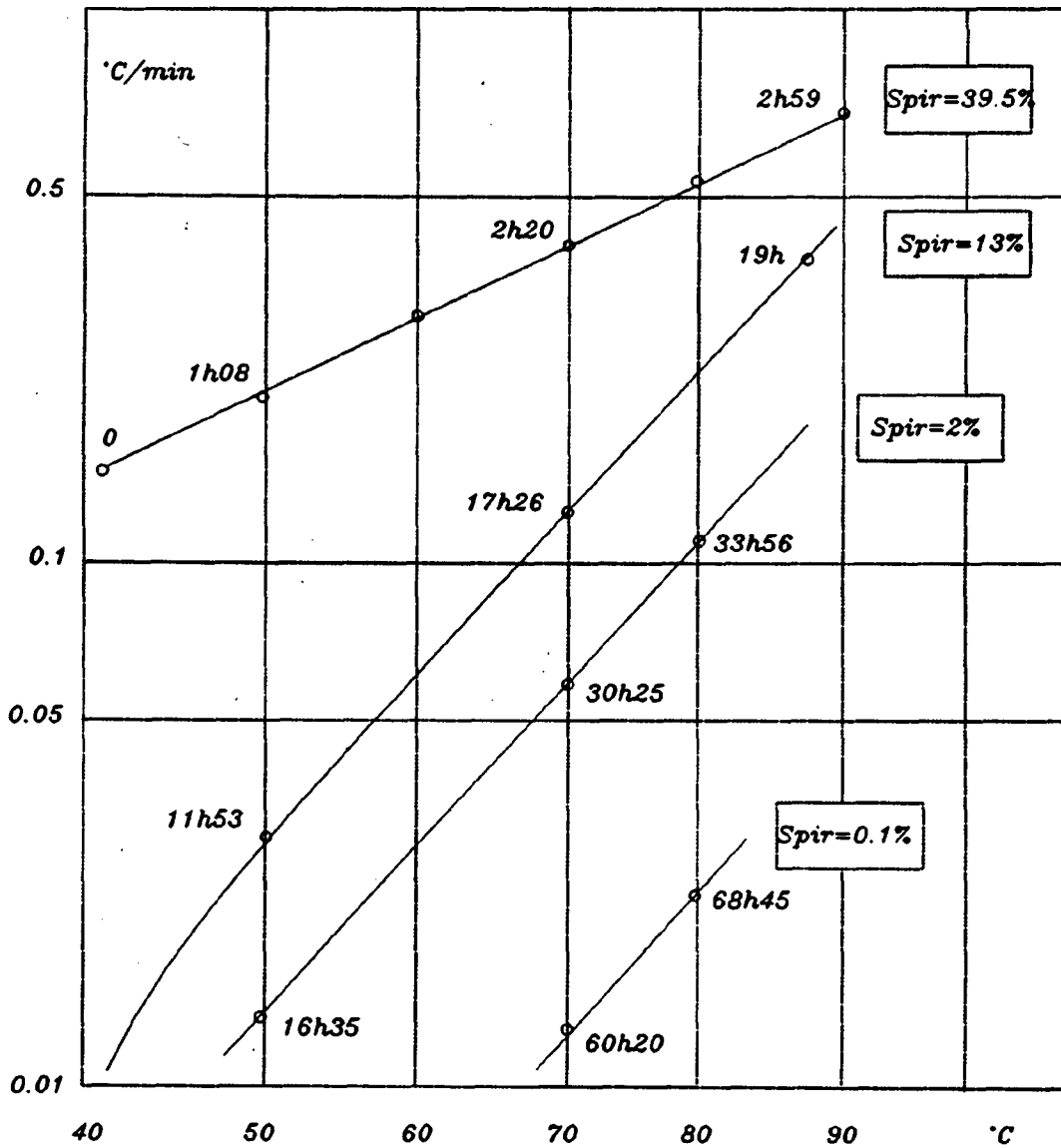


Figura 4.- Muestras de la capa Saint-Georges. Influencia del contenido en pirita sobre la velocidad de calentamiento (Diagrama de Arrhenius)

Se ha observado también el fenómeno de que el carbón sulfurado presenta una mayor reactividad frente al oxígeno, particularmente en presencia de óxidos de hierro. La presencia de iones alcalinos (Ca y K) puede neutralizar el efecto de la pirita.

4.2.6.- Humedad

Existen carbones que, sin presencia de pirita o en cantidades mínimas, son susceptibles sin embargo a la autocombustión. Este calentamiento puede ser debido a la fijación de humedad. La condensación del vapor de agua en los poros del carbón y en sus fisuras produce una liberación del calor latente de condensación. Este efecto produce un aumento de temperatura acelerando la reacción, a baja temperatura, hasta que el carbón se satura (figura 5).

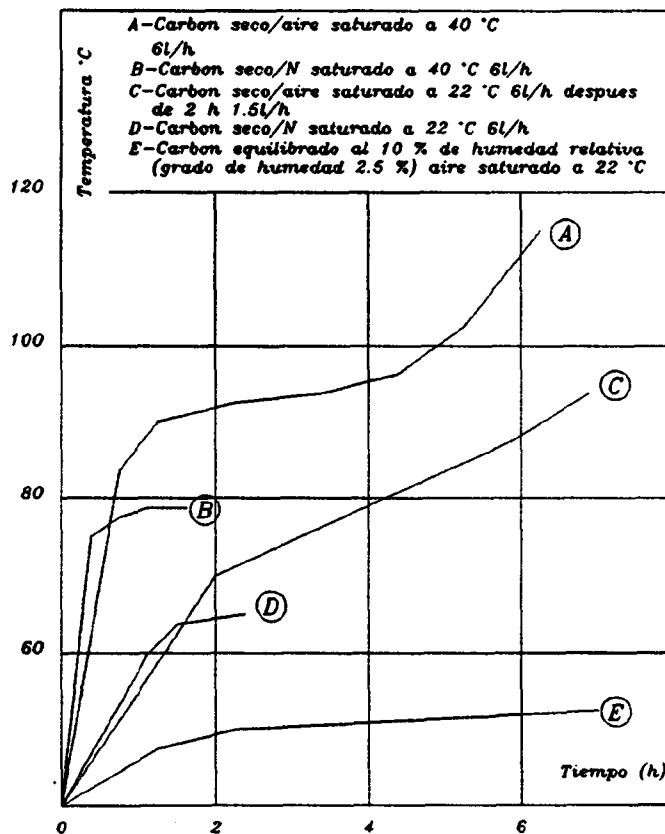


Figura 5.- Curva de calentamiento debido a la fijación de la humedad por el carbón

En ese momento la velocidad de reacción disminuye bruscamente pero vuelve a aumentar con el incremento de la temperatura; está relacionada con la velocidad de calentamiento y puede representarse en un diagrama de Arrhenius, obedeciendo a la ley $V = V_0 \cdot e^{-E/RT}$. En un principio, a temperaturas poco elevadas, el efecto de disminución de la velocidad en función del tiempo es mayor que el efecto del aumento de la velocidad en función de la temperatura. Por eso, en principio se observa una disminución de la velocidad de calentamiento hasta llegar a un punto en el cual la velocidad de calentamiento aumenta rápidamente.

Dependiendo del tipo de carbón, la fijación de la humedad será mayor ó menor. En la mina, esta circunstancia no es fácil que se dé ya que el carbón está en un punto muy próximo a la saturación y apenas puede fijar agua, a no ser que circunstancias especiales sequen el carbón. Este efecto ser muy peligroso y producir un calentamiento muy rápido ya que el calor latente de condensación del agua es de 582 Cal/gr a 25 °C.

En cuanto a la humedad del carbón, se ha observado en pruebas realizadas con lignito, que existe un mayor incremento en el contenido de radicales libres en una oxidación en ambiente seco que en ambiente húmedo, por lo que la humedad no hace más reactivo el lignito.

Polat y Hasris (1986) examinaron la oxidación de un lignito a 35 °C. Se observó que la velocidad de reacción disminuyó 10 veces.

No había ninguna disminución de oxígeno que lo explicara, por lo tanto debía achacarse a la disminución de espacios en los que reaccionar. Esto indicaba que la oxidación producía inhibidores de la reacción. Los dos posibles inhibidores podrían ser el agua y el CO₂. Se pensó que las moléculas de agua podrían ocupar los espacios en los cuales reaccionaba el oxígeno.

Por otra parte, un carbón almacenado expuesto a una atmósfera del 80% de humedad relativa es más reactivo que al 40%. Ambas muestras estaban a 80 °C y eran menos reactivas que el carbón fresco.

Así, la mayor humedad en el almacenamiento parece conservar la reactividad del carbón para su posterior oxidación.

Este comportamiento se explica porque la meteorización durante el almacenamiento reduce la reactividad pero esto se compensa parcialmente por el incremento de la reactividad inducido por el contenido en humedad. Una explicación más simple es que la humedad inhibe la oxidación a baja temperatura.

El incremento de la reactividad puede ser aparente, ya que podría ser debido a la disponibilidad de espacios para reaccionar antes de ser protegidos por la humedad.

Muy peligrosas son las zonas de la mina en las que ha habido una invasión de agua y después una desecación, debido a que quedan más superficies frescas para su reacción con el oxígeno.

5.- FUEGOS EN MINAS

5.1.- ORIGEN DE LOS FUEGOS

Como hemos visto anteriormente, la autocombustión comienza con la adsorción del oxígeno por parte del carbón, en un proceso físico-químico que rápidamente se transforma en una reacción química exotérmica, por la cual se produce un lento calentamiento del carbón, si la cantidad de calor producida en la masa de carbón expuesta al aire es superior a la cantidad de calor disipada por intercambio de masa de carbón con el ambiente. En general, para que se produzca la autocombustión de un carbón tienen que darse simultáneamente las siguientes circunstancias:

- 1ª) que el carbón sea susceptible a la autocombustión,
- 2ª) que exista un aporte de oxígeno suficiente,
- 3ª) que exista un contacto superficial con el oxígeno,
- 4ª) que existan unas condiciones térmicas apropiadas, y
- 5ª) que haya un tiempo suficiente para que la reacción, en principio lenta, progrese hasta alcanzar la temperatura crítica.

El tiempo que transcurre entre el momento en que el carbón se expone a unas condiciones favorables al autocalentamiento y el punto en el que se alcanza la ignición se le denomina "Periodo de Incubación". No obstante, si las condiciones de explotación de la mina no permiten la acumulación de calor en la masa de carbón, el calor liberado en la interacción carbón-oxígeno se disipará. Pronto, el carbón, o mejor dicho la superficie afectada del carbón, alcanza el estado de saturación, en el cual cesa su interacción con el oxígeno a temperatura ambiente. El carbón, se dice que está entonces "Meteorizado" presentando un poder calorífico y unas propiedades de coquización inferiores al carbón fresco.

De lo anterior se desprende que con carbones susceptibles las condiciones de ventilación de las labores tienen una importancia trascendental en la aparición de los fuegos, dado que tanto el aporte de oxígeno necesario para la oxidación del carbón como la disipación del

calor generado en la misma, dependen del caudal y la velocidad de la corriente de ventilación. Naturalmente, el control estricto de las condiciones de ventilación, en todos los puntos de la mina es imposible, por lo que la marcha de los trabajos, teniendo en cuenta las condiciones geológicas del yacimiento y el método de explotación aplicado, resulta decisiva en la prevención de los fuegos.

Desde el punto de vista de la aparición de focos de autocombustión en las minas, digamos que se localizan preferentemente en:

1. La zona del postaller de los tajos largos o cortos recorridos por la corriente principal de ventilación (figuras 6a y 6b), debido a la debil corriente de aire que circula a través de dicha zona y a la existencia en la misma de carbón arrancado no recuperado. La posibilidad de aparición de fuegos en esta zona es superior en los tajos en avance que en los tajos en retirada, y, superior también, en los tajos verticales (figura 7) con relación a los horizontales.

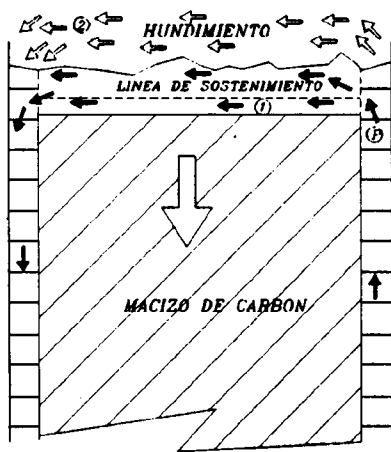


Figura 6a.- Tajo en retirada

- (3) : Corriente principal de ventilacion.
- (1) : Corriente de aire en el frente.
- (2) : Corrientes de aire en el postaller

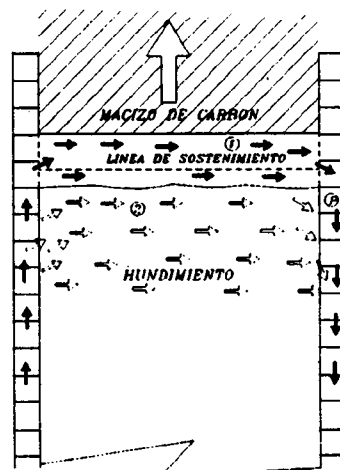


Figura 6b.- Tajo en avance

- (3) : Corriente principal de ventilacion.
- (1) : Corriente de aire en el frente.
- (2) : Corrientes de aire en el postaller.

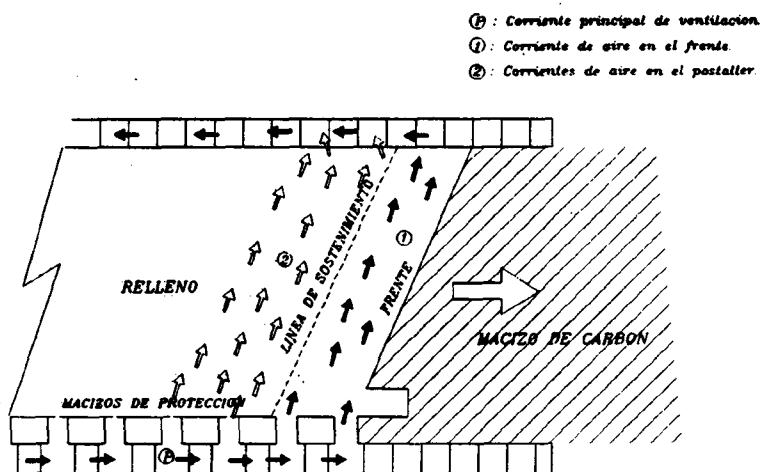


Figura 7.- Tajo inclinado en avance

2. La zona del postaller de los talleres de sutiraje (figura 8), cuando se comunican dos niveles contiguos para aproximar la ventilación principal a los frentes en fondo de saco, debido también a la débil corriente de ventilación que circula a través del hundimiento, hacia el pozo o rampa la comunicación con el nivel superior.

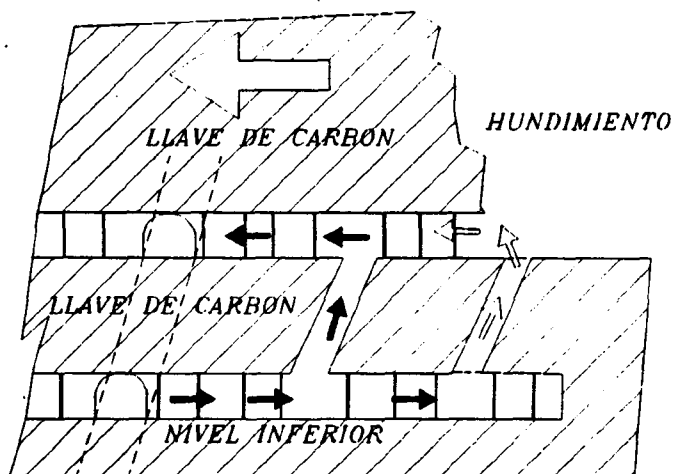


Figura 8.- Subniveles con pozos de comunicación

3. La zona de hundimiento de los paneles explotados por subniveles y sutiraje (figura 9), cuando no se tabican los niveles una vez finalizada la explotación en retirada.

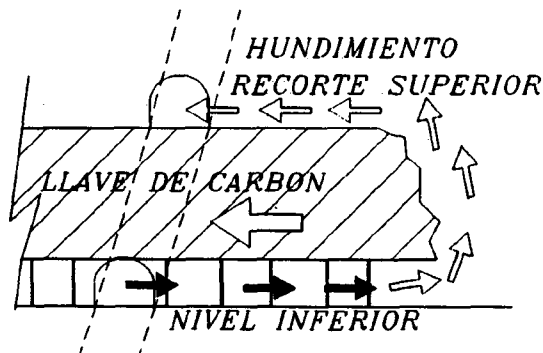


Figura 9.- Subniveles convencionales

4. Las campanas originadas por la rotura y el desprendimiento del carbón en las galerías en capa (figura 10), debido a la imposibilidad de un barrido eficaz por la corriente de ventilación.

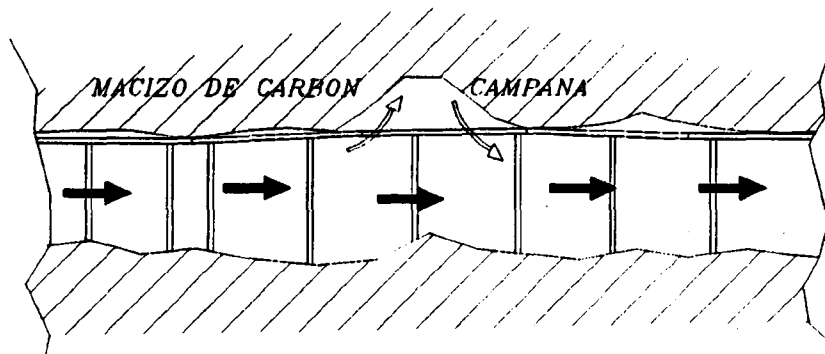


Figura 10.- Campanas en galerías de carbón

5. Las labores en carbón, abandonadas, mal tabicadas o sin ventilación forzada, por la razón apuntada anteriormente de una ausencia de barrido por la corriente de ventilación.
6. Los estrechamientos de las galerías en carbón originados por las presiones del terreno (figura 11), y los cambios de dirección de la ventilación principal en dichas labores, debido a la corriente de aire que se establece a través del carbón fisurado.

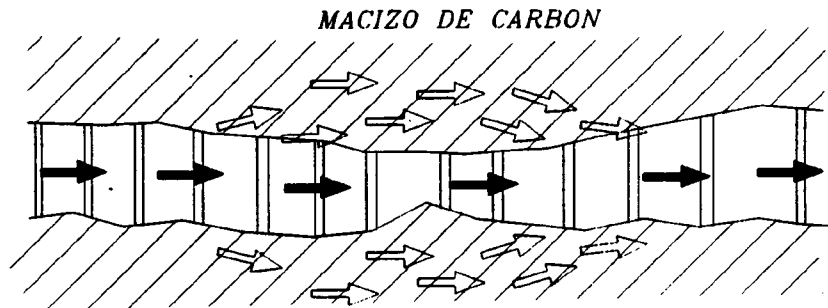


Figura 11.- Estrechamientos de las galerías de carbón

7. Los tabiques y puertas de aislamiento o de regulación de la ventilación, situados en labores en carbón (figura 12), debidos también a la causa apuntada anteriormente.

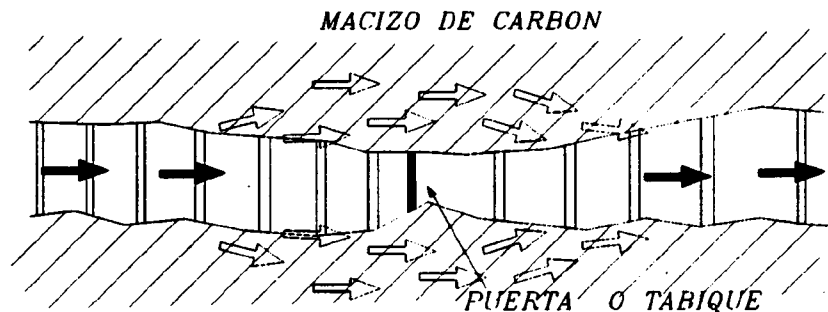


Figura 12.- Puertas y tabiques de aislamiento y regulación

8. Las acumulaciones de carbón, principalmente en el piso de las galerías, originadas por los reboses en los medios de transporte o deficiencias en los sistemas de carga o transferencia.

Como se aprecia la mayor parte de los puntos donde se localizan las autocombustiones, están relacionadas con la circulación de corrientes de aire muy débiles, a través de zonas de hundimiento con presencia inevitable de carbón arrancado no recuperado, o a través de pilares y paramentos de carbón fisurados por efecto de las presiones del terreno.

5.2.- INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES GEOMINERAS

5.2.1.- Factores geomineros que intervienen

La valoración del riesgo de aparición de fuegos en una mina de carbón, objeto de numerosas metodologías, todas ellas basadas en la consideración de diversos factores inherentes al yacimiento, al método de explotación aplicado y al desarrollo de los trabajos en el interior (Método de Olpinski et al. desarrollado en Polonia, de Feng et al. desarrollado en Canadá y de Banerjee et al. desarrollado en la India).

Con motivo de la redacción de la ITC del R.G.N.B.S.M. sobre clasificación de las minas subterráneas de carbón por su propensión a los fuegos, se analizaron y propusieron sucesivos métodos de clasificación basados en las teorías mencionadas anteriormente, pero adaptándolas a las condiciones de nuestras minas de carbón y a la experiencia sobre los fuegos existentes en las mismas. En el documento propuesto por el grupo de trabajo encargado de su redacción (Anexo 27) la clasificación de un cuartel o de una mina como propensa a los fuegos, se basa en la existencia de antecedentes de autocombustiones en las labores, en las condiciones actuales del yacimiento y con el método de explotación aplicado, o de fuegos antiguos. Por otro lado, a las labores clasificadas como con propensión a los fuegos, se establece la obligatoriedad de asignar un nivel de riesgo (bajo, moderado o alto) en función de un índice de riesgo IR que se obtiene de la valoración objetiva y subjetiva de los siguientes factores geomineros que participan fundamentalmente en la generación de un fuego:

1. Categoría del carbón
2. Reactividad
3. Friabilidad
4. Potencia de la capa
5. Anomalías geológicas. Fallas y discontinuidades
6. Naturaleza de los hastiales
7. Método de explotación

8. Sistema de laboreo
9. Conducción de la explotación
10. Grado de extracción
11. Velocidad de avance del frente
12. Ventilación
13. Humedad de las labores en carbón
14. Acumulación de finos de carbón
15. Macizos de protección de labores en carbón

Los tres primeros factores contemplan propiedades del carbón, los tres siguientes se refieren a condiciones geológicas del yacimiento y los restantes al desarrollo de las labores en carbón. Todos ellos han sido establecidos y valorados en cuanto a su contribución al riesgo de aparición de fuegos, en base a la experiencia en las explotaciones españolas de carbón.

5.2.2.- Propiedades del carbón

La categoría del carbón, que se refiere naturalmente al rango, contempla una contribución al riesgo alta (A) en los lignitos y baja (B) en las hullas y antracitas.

La reactividad del carbón, se refiere a su capacidad para adsorber el oxígeno y reaccionar químicamente con él. Su contribución al riesgo se determina a partir del índice del agua oxigenada (I) y el contenido en azufre pirítico (S), resultando alta si $I > 10$ y $S > 2\%$ y baja si $I \leq 10$ y $S \geq 2\%$. La friabilidad se entiende por la mayor o menor facilidad del carbón para desmenuzarse, siendo su contribución al riesgo alta o baja dependiendo del resultado del ensayo normalizado propuesto.

En definitiva, el primer parámetro recoge el conjunto de los resultados experimentales ya comentados, que demuestran que los carbones de bajo rango presentan la máxima tenden-

cia al autocalentamiento y los dos parámetros siguientes se refieren a propiedades del carbón que determinan, en gran medida, su capacidad de oxidación:

- a) la reactividad, obtenida a partir del índice de Maciejasz o del agua oxigenada y del contenido en azufre pirítico, y
- b) la friabilidad que se relaciona con la mayor o menor superficie específica del carbón disponible para la adsorción del oxígeno.

5.2.3.- Condiciones geológicas

5.2.3.1.- Potencia de la capa

La potencia de la capa explotada influye en el riesgo de aparición de fuegos, siendo su contribución más alta en las capas potentes (más de 4 m según lo establecido en el borrador de ITC comentado). La explicación se encuentra en que el grado de recuperación del carbón disminuye apreciablemente en el laboreo de las capas potentes, dando lugar a la existencia de carbón residual, que puede quedar en contacto con una débil corriente de ventilación (carbón residual en el hundimiento, o en pilares, o al techo y/o al muro de la capa, o simplemente depositado en el piso de labores ya explotadas).

5.2.3.2.- Anomalías geológicas

Las anomalías geológicas de las capas, sobre todo las fallas, originan zonas de concentración de tensiones que dan lugar a que el carbón se encuentre muy fracturado y por lo tanto con vías de penetración del aire y con mayor superficie específica para la adsorción del oxígeno. Por otro lado, en las zonas de falla suelen ralentizarse los trabajos mineros, favoreciendo el efecto anterior.

5.2.3.3.- Pendiente de la capa

En capas inclinadas, el control de la combustión espontánea resulta complicada debido a las diferencias de temperatura debidas a la convección de las corrientes de aire en el postaller.

Además, en el postaller hay que tener en cuenta que existe una corriente adicional debido a las diferencias de densidad del metano, CO₂ y N₂. El caudal inducido aumenta la posibilidad de combustión espontánea en el postaller.

La existencia de fugas peligrosas hacia el postaller depende de la estanqueidad del relleno de estériles y ésta a su vez de la presión de la explotación. Por regla general, la presión de la explotación es mayor en los yacimientos horizontales que en los inclinados, por lo que el peligro de la formación de un fuego en el postaller es mayor en los yacimientos desde semiinclinados a inclinados. Si se rellena el postaller, los productos más finos se deslizan lentamente mientras que los trozos gruesos ruedan y rellenan el espacio superior que es el existente entre el talud y el techo. Debido a la pequeña presión de la explotación, esta capa de trozos gruesos forma en las inmediaciones del techo durante largo tiempo un paso para las corrientes piratas que pueden llegar a ser peligrosas.

5.2.3.4.- Características del hundimiento

Las características de las capas que existen a techo de las de carbón pueden influir considerablemente en la probabilidad de una combustión espontánea así como su control.

Dependiendo de las características de los hastiales, las presiones sobre la capa de carbón pueden ser mayores ó menores y esto influye en la fracturación del carbón. Además, si los hastiales son friables, el hundimiento será mejor y cerrarán mejor el hueco.

Para reducir al mínimo las corrientes de aire dentro del postaller, será importante que se rellene con un material lo más fino posible y de un tamaño uniforme. El material ocupa gran volumen y rellena el hueco.

Sin embargo, la presencia de material carbonoso en el hundimiento del techo puede forzar la combustión espontánea.

5.2.3.5.- Carboneros

Si existe un carbonero a techo de la capa que se está explotando, al producirse el hundimiento, el carbonero aporta carbón al postaller. Además durante la explotación pueden existir fisuras que aporten aire a los carboneros.

5.2.3.6.- Friabilidad del carbón

Los carbones que son friables tienden a producir finos de carbón, por lo que debido a las grandes superficies para reaccionar, tienen una mayor tendencia a la combustión espontánea.

5.2.3.7.- Profundidad de la capa

La profundidad de la capa puede ser un factor de riesgo porque a mayor profundidad hay una mayor temperatura. La temperatura en la tierra aumenta 1 °C cada 33 m de profundidad.

Además, al tener un recubrimiento mayor se produce una mayor fracturación en la capa por lo que aumenta su riesgo de autocombustión.

Por otra parte, si el recubrimiento es pequeño, o lo que es igual, si hay poca profundidad, también existe un riesgo debido a que sería más fácil la entrada de aire desde la superficie a la capa, a través de las posibles fisuraciones.

5.2.4.- Factores mineros

La experiencia de la minería del carbón española demuestra que cuando se trata de la explotación de capas de carbón propensas a los fuegos, la disposición de las labores de infraestructura y acceso a las capas, el método de explotación aplicado, las condiciones de ventilación y el desarrollo de los trabajos en el interior, juegan un papel fundamental en la disminución e incluso la eliminación de los fuegos.

5.2.4.1.- Labores de infraestructura y acceso a las capas

Como hemos expuesto anteriormente, para que en una capa de carbón con propensión a la autocombustión se produzca un fuego, es necesario el contacto con el oxígeno del aire. Por lo tanto, cuanto menor sea la superficie de carbón descubierta menor será el riesgo de aparición de un fuego. En consecuencia, la realización de todas las labores de infraestructura y acceso a las capas en carbón, incrementará la probabilidad de aparición de fuegos en la zona de carbón fisurado que inevitablemente rodea a la excavación realizada.

Por otro lado, al guiar la corriente de ventilación íntegramente por labores en carbón, surgen los problemas relacionados con las puertas de aislamiento y regulación, y con los cambios de dirección de dicha corriente de ventilación.

Naturalmente hablamos en términos de incremento de la probabilidad de la aparición de fuegos, ya que en numerosos casos, la meteorización del carbón, el efecto de refrigeración de una buena ventilación principal y la cubrición de los hastiales con los medios de

sostenimiento, contribuyen a paliar ese incremento del riesgo. No obstante, este factor referente a la disposición de las labores de infraestructura y acceso no está contemplado en el cuadro de determinación del nivel de riesgo incluido en la propuesta de ITC comentada.

5.2.4.2.- Metódos de explotación

Con relación a los métodos de explotación, la causística revela que las labores de arranque de carbón en fondo de saco presentan menos riesgo con relación a los fuegos que los talleres recorridos por la corriente principal de ventilación. Las explotaciones por subniveles, con galerías y pozos de apoyo en roca son menos favorables a la presencia de un fuego que si son trazadas con carbón.

En los métodos de explotación con talleres recorridos por la corriente principal de ventilación, los tajos en avance se han mostrado más favorables a la aparición de fuegos que los tajos en retirada, debido sin duda a la existencia de fugas mayores de ventilación a través del hundimiento.

El método de sutiraje en las capas potentes es menos propenso a fuegos que los métodos antiguos, a pesar de la recuperación parcial del carbón ya que los métodos, como el tajo largo, conducen a numerosas situaciones que facilitan la penetración del aire en el carbón del hundido. Por otro lado, el hundimiento del postaller introduce un riesgo mayor que si el tratamiento del mismo se realiza con relleno. La utilización del relleno puede no ser suficiente para garantizar la estanqueidad del taller si su asentamiento es irregular, pudiendo favorecer las infiltraciones de aire en el postaller.

Si el taller tiene una pendiente inferior a $45 - 50^\circ$, al asentarse el relleno, puede dejar un paso de aire por la zona entre el techo y el relleno. El relleno hidráulico permite una mejor estanqueidad dejando totalmente hermética la zona explotada.

La utilización de pilares de carbón y su abandono, implica siempre un riesgo adicional importante.

Una mayor longitud en los subniveles de carbón es más propensa a la aparición de fuegos debido a la aparición de campanas, a la fracturación del carbón y a la larga exposición del carbón al oxígeno.

Si una mina es grisosa, la desorción del grisú en el postaller puede crear una atmósfera que impida el desarrollo de una combustión espontánea. El grisú contribuye a reducir el riesgo eliminando el oxígeno en la zona explotada.

Un avance rápido del frente y de una forma regular, disminuye los riesgos de autocalentamiento en el carbón abandonado en el postaller. Una relentización excesiva de la velocidad de arranque, o una parada prolongada, como un periodo de vacaciones o en el desmantelamiento de un taller, puede llevar a una situación peligrosa.

En un explotación por subniveles, se puede combatir un fuego renunciando a la recuperación del carbón en esa zona y tabicando el recorte. Por lo tanto, es menos problemático un fuego en una explotación por subniveles que en una de tajo largo.

5.2.4.3.- Ventilación

Las corrientes de aire piratas se deben a la caída de presión del aire que genera el ventilador principal y los ventiladores secundarios.

De la corriente de aire para la ventilación de la mina se desvían, en relación con la resistencia de la parte explotada, corrientes de aire furtivas que atraviesan el carbón y que pueden inducir un calentamiento espontáneo. Por lo tanto, hay que impedir estas corrientes en las zonas donde existe carbón.

Existe un determinado intervalo de velocidades críticas de las corrientes piratas por las que el carbón tiene un proceso de autocombustión.

Este intervalo de velocidad crítica de las corrientes piratas actúa aportando continuamente oxígeno al foco que se está oxidando pero que no es lo suficiente como para retirar el calor producido por lo que la temperatura va ascendiendo hasta alcanzarse el punto de comienzo de la combustión espontánea.

El peligro de fuego se ha de eliminar disminuyendo la caída de presión en las proximidades de los lugares peligrosos.

Para disminuir la caída de presión que crea la explotación adyacente en la zona ya explotada se consigue con una planificación de la explotación y sus dispositivos que se ocupan de la técnica de ventilación con vistas a implantar y mantener en la zona ya explotada la caída de presión menor posible; o se aumenta la resistencia de la zona explotada de tal manera que la caída de presión disponible no sea suficiente para hacer fluir por la zona explotada las corrientes de aire piratas necesarias para provocar la combustión espontánea.

Las dos posibilidades aportan ventajas adicionales. Las pérdidas de ventilación se reducen de modo importante y queda disponible para el propio tajo la totalidad de la cantidad de aire conducida a la explotación. Con ello se mejoran mucho las condiciones climáticas del tajo.

5.2.4.3.1.- Influencia de los fuegos sobre la ventilación

Cuando existe un fuego de mina abierto, el volumen del aire aumenta alrededor de 3,8 veces debido al calentamiento producido.

Este aumento de volumen produce una estrangulación, en toda la instalación minera, de la corriente de aire.

Por otra parte, la disminución de la densidad del aire produce un aumento del empuje ascensional del aire en las instalaciones verticales e inclinadas de la mina.

Estos dos efectos, estrangulación y aumento del empuje, son opuestos por lo que la acción de un fuego sobre la ventilación no puede aumentar ilimitadamente sino que alcanza un máximo. El efecto ascensional del aire del fuego en las instalaciones verticales e inclinadas puede ser considerable.

El fenómeno que se observa de la retención de humo y llamas por los muros en el lado de entrada de un fuego abierto, que va contra la dirección del aire, no es una inversión verdadera, sino que se atribuye a la estrangulación por el aumento de volumen de aire y a una especie de formación de capas a consecuencia de la menor densidad del aire del fuego.

El efecto ascensional del fuego en las instalaciones mineras inclinadas o verticales puede conducir a variaciones en la cantidad y hasta en la dirección del aire. Las variaciones en la cantidad del aire pueden llevar a notables peligros en los fuegos en minas que contienen grisú por el aumento del peligro de explosión; las variaciones de la dirección del aire conducen a importantes peligros en todas las minas.

Esta posible inversión de la ventilación se puede explicar de la siguiente manera: Si existen dos ramas en paralelo, siendo h la depresión entre A y B (figura 13)

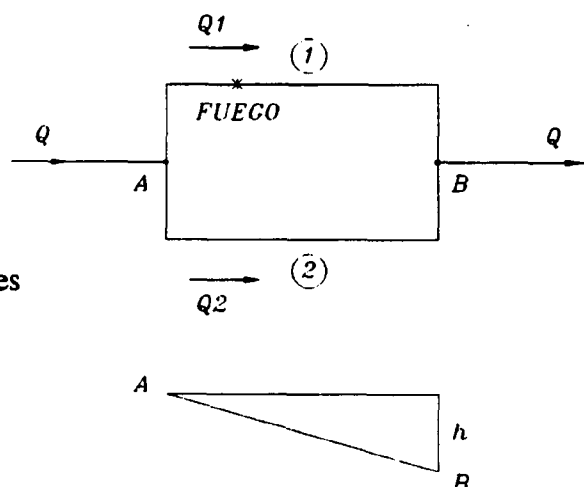


Figura 13.-Condiciones normales

entonces $h = R_1 \cdot Q_1^2 = R_2 \cdot Q_2^2$ y $Q = Q_1 + Q_2$

el aumento del empuje debido al fuego, crea una sobrepresión y resultará la depresión h'

luego en estas condiciones (fig. 14)

$$h' + a = R_1 \cdot (Q'_1)^2 \text{ y } h' = R_2 \cdot (Q'_2)^2$$

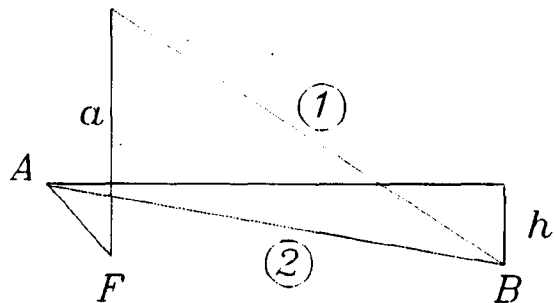


Figura 14.- Sobrepresión debida al fuego

$$Q'_1 > Q'_2$$

Si esa sobrepresión fuese muy fuerte, la depresión h' se podría hacer negativa y el aire en el circuito 2 circularía de B a A (figura 15) y el caudal que pasaría por el circuito 1 sería

$$Q'_1 = Q + Q'_2$$

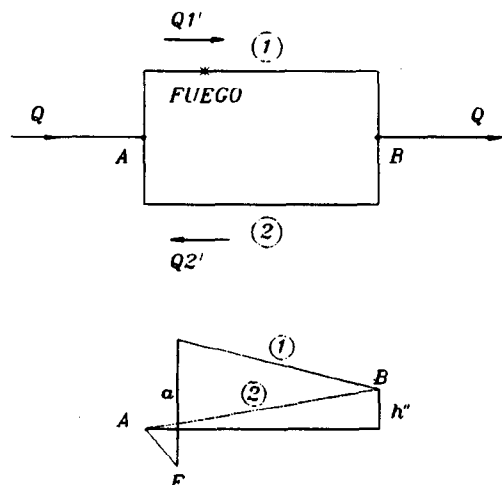


Figura 15.- Inversión de la ventilación

Con la conducción ascendente se fortifica la acción del empuje del fuego pero con la conducción descendente hay un desequilibrio y hay que tomar medidas para la estabilización de la cantidad y dirección del aire.

Sea la conducción ascendente o descendente, si existe un fuego debería mantenerse la corriente y dirección del aire original.

Para esto debe mantenerse inalterada la generación de presión en el ventilador principal y los secundarios para conservar lo más posible la caída de presión. Por lo tanto, no deben desconectarse los ventiladores.

Las conducciones de aire comprimido y de aspiración de gas deben cerrarse. Al cerrar estas conducciones se evita que el aire comprimido y el grisú fluyan al fuego por la destrucción de las tuberías.

La presencia de fuego hace aumentar la corriente de aire en ventilación ascendente. Si se comprueba que la corriente de aire que tira hacia el fuego (Q_1), aumenta, se debe estrangular esta corriente entre el foco de fuego y la última bifurcación en el lado de entrada al fuego, es decir, actuando sobre R_1 . Esa estrangulación tiene como objetivo ajustar la corriente original.

Si se comprueba que la corriente de aire que tira hacia el fuego disminuye notablemente, debe llevarse esta corriente de aire a la magnitud original por estrangulación en las galerías paralelas aumentando R_2 . De esta manera puede impedirse una inversión de la ventilación. Al estrangular estas zonas hay que tener en cuenta que no aparezca un contenido de grisú peligroso.

En determinadas circunstancias puede llegar a ser necesario accionar el ventilador principal con mayor producción de presión.

Una inversión de la dirección del aire, en minas con gas, supone un peligro de explosión.

5.2.4.3.2.- Efectos en la ventilación ascendente y descendente

Al comparar los efectos que se producen, dependiendo de que la ventilación sea ascendente o descendente, se pueden considerar distintos aspectos.

En ventilación ascendente, se aumenta el contenido de oxígeno constituyente del aire que activa el fuego debido a su efecto aeromotriz. Este efecto desestabiliza el sistema de ventilación y es tanto mayor cuanto mayor es la columna vertical que tiene encima.

En cambio, si la ventilación es descendente, se reduce el contenido de oxígeno debido a la disminución de la corriente de aire. Esta reducción de corriente de aire es debida a un efecto contramotriz que tiene sentido opuesto al de la ventilación y puede incluso invertir su dirección debido a la fuerza de los gases producidos y se crea una capa de humo y gases calientes en el techo que circula contraria a la dirección de la ventilación y actúa contra la caída de presión existente.

Los fuegos, en este tipo de ventilación, se propagan más lentamente que en ventilación ascendente y se pueden producir mayores cantidades de CO, sobre todo si desaparece la llama y se forman brasas. Las temperaturas de los gases a la salida del fuego están comprendidas entre 200 °C y 400 °C si la ventilación es descendente, y de unos 800 °C si la ventilación es ascendente.

Con respecto a la inversión de la ventilación, si el tiro es suficientemente fuerte puede llevar a la inversión de la dirección del aire en los pasos de aire paralelos, en el caso de ventilación ascendente, sin invertirse en el taller incendiado.

Si la ventilación fuese descendente, la inversión podría ocurrir en el taller con fuego y no en las ramas paralelas.

Para estabilizar la ventilación se pueden colocar frenos para disminuir al máximo la carga aeromotriz anormal del fuego y suprimir los riesgos de inversión de la ventilación.

Estos frenos son resistencias para estabilizar la ventilación como son puertas, tabiques, o la actuación sobre los ventiladores. En ventilación ascendente, el freno se ha de colocar en la corriente de ventilación antes del fuego, de esta manera se impide la inversión en los ramales paralelos.

En ventilación descendente, el freno debe colocarse en las labores paralelas para mantener la ventilación en el tajo.

5.3.- PREVENCIÓN, DETECCIÓN Y LUCHA CONTRA EL FUEGO

5.3.1.- Medidas de prevención

5.3.1.1.- En relación con las galerías en capa

El calentamiento espontáneo se debe al aporte de oxígeno al carbón fisurado produciendo calor.

Los medios para luchar contra el riesgo de combustión espontáneo deben ir buscando la desaparición de corrientes piratas que acceden al carbón para su reacción.

En primer lugar, las galerías abiertas en carbón tienen ese riesgo de autocalentamiento y además tienen un largo periodo de exposición al oxígeno de la ventilación.

En estas galerías los fuegos suelen ocurrir en los techos. Al ir avanzando estas galerías, debido a las presiones ejercidas por el terreno, el carbón comienza a desmenuzarse pudiendo provocar la formación de campanas. Estas campanas pueden ser un foco de fuego ya que el carbón está fisurado y la corriente de ventilación puede no llegar a evacuar todo el calor producido por la oxidación en esa zona (figura 16).

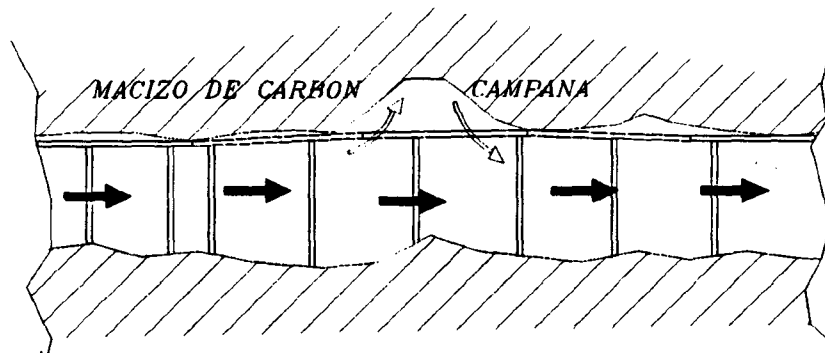


Figura 16.- Campanas en galerías de carbón

Estas campanas deberían evitarse con un buen sostenimiento y enrachonado que no permita la caída masiva de carbón.

En el caso de presencia de campanas, deberían hacerse estancas con un material no inflamable y hermético como puede ser la espuma Isoschaum.

Además de esto, en las galerías cualquier cambio brusco de sección, como pueden ser puertas de regulación de ventilación (figura 17), o estrechamientos (figura 18) por presiones del terreno puede crear corrientes piratas.

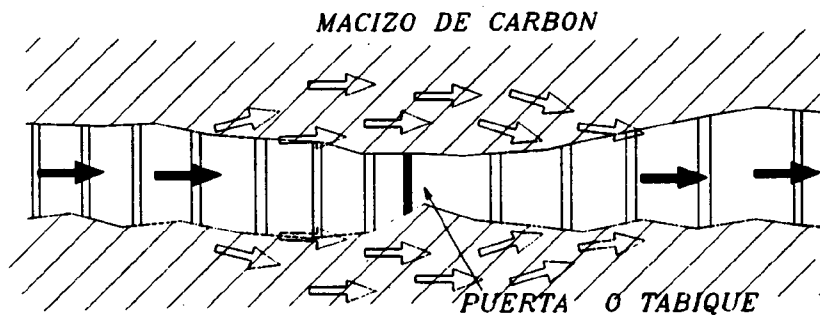


Figura 17.- Puertas y tabiques de aislamiento o regulación

Debido a estas resistencias una parte de la corriente de ventilación penetra en el carbón.

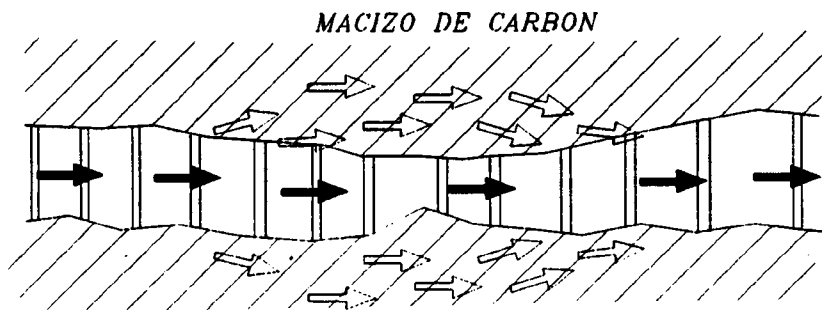


Figura 18.- Estrechamientos en capas de carbón

Después de haber franqueado el obstáculo, estas fugas se incorporan a la corriente principal debido a la menor presión existente en la corriente principal.

También pueden existir corrientes piratas a través de macizo en cambios bruscos de dirección.

Las corrientes piratas solo pueden existir en el caso de que el carbón esté fracturado.

Estos cambios bruscos de dirección o de sección sin zonas que pueden entrañar un riesgo.

Por todo esto, sería necesaria la impermeabilización de las galerías en carbón.

Esto podría hacerse con un relleno de materiales de construcción, como puede ser mezcla de cemento y arena, entre el carbón y el sostenimiento y un posterior gunitado (figura 19).

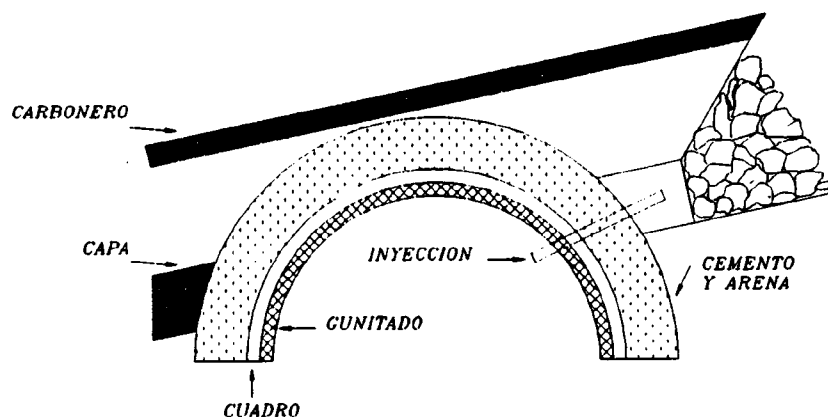


Figura 19.- Impermeabilización de las galerías de carbón

De esta manera se impedirá la entrada de aire y además se favorecerá el sostenimiento, la sección se mantendrá y no habrá pérdidas de aire de la ventilación.

En el caso de que la galería estuviese cercana al postaller, explotación en avance, se podría inyectar la zona entre el relleno, antes citado, y el postaller con un material pulverizado seco.

Un ejemplo de ese material podría ser cenizas provenientes de un precipitador electrostático.

La ventaja de estos materiales es que penetran en cualquier fisura o cualquier cavidad.

Estas medidas impedirían que un carbonero a techo pudiese dar cualquier problema de autocombustión.

La presencia de una falla que se presenta con carbón desmenuzado y propenso a autocalentamiento no sería problemática por no existir ningún aporte de oxígeno.

5.3.1.2.- En relación con el desarrollo de las labores

a) Tajos largos

En el postaller se pueden distinguir 3 zonas (figura 20):

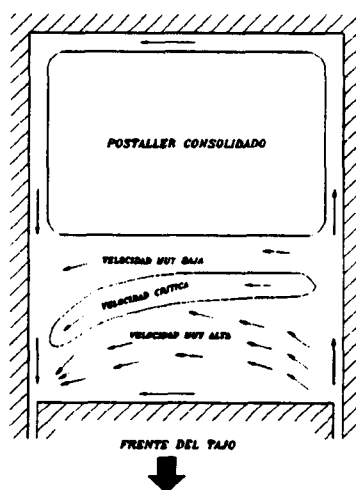


Figura 20.- Velocidad del aire en el postaller

- . La más cercana a la calle de trabajo en la cual la velocidad del aire es suficientemente alta como para disipar el calor producido por la autocombustión.
- . Existe una zona más interna detrás de esa a la cual se aporta suficiente oxígeno para reaccionar con el carbón pero no es suficiente la ventilación como para disipar el calor. Por lo tanto es una zona crítica.
- . Por último, existe detrás de esta última una zona en la cual ya está consolidado el hundido y no llega suficiente oxígeno como para reaccionar.

Estas zonas van avanzando según avance el frente.

Se necesita una velocidad de avance mínima para que no se produzca una combustión espontánea.

Si la velocidad de arranque es baja, la zona crítica se moverá despacio y puede tener tiempo suficiente para producir una acumulación de calor.

Si se hace una larga parada del tajo se debería tabicar y tomar medidas frecuentes para la detección precoz de combustiones espontáneas.

Se deben impedir las fugas en el postaller tabicando a medida que avanza el tajo.

Los tabiques han de hacerse en las guías e inyectando espumas resinosas en el postaller para sellarlo.

Las técnicas de control en un tajo largo serían:

- . Reducir las diferencias de presión en el postaller
- . Reducir las fugas que entran en el hundido con tabiques
- . Inyectar gases inertes o metano en el postaller y así desplazar el oxígeno

El abandono de materiales en el hundido puede favorecer la aparición de corrientes furtivas por la falta de estanqueidad producida por esos materiales. Además, la madera u otros combustibles pueden arder como consecuencia del calor generado por la combustión espontánea y acelerar el fuego.

También debería quedar la mínima cantidad de carbón en el hundido.

Si es posible se debería arrancar la capa en toda su potencia para dejar un mínimo de carbón en el postaller.

b) Subniveles con sutiraje

En el método de explotación por subniveles con sutiraje existen unas reglas básicas de prevención cuya puesta en práctica ha resultado altamente eficaz:

1. Realizar las labores de apoyo a la explotación (pozos y recortes) en roca.
2. Mantener los subniveles estrictamente en fondo de saco, evitando la realización de pozos intermedios de comunicación.
3. Llevar el hundimiento al corte.
4. Emplear preferentemente la ventilación secundaria soplante
5. Evitar las paradas prolongadas de ventilación secundaria.
6. Realizar el trazado del subnivel y la explotación en retirada a la mayor velocidad posible.
7. Tabicar los recortes rápidamente una vez finalizada la explotación del subnivel.

5.3.1.3.- En relación con la ventilación

Las fugas son debidas a la diferencia de presión entre las entradas y retornos.

Estas fugas deben disminuirse reduciendo la diferencia de presión mediante el desarrollo de un adecuado número de galerías de ventilación con secciones suficientemente grandes.

Las fugas pueden controlarse con una buena ejecución en la construcción de dispositivos de control de aire tales como tabiques y puertas.

Las fugas producidas en los alrededores de los cierres pueden ser parcialmente controlados si se selecciona bien su localización y que no estén bajo grandes presiones del terreno.

Entre los paneles se han de dejar unos pilares de tamaño apropiado de manera que no resulten dañados los tabiques.

Un tabique que proporciona una resistencia excelente a las fugas consiste en 2 paredes separadas formadas por bloques sólidos de hormigón y el espacio entre ambas se rellena de polvo de roca.

Si se construyen tabiques en zonas de grandes tensiones se hace necesaria una estructura que pueda ser elástica.

Un tabique con propiedades elásticas se puede construir con bloques de madera.

A cada bloque de madera se le aplica polvo de roca para tapar los huecos.

Los tabiques de madera, que han sido comprimidos por las tensiones del terreno, son los más efectivos para limitar las fugas. Este prensado de los tabiques cierra los huecos existentes entre los bloques.

Las zonas abandonadas se deberían sellar. Un mínimo paso de aire a través de minados antiguos pueden dar lugar a condiciones óptimas para el calentamiento espontáneo. Al ser muy difícil mantener una corriente de aire adecuada para liberar el calor en estas zonas, la medida a adoptar es su sellado.

Los postalleres de los tajos largos son zonas propensas a la aparición de fuegos. Los ingleses han desarrollado un método para controlar el riesgo de combustión espontánea en los tajos explotados en retirada.

Este método consiste en la construcción progresiva de tabiques detrás del frente a medida que se avanza en retirada de manera que el aire que entre al postaller sea mínimo.

Un equilibrio de presiones en los tabiques es una técnica utilizada para reducir las fugas, y por lo tanto reducir el riesgo de combustión espontánea.

La realización de un equilibrio de presiones en los tabiques requiere una completa comprensión del circuito de ventilación. Es algo muy complejo pero que se ha reconocido como una herramienta importante para reducir las corrientes piratas.

El equilibrio de presiones en zonas críticas se debe controlar periódicamente y ajustar los cambios de ventilación.

Otro sistema es un barrido con metano o de nitrógeno por el postaller de tajo largo para controlar la oxidación.

La mezcla de metano-aire debe ser tal que no haya posibilidad de formar una mezcla explosiva.

También la concentración de metano en el ambiente en las zonas de la mina ha de estar dentro de los límites legales. En Inglaterra se permite este método cuando la mezcla contiene como mínimo un 40% de metano.

Según investigadores rusos, una velocidad de aire comprendida entre 0,1 y 0,9 m/s con un contenido de oxígeno mayor del 17% es la zona de riesgo de la ventilación

5.3.1.3.1.- Medición de fugas a través de los tabiques

Para la medición de las fugas que se producen a través de los tabiques que, como ya se ha dicho, siempre existen y que pueden alimentar el proceso de combustión detrás del tabique, se puede hacer mediante el siguiente método.

En un tajo que está tabicado por los dos extremos A y B, se coloca un tubo de 100 mm de diámetro y otro de 10 a 20 mm en el extremo A; y en el extremo B se coloca uno de 10 a 20 mm de diámetro (figura 21).

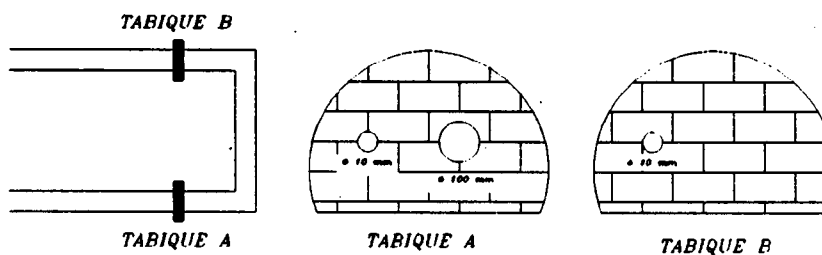


Figura 21.- Medición de fugas en tabiques

A través de los tubos más pequeños se miden las depresiones en el tabique A y en el B dando como resultados h_A y h_B . Después se cierran estos tubos y se abre el tubo más grande instalado en el tabique A y se mide la depresión y la velocidad del aire dando como resultado h_A' y V . La depresión h_B' se calculará por diferencia ya que

$$h_A + h_B = h_B' + h_B, \text{ por lo que}$$

$$h_B' = h_B + h_B - h_B$$

Siendo S la sección del tubo de 180 mm de diámetro que es $0,031 \text{ m}^2$ y V la velocidad en esta tubería, el caudal que pasa a través del tajo cuando se supone sellado es:

$$Q_f = S \cdot V \frac{\sqrt{a \cdot b}}{\sqrt{a} - \sqrt{b}}$$

$$a = \frac{h_A}{h_A'} \quad b = \frac{h_B}{h_B'}$$

5.3.1.3.2.- El control de fugas y la aplicación de equilibrio de presiones en tabiques

Las fugas en un tabique depende de la permeabilidad y de la diferencia de presiones entre ambos lados del tabique.

No se puede confiar que un tabique sea totalmente impermeable. Lo que se debe conseguir es que exista una pequeña diferencia de presiones o que no la haya.

Si se aumenta la presión en el retorno del tabique o se disminuye a la entrada del tabique, se previene la entrada de corrientes piratas en la zona tabicada.

Esta zona puede verse afectada por variaciones de presión del aire por dos maneras diferentes.

La primera es debido a la presión barométrica en la superficie de la mina. Estas variaciones son iguales para todos los puntos que se encuentran dentro de la zona tabicada.

El efecto de la variación de presión atmosférica es la alteración de las diferencias de presión entre el interior de la zona tabicada y el exterior de ésta, de manera que existe una corriente de aire dentro del tabique.

En una capa grisúosa, como las de Pedraforca, la desorción continua del carbón dentro del tabique puede evitar esta entrada de aire. En una capa no grisúosa, es difícil de prevenir esta entrada de aire, aunque esto se puede conseguir colocando otro tabique cercano al ya realizado. El espacio que queda entre ambos se rellena con CO_2 de manera que si hay una variación de presión lo que penetra en la zona tabicada es CO_2 principalmente. La segunda clase de variación de presión es la variación de las diferencias de presión en la ventilación de la mina.

Estas variaciones no afectan por igual a los puntos de los límites de la zona tabicada y por lo tanto tiende a trastornar el equilibrio de presiones.

La diferencia de presión en la ventilación entre dos puntos en una galería depende del caudal y de la resistencia en la galería.

Existen variaciones sustanciales de estos dos factores en la ventilación de la mina por lo que causan redistribuciones en el sistema.

Las fugas a través de un material poroso como un tabique o postaller con relleno son directamente proporcionales a la diferencia de presión entre los dos lados, y no es proporcional a la raíz cuadrada de la presión.

Por esto resulta evidente la importancia de la reducción de la diferencia de presión al mínimo.

Cuando se colocan los tabiques, se deberían ajustar al máximo las diferencias de presión mediante la colocación de puertas delante de aquellos.

Los tres factores que tienen influencia en las corrientes piratas a través de los tabiques son:

- 1- Resistencia de cada tabique
- 2- El número de tabiques en paralelo
- 3- La presión en cada tabique

Las fugas pueden ser nulas, aumentando la resistencia de cada tabique a infinito o reduciendo a cero la presión de cada uno de ellos.

Cuando una zona se tabica, pueden existir fugas debido a la diferencia de presión entre un tabique y otro paralelo como pueda ocurrir en la mina Oportuna por su sistema de explotación con subniveles.

Estas fugas pueden demorar la extinción final del fuego y en el caso de una combustión espontánea el proceso de oxidación puede seguir casi indefinidamente.

Los pasos que hay que seguir para el equilibrio de las presiones son los siguientes:

- a) En este caso (figura 22) la diferencia de presión entre A y B es la diferencia de presión entre la entrada y salida de ventilación.

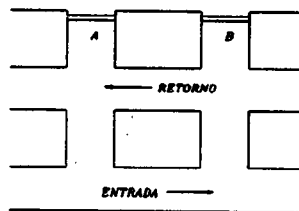


Figura 22.-

- b) En este caso (figura 23) la diferencia de presión es mucho menor y aproximadamente igual a la pérdida de presión en la galería entre B y A.

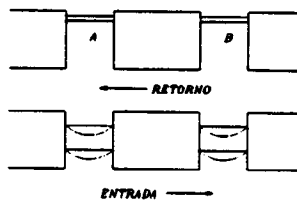


Figura 23.-

- c) En este caso se ha reducido aún más la diferencia de presión entre A y B mediante la construcción de 2 tabiques más y la conexión de ambas cámaras. Esto tiende a equilibrar la presión entre las cámaras. Si fuese necesario se puede aumentar o disminuir la presión en una cámara mediante aire comprimido, ventilación auxiliar o mediante la depresión del ventilador principal (figura 24).

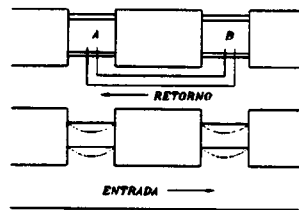


Figura 24.-

En capas propensas a la autocombustión, es preferible la aspiración en la cámara de equilibrio de la entrada de ventilación que inyectar aire en la cámara de equilibrio de retorno.

En las labores inclinadas hay que tener en cuenta el efecto del metano, CO_2 y la temperatura sobre la presión detrás del tabique.

5.3.1.3.3.- Gases trazadores para localizar corrientes piratas

En cualquier explotación se debería conocer con precisión la ventilación. A menudo sucede que los planos de ventilación están realizados de una forma poco precisa borrando los postalleres para que el circuito de ventilación sea más sencillo.

Por esto, hay veces que existen diferencias considerables entre la ventilación real y la calculada. El aire no pasa solamente por galerías y talleres en actividad. Los macizos entre galerías, antiguos tabiques, etc. no son impermeables.

Por ejemplo, un macizo de 15 a 20 m que se ha dejado entre 2 talleres puede ser eficaz en una capa estrecha pero no sirve para nada en una capa potente.

La mejor manera de conocer los circuitos de ventilación, es usar la técnica de los gases trazadores, como es el hexafluoruro de azufre (SF_6). Con esta técnica se puede conocer las conexiones entre distintas zonas.

La aplicación del método basado en un gas trazador como el hexafluoruro de azufre (SF_6) sirve para determinar el caudal que atraviesa un hundido que se encuentra tabicado y permite conocer todas las conexiones de esta zona con otras zonas que estén ventiladas, con otros hundidos, con una zona de fuego o incluso con la superficie.

En 1984 en la mina de Carbones de Pedraforca se desarrolló un fuego en una zona de la explotación y debido a su cercanía a la superficie, este fuego se alimentaba a través de fisuras que conexionaban el interior con la superficie. Este fuego obligó a tabicar esa zona. En 1990 y dejando un macizo de 30 m de espesor entre la zona del fuego y la zona que se empezaba a explotar volvió a surgir el fuego por lo que en todo ese tiempo el proceso de combustión continuaba debido a ese aporte de oxígeno a través de las fisuraciones.

Por lo tanto, la detección de las conexiones permite la aplicación de procedimientos que puedan eliminar las fugas a través de zonas con fuegos y acelerar las operaciones que lleven al apagado de esos fuegos. También sirve para limitar o eliminar el riesgo de combustión espontánea. El método de la determinación de las fugas está basado en que estas fugas que atraviesan las zonas conflictivas pueden llevar con ellas una mezcla de ese aire con un gas trazador.

Mediante la aplicación de cierta cantidad de ese gas trazador en la zona de entrada de aire en el hundido tomando muestras del aire en el retorno se comprueba la presencia de ese gas en la salida.

Luego así se confirmaría la existencia de fugas a través del hundido o de la zona de fuego.

El gas trazador más utilizado es el SF₆, aunque el freón F-11482 y el freón 1282 también pueden utilizarse.

La secuencia de operaciones para la determinación de las fugas mediante un gas trazador comienza con el análisis del hundido que se pretende estudiar, determinando las posibles conexiones de esta zona con distintas zonas de la mina o con la superficie. Para ello se ha de elaborar un diagrama de presiones de las zonas adyacentes y se puede determinar aproximadamente el volumen del hundido.

Después de esto se inyecta el gas trazador y se toman muestras de la mezcla de aire-gas trazador en el retorno y se determina la concentración de ese gas en cada muestra.

Por último, se interpretan los resultados y se indican las posibles rutas y el caudal de las fugas.

Al saber estos datos se puede elaborar un plan para la prevención o la supresión de un fuego oculto.

5.3.1.4.- En relación con los factores geológicos

Las medidas preventivas sobre los factores geológicos pueden ser las siguientes:

La extracción debería ser total para no dejar carbón en el hundido que favorezca la autocombustión, para ello han de utilizarse máquinas que puedan hacer un arranque de la capa en toda su potencia.

En capas con hastiales fuertes y por ello no deleznales el hundido debería rellenarse, ya que al forzar el hundimiento mediante explosivos, el postaller sería ocupado con material con una granulometría demasiado grande.

Debido al tamaño de esta granulometría, no quedaría estanca la zona explotada con el peligro de aporte de oxígeno debido a las posibles corrientes piratas.

Por otra parte, si existe un carbonero a techo de la capa que se está explotando, el relleno del postaller serviría también como sostenimiento.

Este sostenimiento impediría la irrupción de carbón del carbonero en el postaller.

Si existen anomalías geológicas, como fallas, estas zonas deberían impermeabilizarse empleando productos de relleno finos y de tamaño uniforme para evitar la posible reacción del carbón presente que tiene una granulometría fina y por ello muy propenso a la autocombustión.

5.3.2.- Detección precoz de la autocombustión

5.3.2.1.- CO e indicadores físicos

La atmósfera de una mina es diferente a la del aire fresco debido a que la extracción de carbón produce gases contaminantes en cantidades variables en una mina o en otra.

El aire entrante en las labores debe asegurar una concentración mínima de O₂ del 19% y diluir y expulsar los gases contaminantes.

El aire atmosférico está compuesto principalmente por O₂ (20,93%), N₂ (78,11%), CO₂ (0,03%), Ar (0,93%).

En la mina se modifica la composición incorporándose gases como grisú (que está compuesto del 90-95% CH_4), monóxido de carbono, hidrógeno, SO_2 , SH_2 , NO_x .

En un proceso de combustión de carbón los principales gases formados son el CO_2 y vapor de H_2O . Además, se forman pequeñas cantidades de CO .

El CO_2 aparece en mayor cantidad que el CO por lo que en principio parece que sería mejor indicador de fuegos de mina que el CO . Pero el CO_2 proviene también de la respiración humana, oxidación lenta del carbón, descomposición bacteriana de la madera, acción del agua sobre los carbonatos, por la utilización de máquinas diesel. Además el CO_2 es muy soluble al agua, con lo cual puede dar unos valores erróneos.

El CO tiene un límite de toxicidad mucho menor que el CO_2 , por lo que se considera más peligroso.

Por esto, se ha considerado el CO como indicador de una autocombustión.

La prevención de fuegos en mina ha sido generalmente mediante el seguimiento de la concentración de CO .

También existen unas indicaciones físicas del progreso del calentamiento.

En un principio existen trazas de un olor parecido a petróleo. Este olor podría ser causado por productos de la destilación como hidrocarburos saturados e hidrocarburos pesados. Más tarde, se deposita la humedad observándose que se forman gotas de agua. Esto es debido a que el vapor de agua liberado del carbón se enfría por la corriente de ventilación y se condensa.

Esta condensación va acompañada por un aumento de temperatura en las proximidades del calentamiento.

También se pueden oír crujidos debido a hundimientos o a formación de grietas en el carbón.

La temperatura en el carbón comienza a elevarse. Finalmente, se produce humo que indica que el calentamiento ha alcanzado la etapa de combustión activa. Estos indicadores físicos no valoran el grado del calentamiento y no permite una detección precoz.

Una ayuda para detectar un calentamiento es mediante la medida sistemática de temperatura en zonas que puedan ser vulnerables de sufrir una combustión espontánea.

Estas mediciones de temperaturas pueden ser observando las variaciones de la temperatura en el ambiente con un psicrómetro, por ejemplo.

Las variaciones en la temperatura superficial de una capa puede servir para la detección de un calentamiento mediante, por ejemplo, un detector infrarrojo, como puede ser el Thermopoint 40.

También se puede detectar la temperatura interna del macizo con la utilización de termopares en los cuales existe un efecto termoeléctrico.

5.3.2.2.- Coeficiente de Graham

Muchos investigadores han sugerido que la interpretación correcta de los datos analíticos del oxígeno absorbido por el carbón y los productos gaseosos de la oxidación son más prácticos y significantes al relacionarse entre ellos.

Entre estas relaciones está el coeficiente de Graham que relaciona el contenido de CO producido en la oxidación y el O₂ que se ha consumido en el mismo punto.

Graham observó que los productos de oxidación como son el CO, CO₂ que aparecen por la adsorción y absorción del oxígeno no explica la cantidad total del oxígeno consumido. Esta deficiencia en el consumo de oxígeno muestra la intensidad de la oxidación y es conocido como índice de Graham.

Este valor ha demostrado ser el más valioso por la indicación precoz de una combustión espontánea.

La aplicación de este método tiene dificultades debido a los análisis de gases, ya que el porcentaje de nitrógeno se determina indirectamente ya que:

$$N_2(\%) = 100 - (O_2 + CO_2 + CH_4 + CO)$$

De esta manera se introduce un error por no contar con otros gases que están presentes aunque es muy pequeña cantidad.

La cifra característica de Graham es:

$$K(\%) = 100 \frac{CO(\%)}{O_2 \text{ consumido}(\%)}$$

Esta cifra por definición es:

$$K = 100 \frac{CO \frac{N_2'}{N_2} - CO'}{O_2' - O_2 \frac{N_2'}{N_2}}$$

Los valores CO, O₂ y N₂ son medidas tomadas en la zona de oxidación.

Los valores CO' , O_2' y N_2' son medidas del aire atmosférico que al ser limpio CO' será cero, O_2' será 20,93% y N_2' será 78,11%

$$K = \left(\frac{CO \frac{N_2'}{N_2} - CO'}{O_2' - O_2 \frac{N_2'}{N_2}} \right) \frac{\frac{N_2}{N_2'}}{\frac{N_2}{N_2'}}$$

luego:

$$K = \frac{CO \times 100}{(0,265 \times N_2) - O_2}$$

El coeficiente de Graham indica la evolución de la oxidación, aunque no se debe considerar como sustituto del CO como indicador precoz de un proceso de autocombustión.

La evolución ascendente de la cifra característica indica que la intensidad de la oxidación aumenta, por eso puede ser muy valiosa a la hora de valorar un posible fuego.

Este coeficiente es independiente de la extensión del proceso de oxidación al estar relacionada la generación de CO con la absorción de oxígeno.

Este coeficiente se mantiene independiente aunque haya una dilución de los gases de un fuego con aire o con metano ya que esto afectaría igualmente al numerador y al denominador de esa relación.

Pero si la dilución es con N_2 o con aire deficiente en oxígeno podría afectar al índice.

La cifra característica de Graham depende de la temperatura por lo que permite conocer el proceso de oxidación por el conocimiento de la intensidad de la oxidación.

La evolución del índice de Graham es el indicador del proceso de oxidación por lo cual un solo valor de esta cifra no sirve. Han de hacerse diversas mediciones de distintos momentos para observar esa evolución.

En condiciones normales, es decir sin la presencia de ningún fuego, el índice de Graham tendrá un valor constante a lo largo del tiempo. Este valor oscila alrededor de un valor medio, que es el índice base de Graham. Este índice base es característico de una capa dada en un entorno también dado. Este valor puede oscilar entre 0,1 y 0,7.

Al producirse un conato, la cifra comienza a aumentar por lo que hay que prepararse para combatir el fuego.

El índice aumenta en función de la temperatura y se puede considerar que un índice superior a 2 veces el índice base puede representar una señal de peligro.

Cuando se está combatiendo un fuego, la cifra irá retrocediendo continuamente indicando con ello que, efectivamente, las medidas tomadas contra el fuego tienen su efecto.

Si una corriente de aire está enriquecida de diversos gases como CH_4 , CO_2 , ... sin modificar los contenidos de CO , O_2 , N_2 , el índice de Graham no se modifica, pero si hay un aporte de N_2 , pierde toda significación.

Para que el índice de Graham nos de una indicación de la temperatura del foco se ha de saber el índice base, y que la diferencia entre éste y aquél sea bastante grande.

Pero la mayoría de las veces, es el análisis de su evolución en función del tiempo el que da una idea precisa de la evolución de la temperatura.

Cuando se utiliza la técnica de inertización con nitrógeno interfiere el índice de Graham.

La existencia de una concentración alta de CO puede no significar el comienzo de un calentamiento si la cifra característica se mantiene en unos valores pequeños.

En la zona donde tiene lugar el calentamiento, el índice de Graham es mayor que en el retorno de aire donde se toman las muestras de gases, por lo que al evaluarlo nos dará siempre un valor menor que el real.

5.3.2.2.1.- CO e índice de Graham

Se han comparado la evolución del CO y del coeficiente de Graham respecto a la temperatura del carbón. Las dos funciones son claramente exponenciales, como se puede observar en la figura 25.

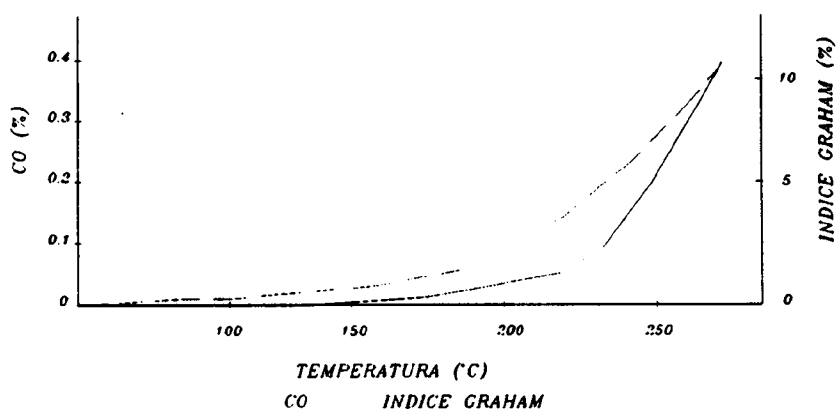


Figura 25.- Evolución del índice de Graham y de la concentración de CO en función de la temperatura

Se observa que el índice de Graham tiene una respuesta a niveles menores de aumento de temperatura que el CO.

Aparte de las distintas escalas en la figura, parece que el índice de Graham proporciona una indicación excelente de la temperatura del carbón.

También la relación entre el CO y CO₂ en un fuego parece ser tan válido como el coeficiente de Graham.

5.3.2.2.2.- Ausencia de monóxido de carbono

El CO a veces desaparece aunque un fuego esté sin extinguir o se mantiene en zonas donde sí se ha extinguido.

Este puede ser un problema para una interpretación correcta de los resultados.

El hecho de la desaparición del CO es debido a la acción bacteriana.

Banerjee observó que esta desaparición se da más fácilmente en minas con agua, particularmente con un pH cercano a 7, por lo que en estas zonas un pequeño aumento en la concentración de CO puede indicar un estado avanzado de calentamiento.

5.3.2.3.- Sistema de alarma multidiscriminatorio

La prevención de una combustión siempre ha sido mediante el seguimiento de la concentración de CO.

Debido a falsas alarmas producidas por disparos con explosivos, máquinas diesel, o cambios de presión barométrica. Por ello, McCormick describió un algoritmo y resultó un sistema de alarma multidiscriminatoria.

El algoritmo analizaba los datos de CO en toda su historia y calculaba la media geométrica utilizándola como un nivel normal.

Si el contenido de CO aumentaba por encima de ese valor y su duración estaba por encima de un periodo previamente calculado y saltaban los cinco puntos de alarma situados por valores por encima de la norma, saltaba la alarma.

Este sistema mejoró la detección de falsas alarmas, pero no se anularon totalmente.

5.3.2.4.- Otros gases indicadores

Como se ha dicho antes, las falsas alarmas provocadas por otros medios de producción de CO además de la combustión obligan a la búsqueda de otros gases que tengan el mismo fin que el CO, la detección precoz de un calentamiento.

Investigadores ingleses han estudiado en el laboratorio los gases producto de oxidación y los han distinguido los gases que pueden ser producto de la desorción del carbón.

Dependiendo que el gas que se haga pasar por una muestra de carbón sea oxígeno o nitrógeno, los gases presentes serían productos de la oxidación o de la desorción.

Los gases que podrían ser detectores precoces de la combustión espontánea deberían ser los que únicamente se produjesen en la oxidación.

El etileno, propileno, COS, acetaldehído y acetona cumplieron esa condición.

Comparando el acetaldehído con la acetona, aquél se produce antes que la acetona pero su límite de detección es mayor por lo que tienen un nivel similar en su función de indicadores.

El límite de detección del acetileno es 0,5 ppm y de la acetona 0,1 ppm.

El etileno tiene un límite de detección de 1 ppm.

El propileno tiene un límite de detección de 0,3 ppm y de COS de 0,1 ppm.

El etileno y propileno tienen un límite de detección relativamente alto debido a problemas de interferencia con los alcanos en la atmósfera de la mina por lo que se restringe su uso en mina. De todas formas, estos gases son buenos indicadores precoces de la oxidación del carbón.

El COS es un buen indicador pero hay dificultades técnicas para la fabricación de un detector.

Al relacionar la concentración de CO con la de otros gases los resultados son:

- 1ppm de propileno o de etileno corresponde a niveles de 150 ppm de CO.
- Si hay 0,2 ppm COS se encuentran unos 200 ppm de CO.
- 1 ppm de acetaldeido corresponde a una concentración de 40 ppm de CO.
- 0,3 ppm de acetona corresponde a 40 ppm de CO.

Por lo que se comprueba que el CO se desarrolla antes que estos gases. El etileno y el propileno no se pueden detectar durante un calentamiento en zonas de ventilación principal ya que se diluyen hasta unas concentraciones que no se pueden captar, en cambio si se detectan en calentamientos producidos en el relleno.

El COS se diluye con el aire de ventilación en galerías generales por lo que se ha podido detectar en los calentamientos.

La acetona y el acetaldehído se detectaron claramente en galerías principales, sin embargo no se han detectado en el relleno quizás por haber sido absorbidos por la humedad presente.

5.3.2.5.- Detección de fuegos mediante gas radón

La detección de la zona y la amplitud del fuego es una de las llaves para la extinción de un fuego en mina.

Uno de los métodos para realizar esto es mediante la medición del gas radón.

Los elementos radiactivos naturales como el uranio 238, el torio 232 y el uranio 235 tienen una vida media muy larga alrededor de $7,04 \times 10^8$ años.

En su proceso de desintegración, estos elementos se transforman en radón 222 y sus isótopos el torio y el actinio.

El radón es el único que está en estado gaseoso.

Este gas, en su movimiento desde el interior de la tierra hasta la superficie sufre cambios que revelan información de los distintos estratos.

En la desintegración del radón emite una partícula α para convertirse en el elemento RaA y éste a su vez emite otra partícula α para convertirse en el elemento RaB.

La densidad del radón se puede obtener mediante la medición de las partículas emitidas en el proceso de desintegración del radón y del RaA.

La vida media del radón es de 3825 días y la de RaA 3,08 minutos.

De acuerdo con un estudio realizado en el Colegio de Minería de Shanxi en China, la velocidad del movimiento ascendente del radón es mayor en una zona donde existe una fuente de calor en el interior que en aquella donde las condiciones geológicas son similares pero sin que exista esa fuente de calor.

Por lo tanto, la densidad del radón en la superficie por encima de la zona del interior en la que existe un fuego es mayor.

Para conocer la densidad del radón existen dos métodos, la medición instantánea del radón y la medición integral del radón. En el primer método se mide la intensidad de los rayos α emitidos por RaA en el proceso de desintegración del radón. Esto se hizo mediante un detector FD-140 que detecta el radón y se acumula en un sistema de absorción de este gas.

Los datos se pueden saber en periodo de tiempo de 1 a 3 minutos. Después de 4 horas se finalizan las mediciones.

Por el método de medición integral del radón, se miden directamente las intensidades de los rayos α emitidos a partir del RaA durante un periodo más largo que en el anterior método.

Para ello se utiliza un detector termoluminiscente.

Las mediciones se realizan durante 10 días.

Tanto en uno como en otro método se designan distintos puntos en la superficie para hacer unos agujeros en los que se introducen los detectores para medición.

Con esta nueva tecnología de medición del radón se puede detectar zonas y el alcance de un fuego de mina desde la superficie.

En el estudio se detectaron zonas de fuego y se comprobó que en ambos métodos de medición se detectaron aproximadamente las mismas zonas.

5.3.3.- Lucha contra el fuego

5.3.3.1.- Inertización

La inertización es la operación que consiste en introducir gases inertes en una atmósfera susceptible de entrar en contacto con un fuego, en cantidad suficiente para bajar el porcentaje de oxígeno al mínimo posible.

La inertización tiene como objetivos la eliminación del riesgo de explosión, la disminución de la intensidad de la combustión, impedir los calentamientos espontáneos y la aparición de fuegos, e impedir la entrada de aire en los tabiques.

Por lo tanto, la inyección de gases inertes (CO_2 y N_2) es útil tanto para prevención como para lucha contra el fuego. Una inyección permanente de N_2 puede prevenir el desarrollo de la oxidación en capas propensas a la autocombustión.

La inertización elimina el riesgo de explosión al reducir el contenido de oxígeno y así la mezcla formada no tendría ese riesgo.

Para eliminar prácticamente todo riesgo de explosión el contenido de oxígeno debería ser inferior al 5%.

Si se anula el contenido de oxígeno, la combustión se para, pero esto no quiere decir que se apague el fuego; mientras el material quemado (carbón, madera, etc...) permanezca a una temperatura bastante elevada se puede provocar el fuego de nuevo con posteriores entradas de aire.

El nacimiento de un fuego requiere el contacto del carbón con el oxígeno; la sustitución del oxígeno por el nitrógeno en una zona de carbón fisurado o en el hundimiento es un medio eficaz para evitar ese nacimiento.

La utilización de nitrógeno también puede servir para impedir entradas de aire a través o alrededor de un tabique.

Esto se realiza dejando una cámara delante del tabique y se rellena de N_2 de manera que si hay un cambio de presión, este gas es el que fluye al interior de la zona tabicada, impidiendo la entrada de oxígeno. Eso ya se había comentado en el apartado "CONTROL DE FUGAS Y LA APLICACION DE EQUILIBRIO DE PRESIONES EN TABIQUES".

El tabique debe estar construido para resistir una explosión si existe ese riesgo.

Si ese riesgo no existe, el tabique puede ser menos fuerte y como consecuencia, de colocación muy rápida.

Para la recuperación de una zona que anteriormente ha sido tabicada, es necesario reestablecer la atmósfera normal.

Hay que tener en cuenta que la zona tabicada puede tener una atmósfera con una gran concentración de gases combustibles y con un contenido muy pequeño de oxígeno, por lo que si se purga directamente con aire da lugar a una atmósfera explosiva.

Este riesgo se puede evitar purgando con nitrógeno en vez de aire.

La purga consiste en inyectar un caudal de nitrógeno, que sustituye a un caudal igual de gases combustibles que son expulsados.

La purga ha de realizarse hasta que el porcentaje del gas combustible se sitúe en una concentración no peligrosa y haya un enfriamiento de los materiales en combustión.

Después de la purga se puede presentar sin riesgo en la zona tabicada y eliminar cualquier residuo de combustión. Después de la recuperación se purga nuevamente pero con aire para expulsar el nitrógeno hasta que haya una atmósfera respirable.

*** Nitrógeno**

El nitrógeno es más utilizado que el CO₂ porque comercialmente se produce con unas características más convenientes para la inertización.

El nitrógeno se puede inyectar en forma líquida o gaseosa.

La pulverización de nitrógeno líquido en la corriente de aire tiene la ventaja de contribuir al enfriamiento de la zona.

*** CO₂**

Se ha utilizado antes que el nitrógeno.

Es un gas incoloro con una densidad de 1,98 kg/m³.

Por su alta densidad, se puede utilizar, por ejemplo, para combatir un incendio en el fondo de un pozo.

También se ha utilizado para combatir los fuegos en el relleno de los talleres con pendiente.

Otra utilización es la comentada, de impedir la entrada de aire a través de los tabiques.

5.3.3.2.- Espumas de alta expansión

Estas espumas se han utilizado en fuegos abiertos, cuando el fuego es inaccesible debido a diversos problemas como el humo o el calor.

Estas espumas pueden inundar una galería o un taller y así enfría la zona.

Este método consiste en la construcción de una malla especial muy absorbente. Esta malla se humedece con una mezcla de agua y un concentrado de espuma de alta expansión.

Se crea una corriente uniforme de aire a través de la malla y cada agujero de ésta se convierte en una fuente de burbujas uniformes y continuas.

La espuma tiene un grado de expansión de 1000 volúmenes de espuma por cada volumen de la mezcla de agua y concentrado de espuma.

Los efectos creados por la espuma son:

- El aislamiento del fuego, de esta manera se impide el aporte de oxígeno que alimenta la combustión.
- El enfriamiento de la zona debido a la absorción de calor por la evaporización del agua que contiene la espuma.
- Debido a esta evaporización se reduce la concentración de oxígeno en las proximidades del fuego.

En la mina Oportuna se utilizaba una espuma de este tipo, el espumógeno de alta expansión M-260.

Es un producto químico antipirígeno que tiene lugar mediante la mezcla de agua, aire a presión y espumógeno produciendo una espuma aeromecánica que absorbe el oxígeno del ambiente y refrigera la zona.

5.3.3.3.- Tabiques

La construcción de tabiques contra el fuego es un método seguro para cortar la entrada de aire que alimenta el fuego.

Al construir un tabique hay que tener en cuenta el peligro de explosión y las posibles fugas a través de él.

Los tabiques que existen para la protección contra el fuego pueden ser de 3 tipos: tabiques rápidos, previos y principales.

Los tabiques rápidos son cierres de los conductos de aire, rápidos de efectuar. Estos tabiques no ofrecen resistencia en el caso de una explosión por lo que es un tabicado sin peligro de explosión. Un ejemplo de esta clase de tabiques son los utilizados en la mina Oportuna formado de cañizos y yeso como medida inmediata en un fuego.

Los tabiques previos son rápidos de construir que deben interrumpir la conducción de aire en zonas incendiadas y es un tabicado a prueba de explosiones. Estos tabiques se rellenan con yeso y agua formando una papilla que solidifica muy bien. Estos tabiques han de tener una resistencia a tracción y flexión suficiente para soportar el efecto de una explosión.

Los tabiques principales se utilizan para el cierre definitivo de la zona incendiada.

Estos tabiques suelen estar contruidos con ladrillos y enlucido de cemento y mortero.

Estos tabiques han de ser estancos, firmes y duraderos.

La construcción de 2 tabiques a una distancia de unos 2 m rellando la cámara con arena puede evitar la entrada de corrientes piratas.

Estos tabiques han de revisarse periódicamente por la posibilidad de formación de fisuras o por otra razón que permita la existencia de fugas.

5.3.3.4.- Prevención y apagado de fuegos mediante agentes químicos

Generalmente la inertización para prevenir o inhibir la combustión espontánea se hace mediante la inyección de N_2 ó de CO_2 . Sin embargo, estas técnicas no son siempre prácticas para un largo periodo de tiempo en la mina.

Se ha investigado sobre la impregnación con diversos geles, soluciones acuosas y materiales pulverizados.

Estos materiales pulverizados, como la carbamida y el fosfato diamonio, se inyectan a presión en el pilar antes de su arranque.

Después del arranque, el aumento de la temperatura en el hundido provoca la descomposición de estos materiales, que absorben calor, mientras se libera el amoníaco que actúa como gas inerte. Los vapores del amoniaco podrían actuar como protección para disminuir la difusión del oxígeno en los poros del carbón dando como resultado un menor grado de calentamiento.

También se inyectan en los pilares soluciones coloidales de silicato de sodio, sulfato de amonio o agua.

Estas soluciones tienen una consistencia parecida al agua y pueden penetrar fácilmente en pequeños huecos. Estas soluciones espesan y forman una película que limita el acceso del oxígeno al carbón.

Se ha evaluado la efectividad de estos materiales pulverizados, y de las soluciones coloidales. También se han evaluado soluciones acuosas de sales inorgánicas y mezclas de sal y arcilla que se inyectan en las capas de carbón y si han sido efectivas en la prevención de la combustión espontánea.

También se ha estudiado la efectividad de varios compuestos de boro y CaCl_2 para la inhibición de la combustión espontánea. Estos compuestos se añadieron en polvo y como soluciones acuosas y se observaron los contenidos de oxígeno y de CO para comprobar la inhibición.

El ácido bórico y el hidrógenotetraborato de amonio son los inhibidores más efectivos, cuando son aplicados en forma de polvo, a temperatura por encima de los $125\text{ }^\circ\text{C}$, mientras que a temperaturas menores son más efectivos estos dos compuestos como soluciones acuosas.

Los efectos que producen los aditivos en el proceso de autocombustión del carbón son debidos a tres parámetros, los efectos térmicos, químicos y físicos.

Las propiedades térmicas de los aditivos, como son la conductividad térmica y su capacidad calorífica, pueden influir en el autocalentamiento del carbón.

Las conductividades térmicas de los aditivos han de ser mayores que las del carbón, por ello el calor producido por el proceso de oxidación de una masa de carbón que contiene algún tipo de aditivo podría disiparse más rápido y como resultado lograr un menor grado de oxidación. Por lo tanto, los aditivos con una conductividad térmica mayor serían más efectivos para prevenir la autocombustión.

La reacción química entre el carbón y algún aditivo hace que se reduzcan las zonas activas del carbón y por lo tanto reducir la reactividad del carbón.

En cuanto a los efectos físicos, los aditivos en solución al penetrar en el carbón hace que éste tienda a hincharse y además se puede formar una película que protege la superficie del carbón y así sella los microporos y macroporos del carbón mediante la cristalización de los aditivos durante la etapa de secado.

La disolución de los aditivos en el carbón permite una penetración en la estructura interna de las partículas de carbón, donde pueden recrystalizar después del secado. El aditivo permitirá una lenta difusión del O_2 y de la humedad hacia las regiones activas del carbón, reduciendo su reactividad.

Un parámetro importante para determinar la capacidad de un aditivo para penetrar en los poros del carbón y su recrystalización es el radio iónico de los cationes y aniones, ya que cuanto menor sea este valor más fácil debería ser la penetración en el interior del carbón.

Una manera de valorar la efectividad de los aditivos es mediante la medición de la temperatura mínima de autocombustión.

Esta temperatura es la mínima por la cual el carbón produce una reacción exotérmica; es el comienzo de la autocombustión. Si mediante la mezcla del carbón con algún aditivo, esa temperatura se hace mayor se podría decir que ese aditivo es efectivo como inhibidor de la combustión espontánea de ese carbón.

Mediante la medición de esa temperatura se han realizado pruebas con soluciones acuosas de $NaNO_3$, $NaCl$, $CaCO_3$, $NH_4H_2PO_4$, $CaCl_2$, NH_4Cl , KCl y $NaC_2H_3O_2$. El resultado, combinando los efectos térmico, químico y físico de los aditivos, ha sido que las soluciones de $NaNO_3$, $NaCl$ y $CaCO_3$ han sido las más efectivas para inhibir el proceso de autocalentamiento del carbón.

El $CaCO_3$ se aplica como una mezcla pastosa y penetra en los poros del carbón, teniendo un buen contacto con la superficie del carbón de manera que bloquea la entrada de oxígeno y humedad en las partes activas del carbón.

Sin embargo la efectividad del NaNO_3 es limitada ya que a altas temperaturas ($> 300\text{ }^\circ\text{C}$) se produce una fuerte reacción exotérmica con el carbón.

Compuestos como $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KCl , CaCl_2 y NH_4Cl sirven, aunque en menor medida, como relentizadores de la combustión espontánea.

5.3.3.5.- Equilibrado de presiones

Las fugas en un taller se pueden evitar aumentando la resistencia en el postaller o mediante la disminución de la diferencia de presiones en los puntos entre los que se generan los circuitos de las corrientes piratas. La disminución de la diferencia de presiones puede llevar hasta el equilibrio de éstas.

En un taller que existe un fuego existe una diferencia de presión entre 1 y 2 de ΔP_{1-2} y entre los puntos A y B de ΔP_{A-B} (figura 26).

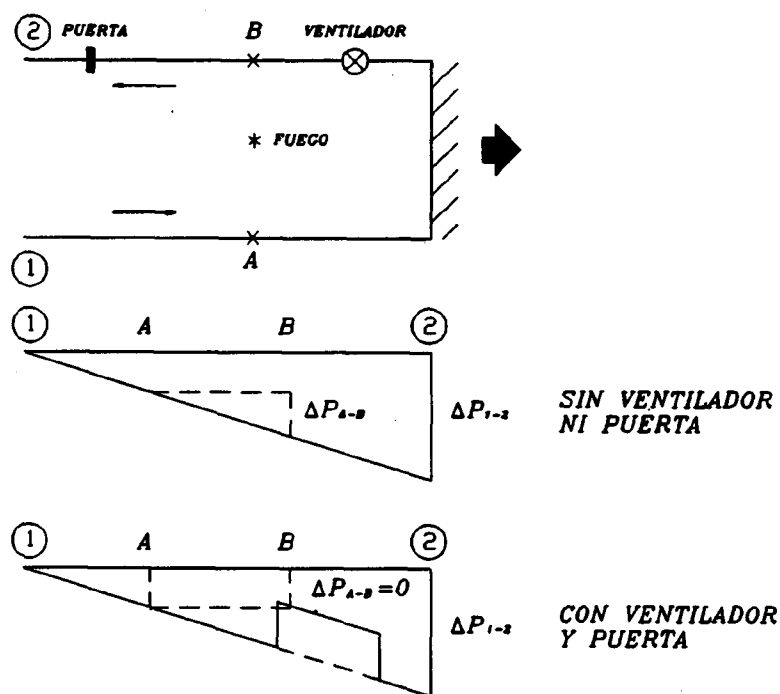


Figura 26.- Equilibrado de presiones

Para el equilibrio de presiones entre A y B, se coloca un ventilador cuya función es la de aumentar la presión en la zona de B sin aumentar la cantidad de aire que pasa por el taller.

El aumento de presión se regula con la puerta.

Es conveniente mantener una caída de presión pequeña en la dirección original ya que se puede invertir la dirección de las corrientes piratas en la zona explotada y entrar monóxido de carbono en la galería de entrada debido a las oscilaciones de presión que son inevitables.

Este método también puede servir para la prevención de fuegos. Mediante la medición de las presiones en dos talleres próximos, por ejemplo, e introduciendo puertas y ventiladores auxiliares para equilibrar las presiones entre ambos se pueden prevenir las corrientes piratas que pueden circular entre los dos talleres (figura 27).

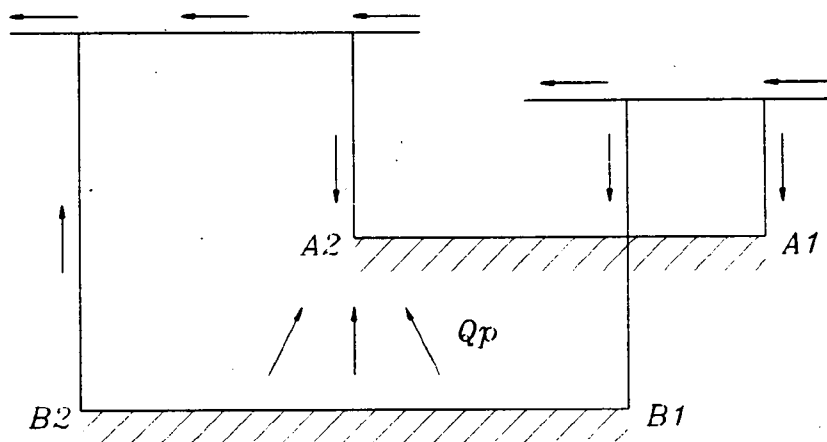


Figura 27.- Equilibrado de presiones entre talleres próximos

Mediante la medición de la depresión existente entre A1 y A2, y entre B1 y B2 y suponiendo una mayor depresión en el tajo A1-A2, con la colocación de alguna puerta y si es necesario algún ventilador en el tajo B1-B2, se puede lograr el equilibrio de presiones entre A1-A2 y B1-B2 con lo que se conseguiría anular las corrientes piratas y $Q_p = 0$.

Con este mismo método se lograría que en explotaciones por subniveles que se comunican a través de los minados se evitasen las posibles fugas que los atraviesen aportando el oxígeno necesario para la combustión espontánea.

6.- ESTUDIO DE LAS MINAS SUBTERRANEAS DE LIGNITO

6.1.- MINAS ANALIZADAS

6.1.1.- Geología de los yacimientos

6.1.1.1.- Pozo Pilar

El yacimiento está formado por seis capas de carbón.

Estas capas se denominan 1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª y 6ª siendo la capa 1ª la que está más a techo y la 6ª la que está más a muro.

Todas las capas son explotables excepto la 5ª, por su escasa potencia e irregularidad y su proximidad a la capa 4ª.

Las capas de carbón tienen unas potencias que oscilan entre 1 m y 3 m.

Estas potencias no son importantes por lo cual en su explotación se puede arrancar gran cantidad de carbón dejando poca cantidad en el hundido.

El arranque es, en efecto, caso completo debido a la movilidad de la rozadora que permite este grado de extracción.

Las capas tienen una pendiente que oscila entre 0° y 35°.

Al no ser pendientes muy fuertes, este factor no debería influir en la propensión a la autocombustión.

Las capas tienen como hastiales bancos de pizarras más ó menos carbonosas y fuertes, de potencias variables según las zonas.

Al producirse el hundimiento, los carbones presentes a techo incorporan carbón al postaller y si existen fuegos hacia el hundimiento se presenta el riesgo de autocombustión. La mina tiene dos plantas, una a profundidad de 162 m y la otra a 295 m.

Estas profundidades son de tipo medio por lo que no tiene porqué existir una entrada de aire a través de la fisuración del recubrimiento.

El carbón, al ser de bajo rango, es bastante deleznable por lo que al ser arrancado queda con una granulometría fina que al no ser completa la extracción queda en el hundido.

6.1.1.2- Explotaciones de ENDESA: OPORTUNA E INNOMINADA

Las explotaciones están ubicadas en terrenos secundarios, extendiéndose desde un muro de caliza Aptense sobre el que se asientan alternancias de carbón, arcillas y arenas blancas Albenses. La secuencia carbonosa es amplia, habiéndose registrado hasta 19 capas diferentes de carbón, pertenecientes a 5 paquetes denominados, de muro a techo, S, R, Q, P, O y N.

Debido a las potencias y consistencia de hastiales requeridos para la explotación por minería subterránea, normalmente tan solo se explotan dos capas del paquete P en Innominada y Oportuna, capas que representan un porcentaje de las reservas existentes superior al 80% del total.

Estas capas se encuentran a techo de las calizas, tras bancos de potencia variable de margas y arcillas carbonosas, y al techo de las mismas se presentan arcillas y arenas blancas con agua.

Debido a la poca consistencia del carbón, toda la infraestructura de las minas de interior se traza en las calizas (planos inclinados y galerías generales).

Desde las galerías generales en caliza, se construyen transversales a 90° con la dirección de las mismas, que atravesando margas y arcillas van a cortar la capa de carbón donde se efectúa la explotación subterránea del mismo.

Las capas de carbón presentan una disposición arriestrada, variando la potencia enormemente de unos puntos a otros. En menos de 50 m de corrida, es normal encontrarse variaciones de potencia de 5 m ó más.

Debido a los terrenos encajantes (arenas y arcillas) los métodos subterráneos no permiten el beneficio de la capa si no tiene 3 m de potencia como mínimo.

El buzamiento de la capa varía entre subhorizontal y 20° en Innominada y 20-35° en Oportuna.

La potencia media de la capa en Innominada es de unos 9 m.

La potencia media en la zona Este de Oportuna es de 17 m y en la zona Oeste de 12 m.

En Oportuna se tiene una profundidad de unos 450 m en 10ª planta.

Por otro lado, el yacimiento presenta numerosas fallas de deposición del carbón, así como intercalaciones arcillosas y piríticas en el mismo.

Sobre el carbón se encuentran una arcilla carbonosa muy deleznable, de espesor variable, sobre la cual descansa un banco de arenas sueltas acompañadas casi siempre con agua. Esta arcilla desaparece en ocasiones apoyándose directamente la arena sobre el lignito. El drenaje previo de la explotación es difícil debido a la baja permeabilidad de estas arenas.

Subyacente al carbón se encuentran margas arcillosas que descansan sobre calizas Aptenses.

Estas margas, son altamente plásticas y pueden cerrar completamente un hueco abierto y entibado en espacios de tiempo muy cortos.

Las calizas de muro tienen una resistencia del orden de 1200 k/cm², lo que hace que normalmente no sea preciso utilizar en interior ningún tipo de sostenimiento.

Las capas de carbón, tanto en Innominada como en Oportuna, son potentes por lo que su extracción total es muy difícil.

En Innominada, de todas formas, se beneficia más la capa que en Oportuna dejando en ésta casi un 50% del carbón en el hundido.

La arcilla carbonosa del techo es muy friable por lo que el hundido queda bastante cerrado en las dos minas.

Al hacer un hueco minero, las margas que se encuentran a muro sufren distensiones hinchando y fracturan el carbón. Esta fracturación del carbón facilita la entrada de oxígeno en la zona aumentando el riesgo de autocombustión.

La existencia de numerosas fallas es también un peligro por la pequeña granulometría del carbón.

El carbón, al igual que en el pozo Pilar, tiene poca consistencia y por ello es más fácil su fracturación y la producción de gran cantidad de finos.

6.1.1.3.- Pedraforca

El yacimiento que se explota está compuesto por dos paquetes: el Norte compuesto por las capas Cuartas, Segundas y General-Vieja; y el Sur que incluye las capas Quintas y Sextas.

Las potencias y pendientes de las capas son las siguientes:

Capa	Potencia (m)	Pendiente media (%)
Vieja	1,20	77
General	1,50	77
Segundas	2,00	70
Cuartas	5,00	70
Quintas	2,35	60
Sextas	1,40	60

Respecto a los hastiales de las capas, a muro de la capa Cuartas se pueden observar margas tanto más carbonosas cuanto más próximas están de la capa. Este banco de margas puede tener una potencia de 2,5 m. Más hacia el muro se encuentra un banco bastante potente de calizas. Inmediatamente al muro de la capa existe un nivel de caliza carbonosa, de unos 90 cm de potencia que se arranca con el carbón.

A techo de la capa se presentan unas margas grises blandas y con tendencia a romper según escamas. Estas margas constituyen el muro de la capa Segundas. El techo de capa Segundas está constituido por margas y calizas, que se hacen carbonosas al aproximarse a la capa General.

El muro de la capa General está constituido por margocalizas algo carbonosas y el techo por calizas carbonosas y calizas.

El techo de la General está constituido por calizas carbonosas y es el muro de la capa Vieja.

El techo de la capa Vieja es un banco calizo con dos carboneros de potencia variable.

En general, los hastiales de las capas del paquete Norte presentan una fracturación apreciable, con una densidad de fracturas comprendida entre 2 y 4 fracturas/m². Las fracturas están cerradas y, en general, el macizo rocoso puede calificarse como de buena calidad presentando muy pocos problemas de estabilidad en las galerías actuales, pero facilitando el hundimiento en las explotaciones.

La concesión es atravesada en sentido N-S por una falla de desgarre.

6.1.2.- Características de los carbones

Los análisis elemental e inmediato de los carbones de las minas analizadas se pueden observar en el siguiente cuadro (Anexo 28):

ANALISIS ELEMENTAL E INMEDIATO

	Oportuna Capa P	Innommada Capa P	Pedraforca TODO UNO	Pozo Pilar Capa 1	Pozo Pilar Capa 2	Pozo Pilar Capa 4	Pozo Pilar Capa 6
Humedad (%)	6,8	6,5	2,18	12,8	10	12,9	10
Cenizas (%)	19,3	14,5	47,2	7,3	25,4	15,3	18,5
Volátiles (%)	30,9	32,0	35,9	34,9	27,2	28,9	31,3
Carbono (%)	52,10	57,60	36,64	61	46,26	55,40	33,58
Hidrógeno (%)	3,58	4,08	2,4	4,23	2,96	3,52	3,70
Nitrógeno (%)	0,55	0,55	0,7	0,55	0,36	0,56	0,55
Azufre total (%)	9,58	7,78	3,83	2,05	6,58	3,77	6,36
Azufre pirítico (%)	5,38	3,59	1,25	1,01	2,37	2,03	3,36
CO ₂ (%)	0,75	0,25	-	-	-	-	-
Potencia calórica superior (Kcal/kg)	4962	5546	3089	5992	4559	5294	5264

Todos estos carbones son de bajo rango por lo que son propensos a la autocombustión. El contenido en volátiles es alto, con un mínimo de 27,2% en la capa 2 del pozo Pilar y un máximo de 35,9% en el Todo Uno de la mina Santa Bárbara de Carbones de Pedraforca, por lo que la velocidad de fijación de oxígeno debe ser alta, según los resultados obtenidos por la Bergbau-Forschung de la velocidad de oxidación en función del índice de materias volátiles.

El azufre pirítico se sitúa entre 1,01 y 5,38%. Estos contenidos, susceptibles de reaccionar con el oxígeno en presencia de humedad, pueden ser un factor para comenzar el calentamiento.

6.1.3.- Descripción de los métodos de explotación

6.1.3.1.- Pozo Pilar

Se encuentra en la cuenca carbonífera de Utrillas-Escucha. Este pozo era explotado por Minas y Ferrocarriles de Utrillas, S.A. El pozo está localizado en el término municipal de Escucha en la provincia de Teruel.

La empresa tenía una producción anual de 400.000 t aproximadamente, con una plantilla media de 479 trabajadores.

Explotaban 2 capas de lignito, de un paquete de 6 capas nombradas de 1ª a 6ª. Las capas que explotaban eran la 4ª y la 6ª.

Las capas seguían un criterio de numeración siendo la 1ª la más cercana a techo y la 6ª la más cercana a muro.

La capa 4ª tenía una potencia que oscilaba entre 1 y 2 m. Con una pendiente que oscilaba entre 10° y 35°.

La capa 6ª tenía una potencia que oscilaba entre 2,50 y 3,50 m con pendiente similar a la 4ª.

Los hastiales de las capas son, en general, bancos de pizarras carbonosas y de potencias variables.

La preparación en carbón, en su explotación, iba adelantada para asegurar la ventilación y para que no hubiese paradas en los cambios de los tajos.

La explotación se realizaba con tajos largos en dirección con hundimiento y en retirada.

El arranque se realizaba con una rozadora cargadora Anderson AB-16 y el transporte en el tajo era mediante un panzer EKF-1 de cadena central.

La entibación se realizaba con escudos Hemscheidt. Esta entibación era rápida, de manera que impide que la parte del techo caiga sobre la zona de trabajo.

Según se va avanzando, se practican tabiques laterales, que separan las galerías de base y de cabeza del postaller.

También se realizan tabiques que cierran las guías de cabeza y de base.

Los tabiques laterales se hacen continuamente, mientras que los tabiques en las guías se hacen cada 4 m aproximadamente.

De esta manera se pretende evitar la entrada de aire en el hundido, lugar principal donde ocurren los fuegos. También actúan sobre la ventilación para que exista una depresión mínima para que las corrientes piratas sean también mínimas.

Para la extinción de fuegos, colocan una tubería en el hundimiento y a medida que se avanza se prolonga aquella. Su función es la de poder inyectar al N_2 a través de ella. El N_2 es un gas inerte que desplaza al O_2 del hundido.

También colocan tuberías, dentro de la de inyección de N_2 , para tomar muestras de la atmósfera del hundido.

6.1.3.2.- Innominada

Este pozo está ubicado en el término municipal de Andorra en la provincia de Teruel.

Explota la capa P que tiene una potencia media de 9 m con una pendiente aproximada de 12° .

La producción anual es de 280.000 con una plantilla de 490 obreros.

El método de explotación es tajo largo en dirección, mecanizado con sutiraje al techo y arranque con rozadora de doble tambor. La explotación es en retirada.

Primeramente se traza la galería general en caliza y desde ésta se realizan recortes hasta situarse en el carbón y se hacen los niveles de base y de cabeza.

Uniéndolos estos dos niveles se traza el tajo de arranque. El arranque se hace de aproximadamente 1,20 m con rozadora y se dispara la llave para arrancar todo el carbón hasta el techo de la capa. Los tiros además de sacar el carbón rompen el techo para evitar su peso sobre la entibación y para que cierre el hundido evitando las corrientes piratas lo máximo posible.

El aprovechamiento es el máximo posible intentando no dejar carbón en el postaller.

Se realizan tabiques tanto en la guía de cabeza como en la base. Estos tabiques son de bloques y enlucidos con yeso.

También se colocan tuberías en el hundido para inyección que se van prolongando a medida que se avanza el tajo.

Cuando se produce algún indicio de fuego, se utiliza espuma Isoschaum a lo largo de taller para evitar la entrada de aire en el hundido y se inyecta espumógeno de alta expansión M-260 que absorbe el O₂ del ambiente y refrigera la zona del hundimiento. En las guías también se producen conatos. Para extinguirlos se sanean y se inyecta agua en los hastiales.

En el techo se pueden formar campanas debido a tensiones y por la falta de madera que lo impida. En estas campanas no hay buena refrigeración por lo que se producen fenómenos de combustión.

En las zonas que los fuegos son visibles, a lo largo de las guías por ejemplo, la inyección se realiza con agua. En zonas de hundimiento en los cuales no es visible se utilizan, como ya se ha dicho, espumas.

6.1.3.3.- Oportuna

Esta mina se explota por el método de sutiraje por niveles con rozadora puntual PK-3.

Consiste en acceder desde la galería general y recorte, por un pozo inclinado en estéril y después, en uno y otro sentidos, según la dirección de la corrida, hacer sendos niveles a muro de la capa, mediante rozadoras PK-3, a diferentes cotas para su posterior explotación, la cual se lleva a efecto retirando el sostenimiento, provocando el hundimiento y recogiendo el carbón del fondo del nivel con la propia PK. La extracción de carbón de cada cámara finaliza cuando ésta no contiene más que el estéril del techo de la capa. En

este momento, se deja una protección de 4-5 cuadros de sostenimiento y se repita la operación primitiva de retirada de sostenimiento, hundimiento y carga del carbón con la PK.

En general, la velocidad de avance de los niveles es de 6 m/día con una producción de 15 T/m.

La velocidad de retroceso es de unos 2,25 m/día con una producción de 15 T/hora sutiraje, lo que equivale a unas 70 T/m.

La producción total de cada nivel oscila entre 4.000 y 6.500 T. La vida de cada nivel es de 4 a 5 semanas.

La ventilación de los subniveles se realiza mediante un ventilador aspirante Zitrón de 15 kW teniendo la tubería de ventilación un diámetro de 600 mm.

El sostenimiento se lleva a cabo con unos cuadros metálicos 2UA perfil TH de 29 kg/m que se colocan cada 0,50 m unidos por tresillones y como ayuda a los cuadros se colocan mampostas de fricción.

La potencia media de la capa es de 12 m con una pendiente de 30°.

La longitud de cada nivel es de aproximadamente 50 m.

La distancia entre ejes de los niveles es de 15 m dejando un macizo con el nivel superior de 6 m.

El aprovechamiento total es del 54%.

Estos niveles se tabican al finalizar su explotación con tabiques de bloques y se realiza un enyesado sobre el tabique para evitar cualquier entrada de aire.

Al finalizar la vida del cuartel se tabica tanto el recorte de cabeza como el de base.

El peligro de fuego se puede producir si al sutirar se comunica la cámara que se está explotando, con una cámara del nivel superior a éste produciéndose una circulación de aire. Lo normal es que al sutirar una cámara, llegue al techo de la capa y caiga estéril hasta llenar completamente la cámara. Al ser el techo muy deleznable la cámara queda aproximadamente hermética, aunque se deja casi un 50% del carbón por lo que si existe cualquier corriente pirata puede originar un autocalentamiento.

Si se produce un indicio de fuego en una cámara, se inyecta agua directamente sofocando la propagación y mientras se retira material, máquina y transportador procediendo a aislar la zona con un tabique de cañizos y yeso. Posteriormente, se realiza junto a éste otro tabique de bloques e inyección periódica de espumógeno de alta expansión, mediante la instalación de una tubería metálica rígida.

Al estar todas las galerías y planos en roca, sólo existe la posibilidad de fuego en las labores en carbón que son únicamente los niveles y sus cruceros.

En los niveles también se pueden observar calentamientos que no acaban en fuego por la corta vida del nivel y su siguiente tabicación.

El piso se hincha mucho creándose porosidades en el carbón.

Para evitar esto se hacen rebajes y se riega con agua para disminuir la temperatura.

En los niveles se producen tensiones que hacen disminuir la sección y provocan fisuras en el carbón que permiten la entrada del aire y el posterior calentamiento de los hastiales.

También se producen campanas, por la falta de madera, en las cuales se observan calentamientos que no llegan a ser un peligro por la corta duración de la explotación del nivel.

En estas campanas no existe refrigeración ya que no le llega ventilación y han llegado a temperaturas cercanas a los 60 °C.

También existen acumulaciones de carbón debajo de las cintas transportadoras que pueden llegar a ser un foco de fuego. Estas acumulaciones han sido estudiadas y se ha observado aumentos de temperatura. Estas acumulaciones se limpian cada cierto tiempo lo cual impide su peligro.

6.1.3.4.- Pedraforca

La empresa está ubicada en la localidad de Saldes, en la provincia de Barcelona.

Tienen una producción diaria bruta de 750 T con una plantilla total de 166 trabajadores.

Explotan 2 paquetes, el Norte que comprende las capas 2^{as}, 4^{as} y General-Vieja, y el Sur que tiene las capas 5^{as} y 6^{as}.

El método de explotación es de subniveles con minador y con explosivos.

El paquete Norte se explota con un mismo pozo de acceso en roca para las 3 capas, de manera que cada recorte desde el pozo atraviesa las 3 capas en cada una se realizan 2 subniveles de 110 m cada uno.

El paquete Sur se explota con un pozo de acceso en carbón y en cada recorte se hace un único subnivel explotando a la vez las capas 5^{as} y 6^{as}. La razón de tener un solo subnivel es porque esa zona está limitada por una falla.

Los subniveles tienen una longitud de 200 m.

La distancia entre subniveles es de unos 13 m realizándose un total de 6 recortes a la capa en el pozo.

El sostenimiento se hace con cuadros metálicos 2UA de 16,5 kg/m y perfil THN.

La ventilación es soplante con ventiladores de 7,5 kw y 15 kw. La tubería de ventilación tiene un diámetro de 400 mm.

El avance se realizaba con explosivos o con minador. Con explosivo, la velocidad de avance es de 5,4 m/día y con minador es de 10 a 12 m/día.

El sutiraje se realiza con explosivo de seguridad nº 9 de manera que cale con el subnivel superior.

La velocidad del sutiraje es de 2 m/día.

Cuando finalizan cada subnivel lo cierran con llave de madera y espuma Auxfoam que es una espuma de tipo orgánico.

Posteriormente colocan 2 tabiques de ladrillo en el recorte separados 30 cm entre ellos y se rellenan de espuma. Dejan unas cánulas para inyección y para toma de muestras de gases. Al ser una mina grisosa, hay acumulaciones de grisú por lo que dejan en los tabiques una pequeña ventana para su dilución.

Si existiese algún principio de fuego, se tabicarían esas ventanas dejando sin aporte de oxígeno la zona conflictiva. El carbón apenas presenta fracturación en los niveles ya que al abrir el hueco minero y durante su avance y sutiraje apenas existen convergencias.

En una capa grisosa, el metano crea una atmósfera inerte alrededor de la superficie del carbón y puede relentizar el proceso de oxidación a baja temperatura.

Sin embargo, la velocidad de desorción del metano disminuye con el tiempo y las superficies del carbón pueden quedar expuestas a la oxidación.

6.2.- TRABAJOS REALIZADOS EN MINA

6.2.1.- Labores estudiadas

a) Mina Oportuna (Teruel)

El estudio en la mina Oportuna se realizó en el cuartel 31 de la capa P, concretamente en los subniveles 3111, 3121 y 3152.

* Subnivel 3111

El subnivel 3111 alcanzó una longitud de 46,2 m, con una duración del avance de 11 días y 28 días de sutiraje.

La velocidad media de avance fue de 4,2 m/día y la de retirada de 2,56 m/día.

La producción en avance fue de 693 t y la de sutiraje de 2151 t, lo que hace un total de 2844 t.

* Subnivel 3121

El nivel 3121 alcanzó una longitud de 65,4 m. El avance tuvo una duración de 8 días y el sutiraje duró 28 días.

La velocidad media de avance fue de 8,18 m/día y la de retirada de 2,33 m/día.

La producción en avance fue de 981 t y en sutiraje de 3724 t, con una producción total de 4315 t.

* Subnivel 3152

La longitud de este subnivel fue de 62 m, con una duración del avance de 13 días y del periodo de sutiraje de 30 días.

La velocidad media de avance fue de 4,7 m/día y la de retirada de unos 2 m/día.

La producción en avance fue de 932 t y la de sutiraje de unas 2960 t que hacen un total aproximado de 3900 t.

b) Mina Santa Bárbara (Barcelona)

El estudio de la mina Santa Bárbara se realizó en el 5º subnivel del cuartel que explotaba conjuntamente las capas 5^{as} y 6^{as}.

6.2.2.- Instrumentación utilizada

a) Medición de CO

Para la detección del CO se utilizaron: Un detector Sieger modelo SCO-2M, un detector Minelec modelo CO260, y otro detector Sieger modelo BC01.

- El primero de ellos tiene un rango de medida entre 0 y 200 ppm, con una precisión de ± 1 ppm.
- El CO260 tiene un rango de medida entre 0 y 2000 ppm, con una precisión de ± 1 ppm.
- El BC01 es un detector de registro continuo de concentración de CO en el aire, compuesto por una unidad central y una unidad de registro.

El rango de medida es seleccionable entre 0 y 50 ppm ó entre 0 y 200 ppm. La precisión es de 1 ppm.

b) Medición de O₂

Para la medición del contenido de O₂ en la atmósfera se utilizaron el detector Sieger modelo OXD-2M y el detector de O₂ y CH₄ Minelec modelo MX-240.

- El rango de medida del OXD-2M está comprendido entre 0 y 30% en volumen y la precisión del aparato es del 0,1%.
- El rango de medida del O₂ en el MX-240 está comprendido entre 0 y 100% y la precisión es del 0,1%.

c) Medición de CO₂

Para la medición de CO₂ se utilizó el aparato de medición de gases Multiwarm de Dräger. Este instrumento permite la medición del CO₂ y el O₂ en la atmósfera.

d) Medición de otros gases

Se utilizaron tubos de control Dräger que, junto a la bomba automática Quantimeter 1000, sirven para la determinación de gases en el aire.

e) Medición de la temperatura ambiente

Se utilizaron cuatro aparatos de medición:

- El psicrómetro Jules Richard y Pekly, para la medición de las temperaturas seca y húmeda.

- El anemómetro y medidor de temperatura Velocicalc de TSI, modelo 8350. El rango de medida de la temperatura está comprendido entre $-17,8$ y $93,3$ °C y la precisión es de $\pm 0,1$ °C.
- El termohigrómetro digital portátil 816 marca Lambrecht, para determinar la humedad y temperatura del aire. Los márgenes de medida de la temperatura están comprendidos entre -10 °C y 70 °C y la precisión es de ± 1 °C.
- El termohigrómetro Sieger modelo TH1, de registro continuo de temperatura y humedad ambiente, compuesto por una unidad central, una unidad de registro y un cabezal detector. El rango de medida de la temperatura está comprendido entre -10 °C y 70 °C.

f) Medición de la humedad relativa de la atmósfera

Para esta medición se utilizaron los siguientes aparatos:

- Termohigrómetro digital portátil 816 marca Lambrecht. Los márgenes de medida de la humedad están comprendidos entre 5 y 92% con una precisión de $\pm 0,1\%$.
- Regla de cálculo de humedad del psicrómetro Jules Richard y Pekly.
- Termohigrómetro Sieger modelo TH1. El rango de medida de la humedad está comprendido entre 0 y 100% .

g) Medición de la velocidad del aire

Se utilizaron los siguientes instrumentos de medición:

- Anemómetro Velocicalc TSI, modelo 8350. El rango de medida está comprendido entre $0,08$ m/s y 50 m/s y la precisión es de $0,01$ m/s.

- Anemómetro Sieger, modelo BA5 de registro continuo, compuesto por una unidad central, una unidad de registro y un cabezal detector. Los rangos de medida pueden ser:

0 - 2 m/s

0 - 5 m/s

0 - 10 m/s

0 - 20 m/s

h) Medición de las temperaturas superficiales

Se utilizó el aparato Thermopoint 40, provisto de un detector infrarrojo para evaluar la temperatura superficial de un objeto. El rango de temperatura es de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la precisión del aparato es de $\pm 1\%$ de la lectura.

i) Medición de las temperaturas internas

Para las mediciones de las temperaturas internas del macizo y para las de las acumulaciones de carbón, se utilizaron termopares del tipo Pt-100. Para la lectura de las temperaturas de los termopares se utilizó el Thermodigit PM-3910, cuya precisión es de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.2.3.- Mediciones en mina

El 1 de Octubre de 1991 se comenzó la campaña de mediciones en la Mina Oportuna de ENDESA, situada en el término municipal de Andorra, en la provincia de Teruel.

El estudio se realizó en el cuartel 31 de la Capa P, en los subniveles 3111, 3121 y 3151 situados entre las plantas 10ª y 11ª, con la siguiente distribución en el tiempo:

	Fecha inicio	Fecha finaliz.
Subnivel 3111	1-10-91	4-11-91
Subnivel 3121	11-11-91	27-12-91
Subnivel 3151	13-1-92	21-2-92

En los referidos subniveles y durante todo el periodo de explotación, se realizaron los trabajos siguientes:

- Monitorización de los parámetros ambientales
- Monitorización de temperaturas superficiales en los hastiales de carbón
- Medición de las temperaturas internas del macizo de carbón
- Estudio de puntos de calentamiento en las campanas de los subniveles
- Estudio de la evolución de las temperaturas interna y superficial con el volumen de las acumulaciones de carbón, en reboses de cintas transportadoras y otros puntos de las explotaciones

Además de estos trabajos, se realizaron mediciones de la evolución de los parámetros ambientales durante las paradas de la ventilación secundaria en el nivel 3152 de la Mina Oportuna, los días 1-2-92 y 2-2-92.

En la Mina Santa Bárbara de Carbones de Pedraforca, S.A. (Barcelona) se analizó también una parada de la ventilación secundaria, en el 5º subnivel de las capas 5ª y 6ª.

Estos trabajos se complementaron con visitas al Pozo Pilar de Minas y Ferrocarriles de Utrillas, sin actividad extractiva, situado en la localidad de Escucha (Teruel), donde se recogió información sobre los fuegos ocurridos en sus explotaciones y sobre los métodos de prevención aplicados.

A continuación figura una relación de los parámetros medidos durante el periodo de explotación de los subniveles y las paradas de ventilación.

a) Parámetros ambientales

- Contenidos de monóxido de carbono y oxígeno en la atmósfera de los subniveles
- Temperaturas seca y húmeda, y humedad relativa en el ambiente
- Velocidad y caudal del aire de ventilación en los subniveles y en los ventiladores secundarios aspirantes
- Presión atmosférica en los subniveles y en el exterior de la mina

Todas las mediciones se realizaron en tres puntos distintos: Cuadros próximos al recorte, zona central y frente del subnivel (figura 28)

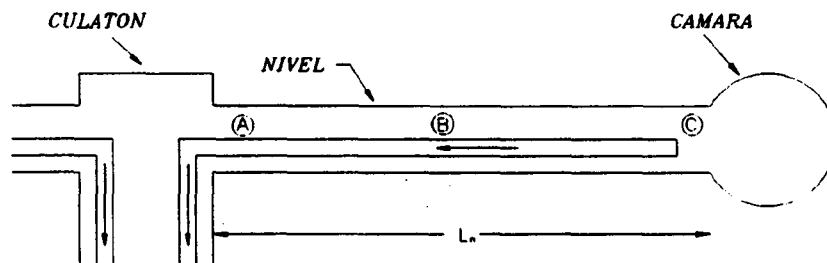


Figura 28.- Distribución de las mediciones

Los datos sobre los parámetros ambientales medidos en los subniveles 3111, 3121 y 3152 de Oportuna se encuentran en los Anexos 1.1, 2.1 y 3.1, respectivamente.

b) Temperaturas superficiales de los hastiales

Las temperaturas superficiales se midieron en cuatro puntos de secciones rectas distanciadas 2 m a lo largo de los subniveles. La distribución de los puntos en cada sección aparece en la figura 29.

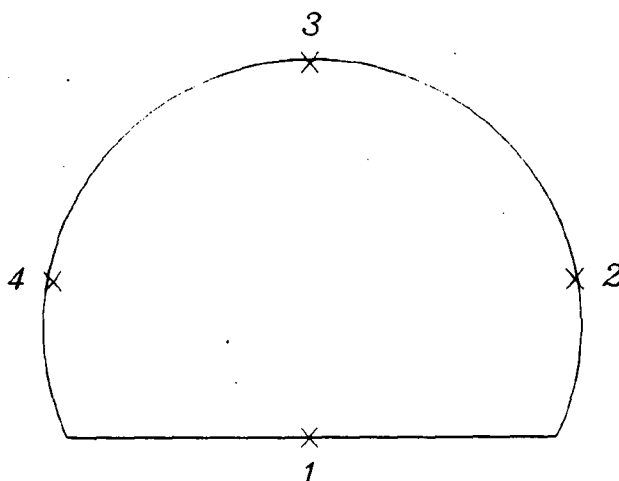


Figura 29.- Puntos de medición de las temperaturas superficiales

Los datos sobre las temperaturas superficiales medidas en los subniveles 3111, 3121 y 3152 se encuentran en los anexos 4, 5 y 6, respectivamente.

c) Temperatura interna del macizo de carbón

Para medir la evolución de la temperatura interna del macizo de carbón, se instalaron termopares en varios puntos con distintas disposiciones, a profundidades de 0'25, 0'50 y 1 m.

* Subnivel 3111 Oportuna

El 17-10-91 se instalaron en este subnivel 8 termopares con la siguiente posición y distribución (figura 30):

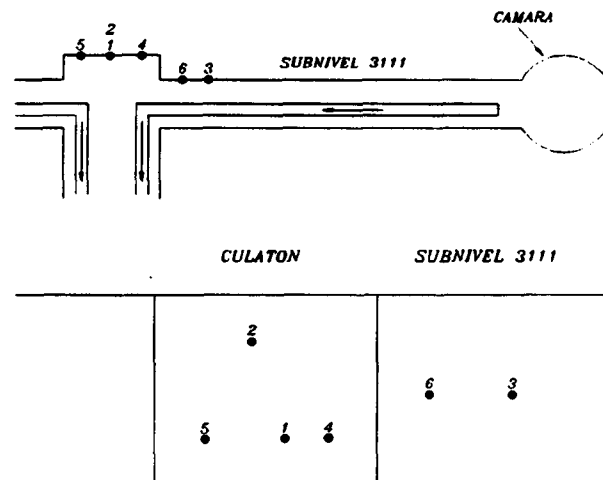


Figura 30.- Distribución de los termopares en el subnivel 3111

Los termopares n^{os} 1, 2, 3 y 8 se colocaron a una profundidad de 1 m en el macizo de carbón y los n^{os} 4, 5, 6 y 7 a 0'50 m.

Los valores de la temperatura y la variación de la temperatura con el tiempo obtenidos en el subnivel 3111, se encuentran en los Anexos 8 y 9 respectivamente.

*** Subnivel 3121 Oportuna**

El día 29-11-91 se instalaron en el subnivel 3121 un total de 12 termopares con la siguiente posición y distribución (figura 31)

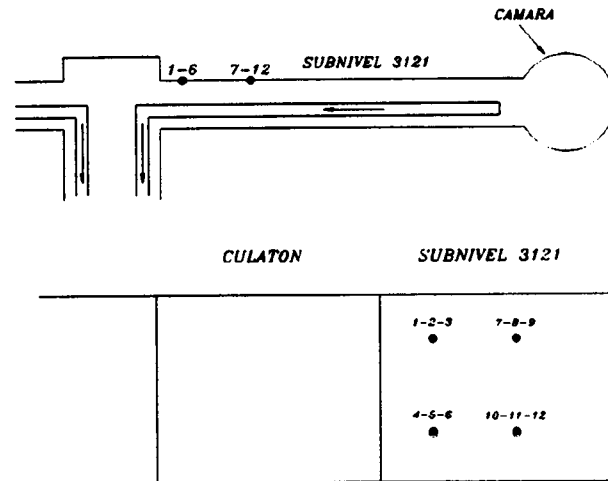


Figura 31.- Distribución de los termopares en el subnivel 3121

Los termopares n^{os} 1, 4, 7 y 10 se colocaron a una profundidad de 1 m, los n^{os} 2, 5, 8 y 11 a 0'50 m y los n^{os} 3, 6, 9 y 12 a 0'25 m.

Los valores de la temperatura y la variación de la temperatura respecto al tiempo se encuentran en los Anexos 10 y 11, respectivamente.

* Subnivel 3152 Oportuna

El día 13-1-92 se instalaron en el subnivel 3152 un total de 15 termopares con la distribución indicada en la figura 21, sobre el perímetro de una sección recta del subnivel situada a 5 m del recorte, como se observa en la figura 32.

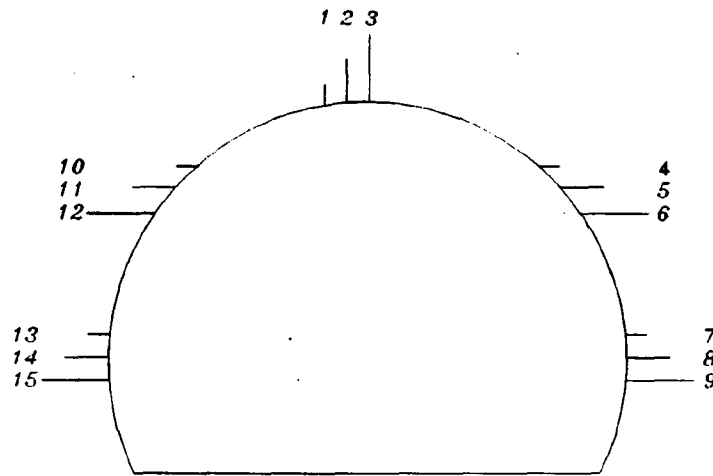


Figura 32.- Distribución de los termopares en el subnivel 3152

Los termopares nºs 1, 4, 7, 10 y 13 se colocaron a una profundidad de 1 m, los nºs 2, 5, 8, 11 y 14 a 0'50 m y los nºs 3, 6, 9, 12 y 15 a 0'25 m.

Los valores de la temperatura y la variación de la temperatura respecto al tiempo se encuentran en los Anexos 12 y 13, respectivamente.

d) Estudio de puntos de calentamiento en las campanas de los subniveles

En el nivel 3111 se realizó un seguimiento de la evolución de las campanas que se forman en la bóveda del subnivel, en las que se detectó un calentamiento progresivo. El periodo de estudio comenzó el 14-10-91 y finalizó el 22-10-91, fecha en la que el frente de sutiraje alcanzó la posición de las campanas.

Se realizaron mediciones de la concentración de CO, O₂, CO₂, SH₂, SO₂ y NO_x, de la temperatura superficial del carbón y de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire en la atmósfera de la campana. Los valores de dichas mediciones se encuentran en el Anexo 7.

e) Estudio de la evolución de las temperaturas interna y superficial con el volumen de las acumulaciones de carbón en cintas transportadoras y otros puntos de la explotación

En el periodo comprendido entre los días 18-11-91 y 27-12-91 se estudió la evolución de las temperaturas interna y superficial de las acumulaciones progresivas de carbón que se produjeron bajo el transportador PF-1 del recorte de base que evacuaba el carbón del cuartel 1012, situado en la zona Este de la mina Oportuna.

Se colocaron termopares en cinco puntos distintos de acumulaciones de carbón.

Los valores del volumen acumulado de carbón y las temperaturas internas y superficial se dan en el Anexo 14. La representación de las temperaturas internas en función del volumen acumulado se encuentran en el Anexo 15.

f) Evolución de los parámetros ambientales durante las paradas de ventilación

* Mina Oportuna (Endesa)

Durante el periodo de avance del subnivel 3121 se produjeron dos paradas de ventilación no programadas, los días 12 y 19 de noviembre de 1991.

La primera parada tuvo lugar cuando el subnivel tenía una longitud de 20 m y duró 37 minutos, y la segunda parada cuando el subnivel tenía una longitud de 58 m y duró también 37 minutos.

En ambas paradas se realizaron mediciones de la evolución de la concentración de CO y O₂, de la humedad relativa y de las temperaturas seca y húmeda. Las mediciones se hicieron en el frente del subnivel.

A la vista de los resultados obtenidos en las paradas no programadas, se decidió realizar dos paradas de ventilación secundaria controladas durante un fin de semana.

Las paradas se realizaron los días 1 y 2 de febrero de 1992 en el subnivel 3152 de la Mina Oportuna, cuando éste se encontraba en fase de retirada y tenía una longitud de 36 m.

La primera parada tuvo una duración de 230 minutos y la segunda 245 minutos.

El tiempo de trabajo en el subnivel se vio limitado, ya que se alcanzaron niveles de riesgo en la concentración de oxígeno en la atmósfera.

Se realizaron mediciones de la evolución en el tiempo de los contenidos de CO, CO₂, O₂, temperaturas seca y húmeda, y humedad relativa del aire.

* Mina Santa Bárbara (Carbones de Pedraforca)

El día 28-3-92 se realizó una parada de ventilación durante 945 minutos en el 5º subnivel del cuartel que explotaba el paquete 5^{as} y 6^{as}. Se realizaron mediciones de la evolución de diversos parámetros ambientales en el tiempo.

f) Otros trabajos

El día 19-2-92 el subnivel 3121, que ya estaba explotado y tabicado, se abrió para realizar mediciones de O₂, CO, CO₂, temperaturas seca y húmeda, y humedad relativa del aire.

6.2.4.- Toma de muestras

En la Mina Oportuna se realizaron tomas de muestras de carbón y de la atmósfera en cada nivel estudiado. Las muestras se tomaron en el momento de la apertura de cada nivel y en la finalización de la explotación de los mismos. Se tomaron un total de 7 muestras de carbón y 7 de la atmósfera.

Las muestras que se tomaron fueron las siguientes:

Principio del nivel 3111

Final del nivel 3111

Principio del nivel 3121

Final del nivel 3121

Principio del nivel 3152

Final del nivel 3152

Principio del nivel 3172

6.3.- RESULTADOS OBTENIDOS

6.3.1.- Control de las labores

6.3.1.1.- Subnivel 3111

a) Parámetros ambientales

En el periodo de estudio de los parámetros ambientales se han observado pequeñas oscilaciones en los mismos pero sin ninguna tendencia ascendente o descendente marcada.

Para proceder al análisis de las variaciones ocurridas en el subnivel, se han calculado las diferencias existentes entre los datos tomados a la entrada del nivel (A) y los del frente (C), tal y como se observa en la figura 33.

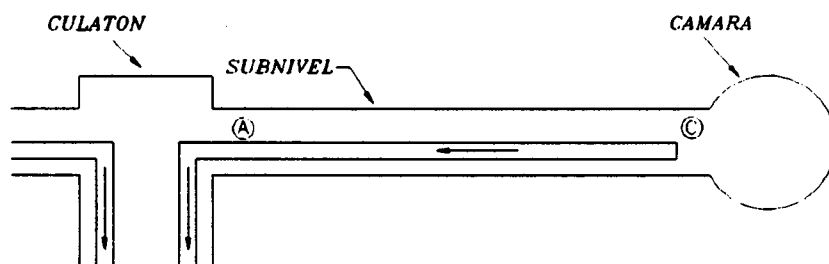


Figura 33.- A-Entrada del subnivel
C-Frente del subnivel

Así, por ejemplo, la variación de la temperatura seca en el nivel sería $T_C - T_A$. Las variaciones diarias se pueden observar en el siguiente cuadro.

PARAMETROS AMBIENTALES EN NIVEL 3111

Día	1	2	3	8	9	10	14	15	16	17	18	22	23	24	25	28	29	30	35
T _{SECA} (°C)	0,2	0	0,4	0,6	0,4	1,6	0,2	0	0,5	0,8	0,4	0	0	0,4	-	0,2	0	-	-
T _{HUMEDA} (°C)	0	0,2	0,4	0,5	0,2	0,8	0,2	0,6	0,6	0,4	0,1	0	0,2	0,2	-	0	0	-	-
T _{EQUIVAL} (°C)	0,02	0,18	0,40	0,51	0,22	0,88	0,2	0,54	0,59	0,44	0,13	0	0,18	0,22	-	0,02	0	-	-
H (%)	0	1	0	1	0	2	0	2	1	0	1	0	0	0	-	0	0	-	-
CO (ppm)	0	0	0	5	3	5	0	1	8	7	5	3	2	2	0	0	1	-	-
O ₂ (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-
Longitud de la labor (m)	24	30	34	45	35	35	27	27	25	25	25	16	16	15,50	12	9	9	9	0
Sección (m ²)	6,71	6,41	6,41	6,27	6,27	-	5,87	-	5,43	5,12	4,99	4,86	4,55	4,47	4,51	5,77	5,80	5,96	5,96
Velocidad (m/s)	0,64	0,50	0,60	0,60	0,53	-	0,41	-	0,76	0,73	0,79	1,16	1,22	1,22	1,04	0,70	0,70	0,70	0,57
Q _{labor} (m ³ /s)	3,94	3,09	3,80	4,07	3,63	-	2,81	-	4,91	4,88	4,93	5,28	5,45	5,51	4,68	4,06	4,06	4,06	3,40

a.1) Temperatura y humedad

La diferencia de temperaturas secas entre la entrada del nivel y el frente ha oscilado entre 0 °C y 1,6 °C. La media aritmética de las mediciones es de 0,36 °C.

El aumento de la temperatura húmeda a lo largo del nivel ha variado entre 0 y 0,8 °C. El valor medio de todas las mediciones es de 0,27 °C.

Relacionando esas dos temperaturas, seca y húmeda, se ha calculado la temperatura equivalente mediante la fórmula:

$$T_{EQ} = 0,9 \cdot T_{HUMEDA} + 0,1 \cdot T_{SECA}$$

mostrando una variación en sus valores entre 0 °C y un máximo de 0,88 °C. La media aritmética de las mediciones es de 0,28 °C.

La variación de la humedad entre el punto de entrada y el frente ha estado comprendida entre el 0% y 2%, siendo la media aritmética del 0,50%.

Las figuras 34, 35, 36 y 37 muestran las variaciones en el subnivel 3111 de la temperatura seca, húmeda, equivalente y humedad, respectivamente.

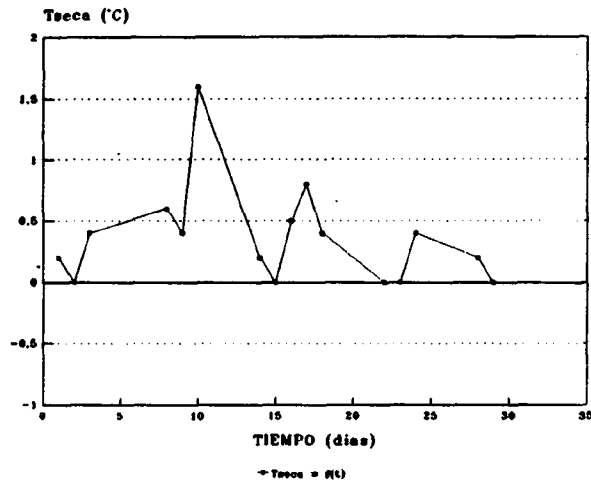


Figura 34.- Variación de la temperatura seca en el subnivel

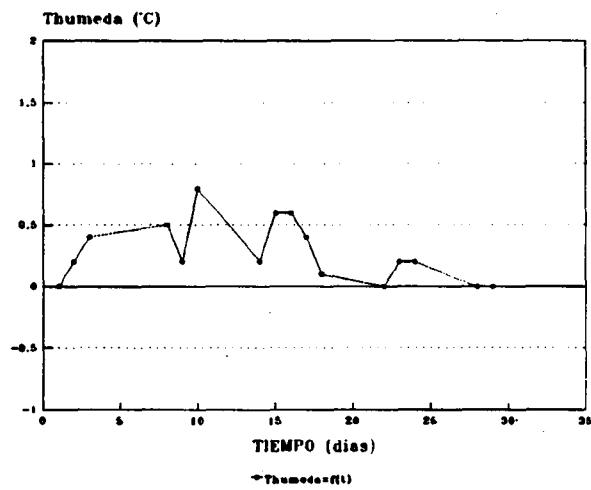


Figura 35.- Variación de la temperatura húmeda en el subnivel

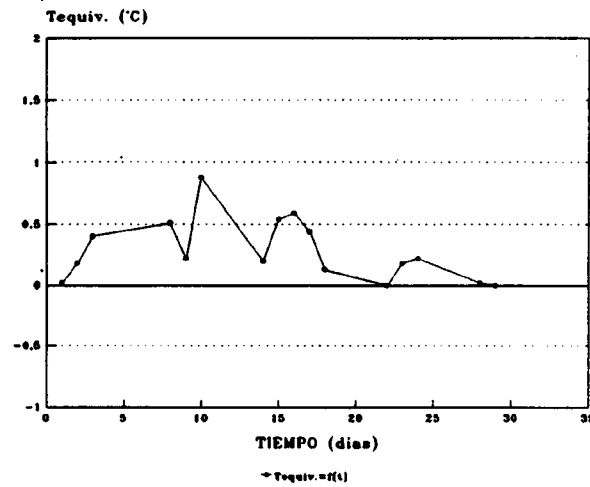


Figura 36.- Variación de la temperatura equivalente en el subnivel

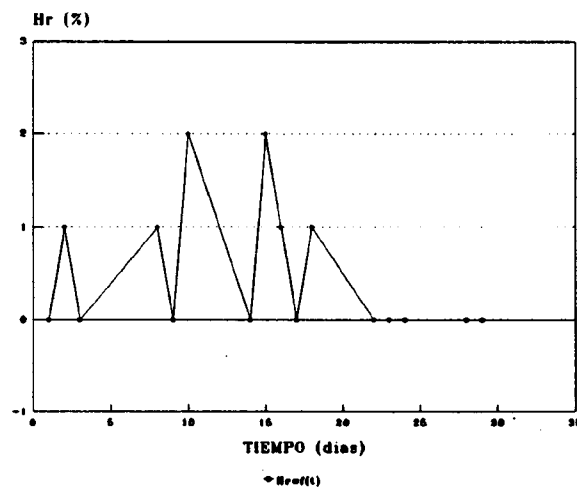


Figura 37.- Variación de la humedad relativa en el subnivel

a.2) Monóxido de carbono

El CO medido a lo largo del nivel se ha encontrado entre 0 ppm y 8 ppm (hay que tener en cuenta que el error del detector es de 1 ppm). El valor medio es de 2,47 ppm.

La figura 38 muestra la evolución del CO en el subnivel 3111.

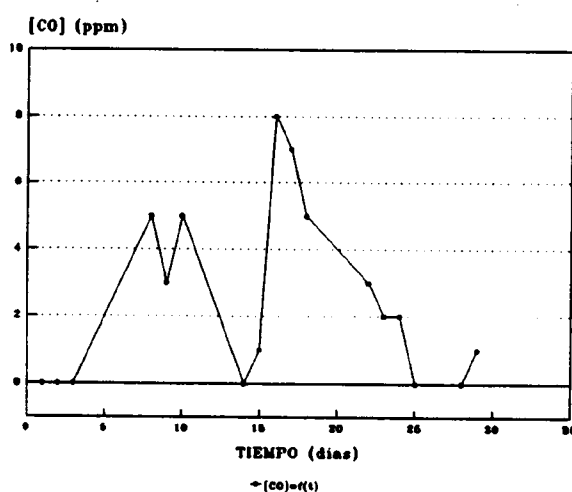


Figura 38.- Variación del contenido de CO en el subnivel

a.3) Oxígeno

En las mediciones realizadas sobre el consumo de oxígeno a lo largo de la labor, no se ha observado ninguna variación, aunque también hay que tener en cuenta que el error del aparato es del 0,1%.

La figura 39 muestra la evolución del O₂ en el subnivel 3111.

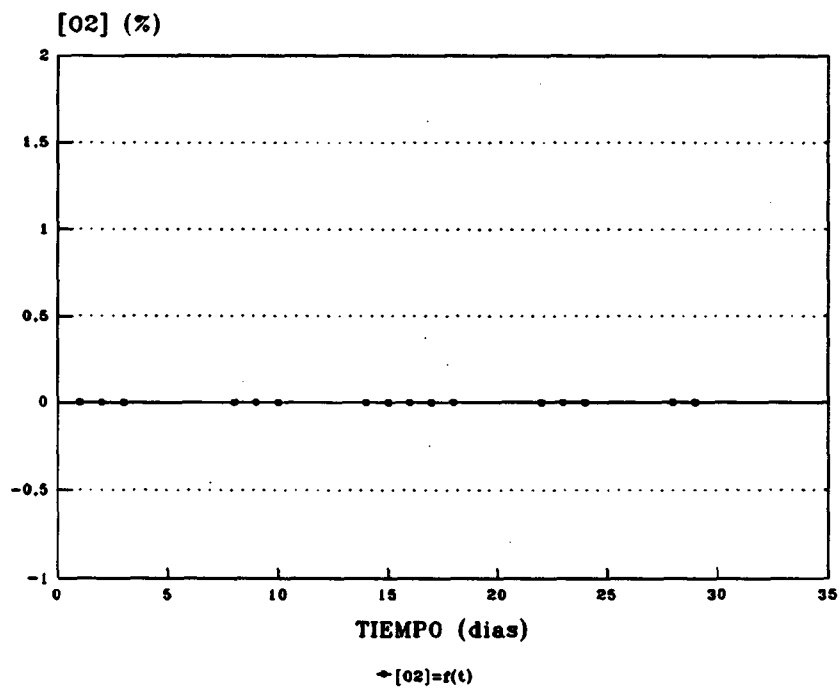


Figura 39.- Variación del contenido de O₂ en el subnivel

Todas estas variaciones no han sido acumulativas; es decir, la ventilación ha sido suficiente para mantener los parámetros ambientales más ó menos estables sin tendencia ascendente.

a.4) Caudal del aire

El caudal medio en la labor ha sido de $4,3 \text{ m}^3/\text{s}$ y la velocidad media de $0,76 \text{ m/s}$.

La velocidad del aire ha variado desde $0,50 \text{ m/s}$ hasta un máximo de $1,22 \text{ m/s}$.

Esta variación se debe a dos factores, las convergencias existentes en el nivel y el diferente caudal. En el instante en que la velocidad era de $0,5 \text{ m/s}$, la sección era de $6,41 \text{ m}^2$ y el caudal medio que bañaba la labor era de $3,09 \text{ m}^3/\text{s}$. El día que se midió una velocidad de $1,22 \text{ m/s}$, la sección era de $4,47 \text{ m}^2$ y el caudal medio de $5,51 \text{ m}^3/\text{s}$.

La sección del cuadro estudiado ha variado desde $8,72 \text{ m}^2$ en el momento de su colocación el día 25-9-91 y un mínimo, antes de rebajar, de $4,47 \text{ m}^2$ el día 24-10-91. Esto supone una disminución del $48,74\%$ en un mes que llevaba abierto el nivel.

Las figuras 40, 41 y 42 muestran las variaciones de la sección, velocidad del aire y caudal en el subnivel 3111.

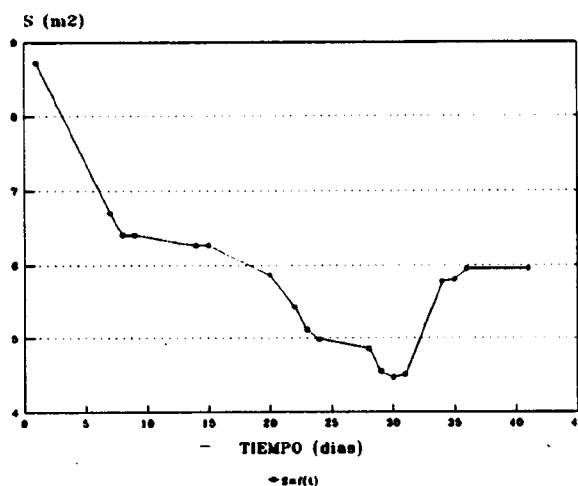


Figura 40.- Variación de la sección del cuadro n° 10 en el subnivel

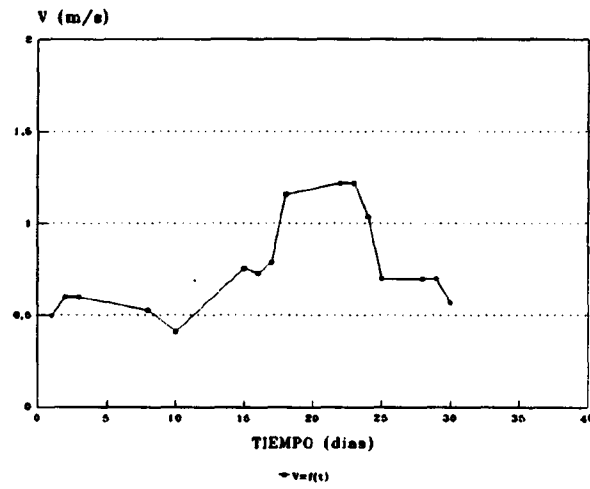


Figura 41.- Variación de la velocidad del aire en el subnivel

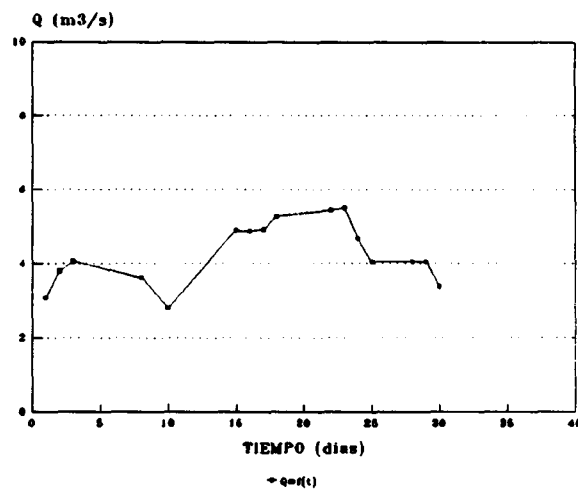


Figura 42.- Variación del caudal de aire en el subnivel

a.5) Presión atmosférica

Las diferencias de presión entre el exterior y la labor han variado entre 35 y 54 mbar. La media aritmética de las mediciones es de 45,11 mbar.

La figura 43 muestra las variaciones de la diferencia entre la presión atmosférica exterior y del subnivel.

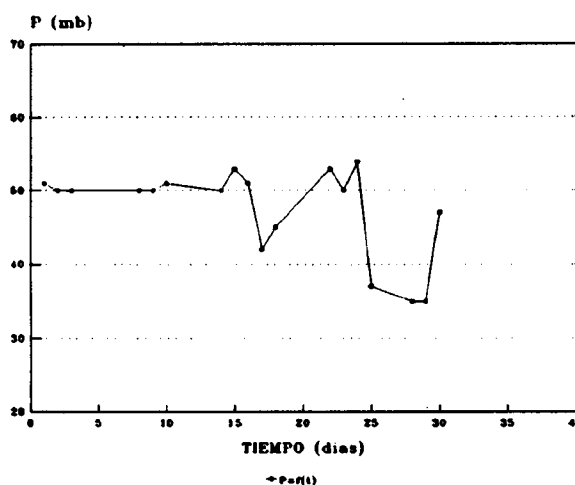


Figura 43.- Variación de la diferencia entre la presión atmosférica exterior y la del subnivel

Las variaciones de los parámetros ambientales del subnivel 3111, se encuentran en el Anexo 1.2.

a.6) Condiciones anormales detectadas

El día n° 10 la temperatura seca tuvo un aumento de 1,6 °C, la húmeda ascendió 0,8 °C por lo que la temperatura equivalente ha aumentado 0,88 °C. La producción

de CO fue de 5 ppm. El cambio de las condiciones de ventilación puede haber sido la causa de estos aumentos.

El día n° 14 el caudal fue de 2,81 m³/s. Esta disminución fue debida a la rotura de la tubería de ventilación que se solucionó y el día n° 16 aumentó hasta llegar a 4,91 m³/s, fecha en que se midió la concentración mayor de CO.

b) Temperaturas superficiales de los hastiales de carbón

Las temperaturas superficiales de los hastiales del nivel medidas con el pirómetro, tuvieron un valor inicial de 26 °C a lo largo de toda su longitud, excepto algún punto en la clave que alcanzó una temperatura de 28 °C.

El día 1-10-91 la temperatura superficial en la clave de la sección n° 8 fue de 28 °C, a los ocho días alcanzó 30 °C y siguió ascendiendo hasta el día 14-10-91 que llegó a 32 °C. Dos días después la temperatura era de 29 °C y descendió hasta 27 °C.

En otras secciones ha habido también calentamientos temporales, llegando a un máximo, en la sección n° 11 situada a 22 m del comienzo del nivel, de 44 °C el día 14-10-91.

Todos estos puntos de calentamiento se han detectado en la clave, debido a las campanas que aparecen y desaparecen por las tensiones que afectan al terreno.

Se puede observar que el día 14-10-91 las claves de las secciones estudiadas llegan a una temperatura máxima que coincide con el caudal mínimo.

En este día también se observan elevaciones de las temperaturas internas del macizo de carbón medidas con los termopares.

c) Temperaturas internas del macizo de carbón

Los termopares introducidos en el macizo de carbón de la forma ya descrita en el apartado anterior se colocaron el día 7-10-91, con unas temperaturas iniciales superiores a las medidas el 8-10-91. Esto es debido al calor generado por fricción al realizar la perforación de los barrenos para colocar los termopares.

El siguiente cuadro muestra las temperaturas internas así como los calentamientos internos del macizo.

Termopares de cruce

Termopar	Fecha	8-10	30-10	18-11	Diferencia (°C)
1		27	30	33	6
2		26	29	30	4
4		25	27	29	4
5		27	29,5	-	2,5

Termopares del nivel

Termopar	Fecha	8-10	17-10	30-10	15-11	Diferencia (°C)
3		25	28	29	-	4
8		-	25	29	-	4
6		30	32	34	37	7
7		-	30	32,5	36	6

Se puede observar que en los termopares n^{os} 3 y 8, que están a una distancia muy pequeña, la temperatura es la misma, como también ocurre con los n^{os} 6 y 7 aunque estos con una diferencia de 1 °C.

Se puede observar también que los termopares n^{os} 3 y 8 que están a una distancia muy pequeña la temperatura final es la misma, aunque en el momento de la colocación del termopar n^o 8 había una diferencia inicial de 3 °C.

Lo mismo ocurre con los termopares 6 y 7, aunque las temperaturas finales de éstos difieran en 1 °C.

A título de ejemplo, la figura 44 muestra la evolución de la temperatura en el termopar n^o 6.

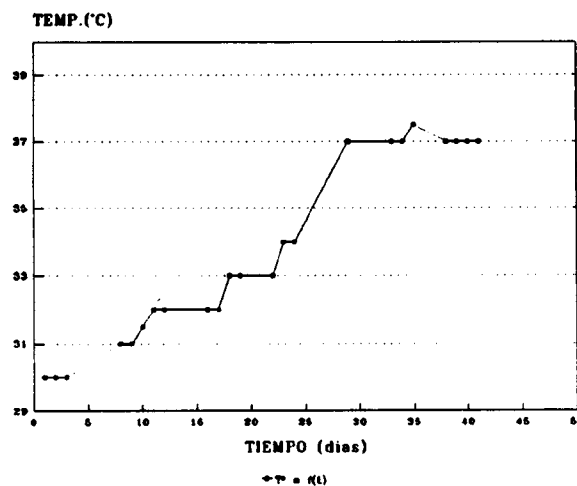


Figura 44.- Evolución de la temperatura en el termopar n^o 6

d) Estudio de los puntos de calentamiento en las campanas del subnivel 3111

El día 14-10-91 se tomaron datos sobre dos campanas que se encontraban a 8 y 10 m del principio del nivel.

La más cercana a ese punto, llamémosla campana 1, tenía una profundidad de 0,30 m, una longitud de 0,50 m y una anchura de 0,25 m. La otra, campana 2, tenía una profundidad de 0,50 m, una longitud de 1 m y una anchura de 0,35 m.

En las primeras mediciones realizadas sobre estas campanas se encontró que en ambas el contenido de CO era de 4 ppm y la concentración de O₂ era de 20,7%, la velocidad del aire en su interior era 0 m/s.

d.1) Campana 1

En la campana 1 se observó que el contenido de CO no sufrió apenas variación en los ocho días de observación (14-10-91 a 22-10-91).

La temperatura superficial del fondo de la campana comenzó con 31 °C y fue disminuyendo hasta 29 °C. En O₂ se observó un consumo de 0,2% el 14-10-91, pero pasados dos días no se observó consumo alguno, salvo el error cometido por el aparato. La humedad llegó al 100%, observándose como "sudaba" el carbón. El contenido de CO₂ tampoco tuvo grandes variaciones, encontrándose valores de 0,10 y 0,08%.

d.2) Campana 2

En cambio, en la campana 2 se observó un consumo continuo de O₂ que comenzó con 0,2% y llegó hasta un 1,3% el día 18-10-91; el día 22 el consumo descendió hasta el 0,7%. La producción de CO comenzó con 4 ppm hasta llegar a 40 ppm el día 17 y 35 ppm el día 18. El contenido de CO₂ varió desde 0,17% el día 15

hasta 0,30% el día 18. El día 22 el CO descendió hasta 26 ppm y el CO₂ hasta 0,15%.

La temperatura superficial era de 33 °C el día 15 y se mantuvo hasta el día 18, siendo de 31 °C el día 22.

El día 17 se colocó un termopar a 25 cm de profundidad en el fondo de la campana observándose que su temperatura inicial de 28 °C no varió por lo que el calentamiento era superficial.

La humedad relativa del aire se encontró en el 100% en todo el periodo de observación.

El día 15 se midieron otros gases como SH₂, SO₂ y NO_x en la campana, dando como resultado el 0% para todos ellos.

El valor del coeficiente de Graham, que relaciona la producción de CO con el consumo de O₂, se muestra en el cuadro siguiente:

Fecha	14-10	15-10	16-10	17-10	18-10	22-10
G	0,20	0,45	0,30	0,30	0,26	0,37

Estos resultados no muestran una línea ascendente, lo cual indica que este calentamiento es debido a la meteorización del carbón, sin tendencia al fuego.

6.3.2.- Subnivel 3121**a) Parámetros ambientales**

En el periodo de estudio las variaciones ocurridas en el nivel, calculadas como en el caso anterior, han dado los resultados expuestos en el siguiente cuadro.

PARAMETROS AMBIENTALES EN NIVEL 3121

Día	1	2	3	4	5	8	9	15	16	17	18	30	31	32	33	36	37	38	39	40	46	47
T _{SECA} (°C)	0,40	0,60	0,40	0	0	0,40	0,60	0,80	0,20	0,60	0,20	0,30	0,20	0	0,20	0,60	0,20	0,20	0	0,20	0,20	0,20
T _{HUMEDA} (°C)	0,40	0,20	0,40	0,20	0	0,60	0,80	0,60	0,20	1,0	0,60	0,20	0	0	0,20	0,40	0,20	0,20	0	0,20	0	0,20
T _{EQUIVAL} (°C)	0,40	0,24	0,40	0,18	0	0,58	0,78	0,62	0,20	0,96	0,56	0,21	0,02	0	0,20	0,42	0,20	0,20	0	0,20	0,02	0,20
H (%)	0	2	0	2	0	2	2	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO (ppm)	1	1	3	2	3	3	3	2	3	2	2	3	3	1	1	1	2	2	3	2	1	2
O ₂ (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Longitud de la labor (m)	14,5	21	24	32	41	52	58	50,5	50	49	44	31	31	30	30	24	24	21	20	20	11,50	11,50
Sección (m ²)	8,05	7,90	7,68	7,29	7,16	6,78	6,78	6,43	6,38	6,38	6,31	5,53	5,51	5,51	5,43	5,06	5,06	4,99	4,99	4,92	6,17	6,17
Velocidad (m/s)	0,48	0,48	0,48	0,40	0,40	0,40	0,39	0,44	0,44	0,46	0,53	0,51	0,52	0,52	0,53	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,44	0,46
Q _{labor} (m ³ /s)	3,51	3,37	3,37	2,62	2,67	2,34	2,28	2,50	2,47	2,58	2,89	2,61	2,70	2,60	2,55	2,80	2,64	2,61	2,64	2,61	2,42	2,53

a.1) Temperatura y humedad

La temperatura seca ha variado entre 0 °C y 0,8 °C y la temperatura húmeda entre 0 °C y 1 °C. La temperatura equivalente sufre variaciones entre 0 y 0,96 °C y la humedad relativa del aire entre 0 y 4%. Realizando la media aritmética de cada uno de los parámetros nos dan los siguientes valores medios: Temperatura seca 0,30 °C, temperatura húmeda 0,30 °C, equivalente 0,30 °C y humedad relativa del aire 0,64%.

El máximo encontrado en la temperatura corresponde al comienzo del sutiraje, cuando la longitud de la labor era de 50,5 m el día 25-11-91.

El 27-11-91 la temperatura equivalente tuvo un máximo de 0,96 °C coincidiendo con el máximo de la humedad relativa y de la temperatura húmeda.

Las figuras 45,46, 47 y 48 muestran las variaciones en el subnivel 3121 de la temperatura seca, húmeda, equivalente y húmeda respectivamente.

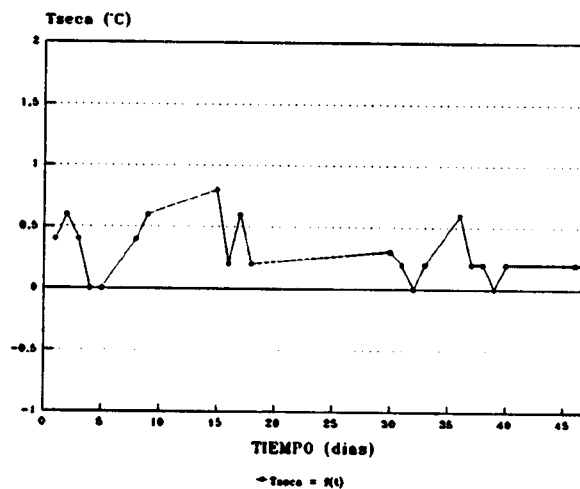


Figura 45.- Variación de la temperatura seca en el subnivel

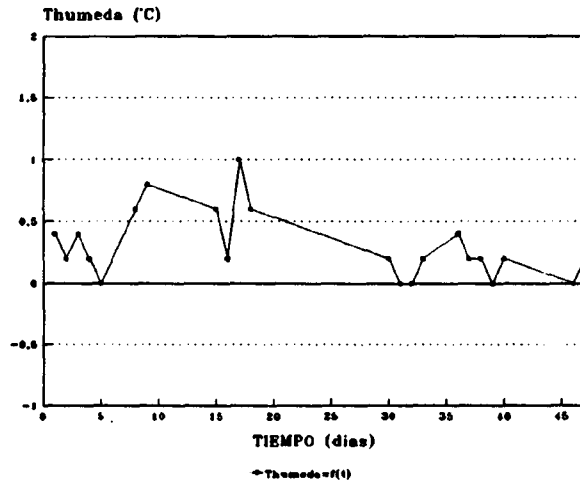


Figura 46.- Variación de la temperatura húmeda en el subnivel

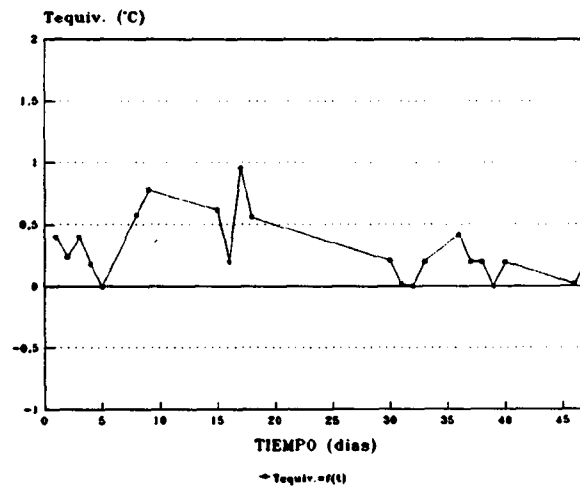


Figura 47.- Variación de la temperatura equivalente en el subnivel

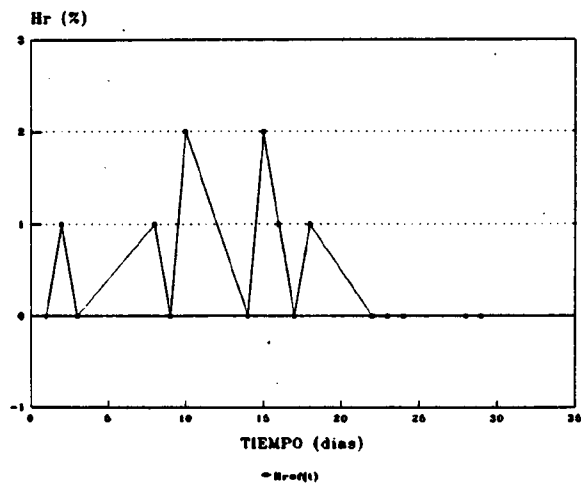


Figura 48.- Variación de la humedad relativa en el subnivel

a.2) Monóxido de carbono

La producción de CO en el nivel se mantuvo bastante estable correspondiendo a variaciones entre 1 y 3 ppm. El valor medio de las mediciones realizadas del contenido de CO es de 2,09 ppm.

La figura 49 muestra la evolución del CO en el subnivel 3121.

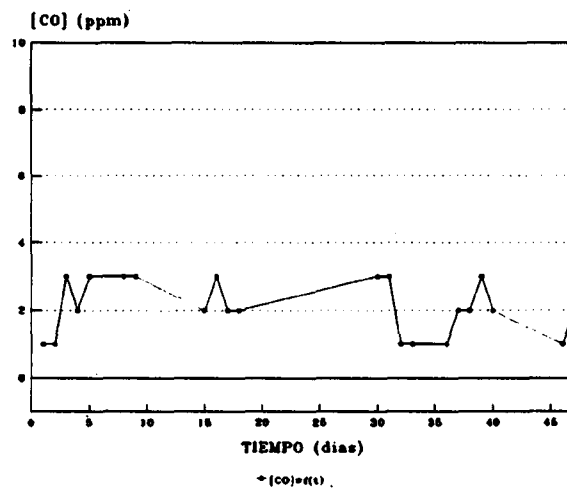


Figura 49.- Variación del contenido de CO en el subnivel

a.3) Oxígeno

Con respecto a la concentración de O₂ no se ha observado variación alguna.

La figura 50 muestra la evolución del O₂ en el subnivel 3121.

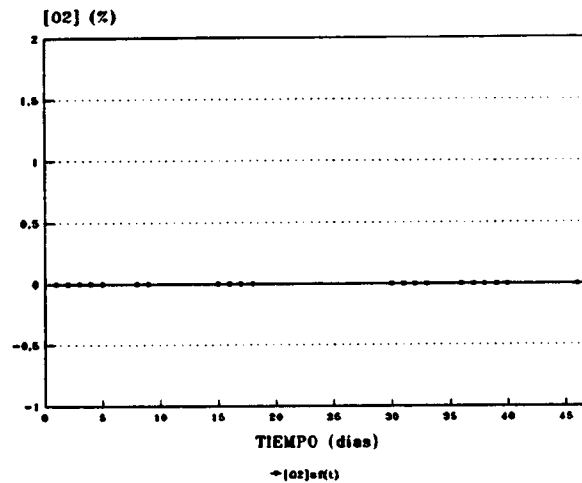


Figura 50.- Variación del contenido de O_2 en el subnivel

a.4) Caudal de aire

La velocidad del aire se mantuvo entre 0,39 m/s y 0,61 m/s y un caudal medio muy estable que se encontró en 2,69 m^3/s .

Con respecto a las convergencias, la sección estudiada comenzó con 8,72 m^2 y a los 34 días era de 5,53 m^2 , lo que supone una disminución del 36,58% en ese periodo.

Las figuras 51, 52, 53 muestran las variaciones de la sección, velocidad del aire y caudal en el subnivel.

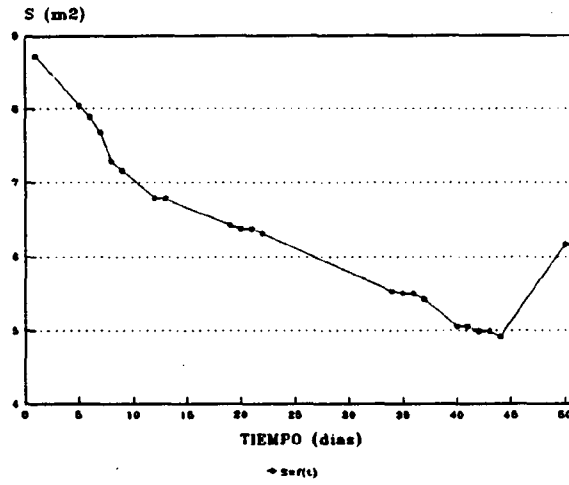


Figura 51.- Variación de la sección del cuadro nº 10 en el subnivel

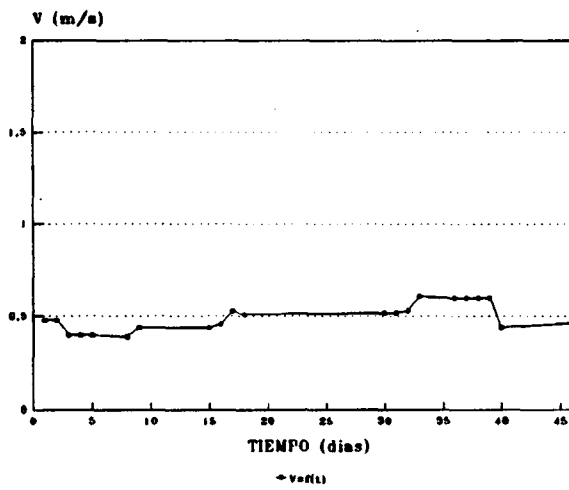


Figura 52.- Variación de la velocidad del aire en el subnivel

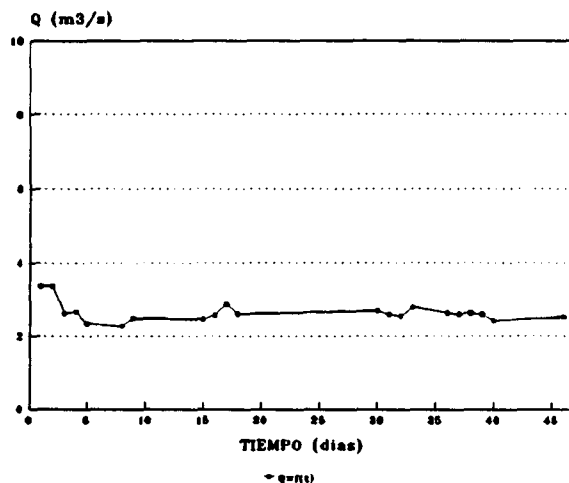


Figura 53.- Variación del caudal de aire en el subnivel

a.5) Presión atmosférica

La diferencia de presión entre el exterior y el nivel 3121 estuvo entre 49 y 57 mb.
El valor medio es de 53,14 mb.

La figura 54 muestra las variaciones de la diferencia entre la presión atmosférica exterior y el subnivel.

Las variaciones de los parámetros ambientales del subnivel 3121 se encuentran en el Anexo 2.2.

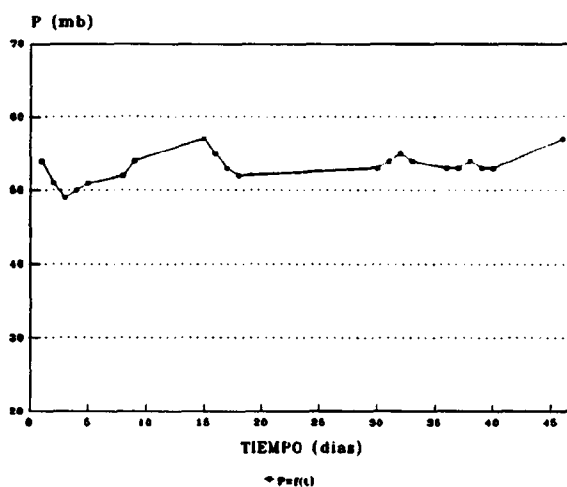


Figura 54.- Variación de la diferencia entre la presión atmosférica exterior y la del subnivel

b) Temperaturas superficiales del carbón de los hastiales

Las temperaturas superficiales arrojaron unos valores entre 24 y 27 °C entre los días 11-11-91 y 11-12-91, con un punto de ligero calentamiento que se encontraba en la clave a 40 m del comienzo del nivel, en la sección del estudio con pirómetro n° 20. El día 18-11-91 tenía una temperatura de 27 °C, a los 9 días era de 30 °C y al día siguiente de 31 °C, desapareciendo más tarde al llegar la explotación a ese punto.

En el periodo de tiempo desde el 12-12-91 hasta el final, las temperaturas superficiales se encontraron entre 22 y 25 °C con algún punto que llegó a 26 °C.

c) Temperaturas internas del macizo de carbón

Los 12 termopares se colocaron en el macizo de carbón en el hastial a techo del nivel.

El 29-11, momento de su colocación, los termopares n^{os} 3, 8, 9, 11 y 12 alcanzaron una temperatura superior debido a la fricción entre la barrena y el carbón.

Las condiciones iniciales, puede decirse que fueron las del día 10-12. Las temperaturas iniciales y finales en los termopares, así como el calentamiento producido en el periodo de tiempo del estudio se encuentran en el siguiente cuadro:

Termopares Fecha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
29-11	28	27	29	29	30	30	26	27	27	26	30	29
10-12	28	28	27	32	31	31	26	26	26	26	27	27
27-12	29	28	28	34	33	33	26	26	26	27	28	28
Diferencia (°C)	1	1	1	5	3	3	0	0	0	1	1	1

Hay que observar que entre el punto en el cual se colocaron los termopares n^{os} 1, 2 y 3 y el punto donde se colocaron los n^{os} 4, 5 y 6 hay una distancia de 30 cm y la diferencia es hasta de 4 °C entre el n^o 4 y n^o 1 colocados ambos a 1 m de profundidad.

En cambio entre el punto donde están colocados los n^{os} 7, 8 y 9 y el punto de colocación de los n^{os} 10, 11 y 12 también hay una distancia de 30 cm y la diferencia de temperaturas es sólo de 1 °C.

La figura 55 muestra la evolución de la temperatura en el termopar n^o 4.

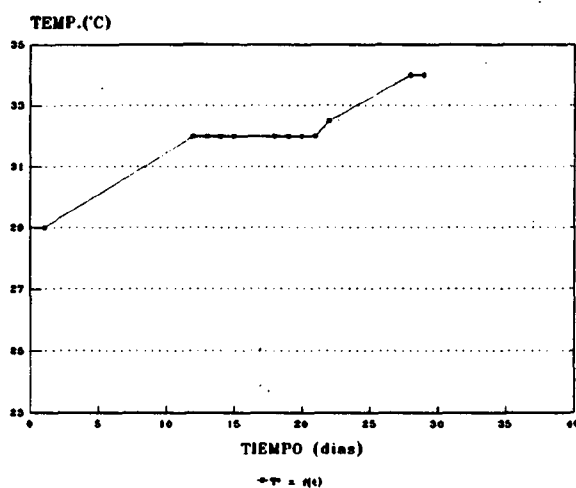


Figura 55.- Evolución de la temperatura en el termopar n° 4

d) Medición de parámetros ambientales detrás del tabique del subnivel 3121

El día 19-2-92 se procedió a la apertura del tabique que sellaba el subnivel 3121, ya explotado, y se tomaron muestras de gases y midieron las condiciones ambientales existentes. Los resultados fueron los siguientes:

CO = 9 ppm

O₂ = 5,4 %

CO₂ = 3 %

T^a seca = 27,6 °C

T^a húmeda = 26,6 °C

Humedad relativa = 94 %

e) Paradas de ventilación

En el nivel 3121 se produjeron 2 paradas temporales no programadas de la ventilación secundaria.

e.1) Parada 1

La primera parada tuvo lugar cuando el nivel se encontraba con una longitud de 20 m en fase de avance.

Las mediciones se realizaron en el frente, y en un principio las condiciones eran las siguientes: El contenido en CO era de 2 ppm, la concentración de O₂ en la atmósfera era de 20,9%, la temperatura seca de 24,6 ° y, la húmeda 21,2 °C y la humedad del 74%. A los 7 minutos del comienzo de la parada se observa una fuerte elevación de los parámetros, a excepción del contenido de O₂ que baja debido al consumo originado por la oxidación del carbón.

El contenido de CO en ese periodo de tiempo aumentó 6 ppm, hubo un consumo del 0,2% de O₂, la temperatura seca aumentó 1 °C y la húmeda 2,8 °C; la elevación de la humedad relativa del aire fue del 14%.

Después de ese momento, las variaciones de las temperaturas y de la humedad fueron menores.

En cambio la producción de CO y el consumo de O₂ continuaron en aumento.

El índice de Graham en cada momento de la medición es el siguiente:

Hora	10:27	10:31	10:35	10:40	10:45	10:50	10:55
Indice Graham	0,40	0,27	0,37	0,34	0,33	0,35	0,37

Se puede observar la estabilidad del índice lo que indica que en ese periodo no ha habido ninguna tendencia a un calentamiento peligroso, aunque el contenido de CO tenía una tendencia ascendente y la concentración de O₂ una tendencia descendente. Se trata por tanto del proceso de meteorización del carbón.

En el cuadro siguiente se resumen los resultados de las mediciones.

MINA OPORTUNA
PARADA DE VENTILACION 1 (NIVEL 3121)

MIN	SEG	TEMP	TEMP	TEMP	TEMP	TEMP	TEMP
0	2	20,9	24,6	21,2	21,54		74
7	8	20,7	25,6	24	24,16		88
11	11	20,5	25,6	24	24,16		88
15	15	20,5	25,6	24,4	24,52		91
20	17	20,4	25,6	24,5	24,61		92
25	20	20,3	25,6	24,5	24,61		92
30	25	20,2	25,6	24,6	24,7		92,5
35	28	20,15	25,8	24,6	24,72		92
40	4	20,9	25,2	23,2	23,4		84
45	4	20,9	25	23	23,2		84

*En el minuto 37 se restauró la ventilación

e.2) Parada 2

La 2ª parada de ventilación tuvo lugar en el momento en que el nivel se encontraba a 58 m de longitud en el periodo de avance.

Antes de la parada de ventilación el contenido de CO era de 4ppm, el O₂ tenía una concentración en la atmósfera de 20,9%, la temperatura seca era de 24,6 °C, la temperatura húmeda estaba situada en 21,6 °C y la humedad relativa del aire era del 76%.

A los 3 minutos del comienzo de la parada hubo una producción de 3 ppm de CO con un consumo de O₂ del 0,1%. La temperatura seca se elevó 0,4 °C por encima del valor inicial, la húmeda tuvo una subida de 1,8 °C y la humedad tuvo un ascenso del 12%.

Al igual que en la anterior parada de ventilación, los aumentos posteriores de los valores de la temperatura seca y húmeda y de la humedad fueron más suaves.

El CO continuó su evolución ascendente al igual que el consumo de O₂.

El índice de Graham en cada medición fue la siguiente:

Hora	10:38	10:43	10:47	10:52	10:57	11:02	11:07	11:12
Indice Graham	0,30	0,35	0,33	0,37	0,36	0,36	0,43	0,37

A los 37 minutos del comienzo del fallo de la ventilación, ésta volvió a su funcionamiento normal. El contenido de CO volvió a su concentración inicial de 4 ppm en un periodo de tiempo de 12 minutos, partiendo de 34 ppm. La concentración de O₂ en la atmósfera volvió a su condición inicial de 20,9% en 6 minutos,

siendo su contenido anterior a este periodo de tiempo de 20,1%.

La temperatura seca, que en el instante en el que volvió a funcionar el ventilador tenía un valor de 25,6 °C, volvió a su condición inicial de 24,6 °C en 17 minutos.

Por último, la temperatura húmeda y la humedad tardaron 19 minutos en volver a sus respectivas condiciones iniciales.

Los datos de esta parada se dan el siguiente cuadro.

MINA OPORTUNA
PARADA DE VENTILACION 2 (NIVEL 3121)

Minuto	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
0	4	20,9	24,6	21,6	21,9	76
3	7	20,8	25	23,4	23,56	88
8	11	20,7	25	23,8	23,92	91
12	14	20,6	25	24	24,1	92
17	19	20,5	25,2	24,2	24,3	92
22	22	20,4	25,2	24,4	24,48	93
27	26	20,3	25,2	24,4	24,48	93
32	30	20,3	25,6	24,8	24,88	93
37	34	20,1	25,6	24,8	24,88	93
41	11	20,8	25	23	23,2	84
43	7	20,9	25	22,2	22,48	78
46	5	20,9	24,8	22	22,28	78
49	4	20,9	24,8	22	22,28	78
54	4	20,9	24,6	21,8	22,08	78
58	4	20,9	24,6	21,6	21,9	76

*La ventilación se restauró en el minuto 37

6.3.3.- Subnivel 3152**a) Parámetros ambientales**

La variación de los parámetros ambientales de este nivel se dan en el siguiente cuadro.

PARAMETROS AMBIENTALES EN NIVEL 3152

Día	1	2	3	4	5	8	9	10	11	12	16	17	18	24	25	26	31	32	33	36	37	38	39	40
T _{SECA} (°C)	0	0,2	0	0,4	0,2	0,6	0,6	0,4	0,2	0,2	0,8	0,6	0,40	0,2	0	0,2	0,2	0,2	0,2	0	0,2	0,2	0	-
T _{HUMEDA} (°C)	1,2	0,2	0,4	0,6	0,2	1,6	1,4	1	0,4	0,2	1	0,6	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6	0	0,2	0	0	-
T _{EQUIVAL} (°C)	1,08	0,2	0,36	0,58	0,2	1,5	1,32	0,94	0,38	0,2	0,98	0,6	0,76	0,2	0,18	0,2	0,2	0,2	0,56	0	0,2	0,02	0	-
H (%)	8	0	1	2	0	6	6	4	1	0	0	0	3	0	1	0	0	0	3	0	0	2	0	-
CO (ppm)	1	1	2	2	1	3	3	4	6	6	3	5	3	2	1	3	4	2	1	2	1	0	1	-
O ₂ (%)	0	0	0,1	0	0	0,1	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0	0	0,1	0	0,1	0	0	-
Longitud labor(m)	19	25	29	33	42	56	56	55	50	50	38	38	36	24	24	23	17	17	17	12	10	10	9	8
Sección (m ²)	6,64	6,64	6,61	6,32	6,26	5,95	5,95	5,95	5,84	5,84	5,17	5,12	5,08	5,70	5,67	5,68	5,36	5,23	5,09	4,84	4,76	5,55	5,51	-
Veloci- dad(m/s)	0,29	0,29	0,3	0,32	0,34	0,33	0,33	0,36	0,36	0,36	0,36	0,37	0,38	0,34	0,34	0,35	0,38	0,4	0,49	0,47	0,46	0,39	0,39	-
Q _{labor} (m ³ /s)	1,72	1,73	1,77	1,8	1,85	1,75	1,72	1,85	1,9	1,86	1,68	1,68	1,67	1,69	1,68	1,71	1,84	1,84	2,11	1,93	1,89	1,9	1,85	-

a.1) Temperatura y humedad

Se observa que la variación de la temperatura seca a lo largo del nivel se sitúa entre 0 y 0,8 °C. La media aritmética es de 0,26 °C.

La temperatura húmeda sufre variaciones entre 0 y 1,6 °C. La media aritmética de todos los valores medidos es de 0,49 °C.

La temperatura equivalente, que relaciona esas dos temperaturas, oscila entre 0 y 1,5 °C, siendo su valor medio de 0,47 °C.

La humedad relativa del aire ha estado comprendida entre el 0 y 8%. La media aritmética de las mediciones de humedad es de 1,60%.

El día 20-1-92 las temperaturas húmeda y equivalente son máximas y la temperatura seca es de 0,6 °C. La humedad ese día varió a lo largo del nivel un 6%.

Al día siguiente estos parámetros siguen con un valor alto, siendo 0,6 °C la variación de la temperatura seca, 1,4 °C la húmeda, 1,32 °C la temperatura equivalente y la de la humedad sigue en un 6%.

Las figuras 56, 57, 58 y 59 muestran las variaciones en el subnivel 3152 de la temperatura seca, húmeda, equivalente y humedad respectivamente.

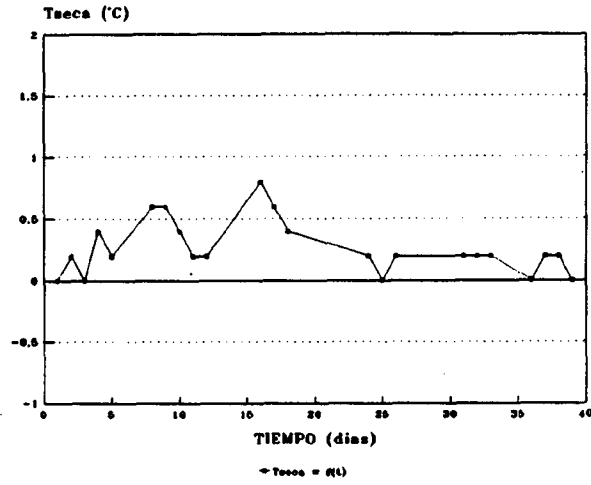


Figura 56.- Variación de la temperatura seca en el subnivel

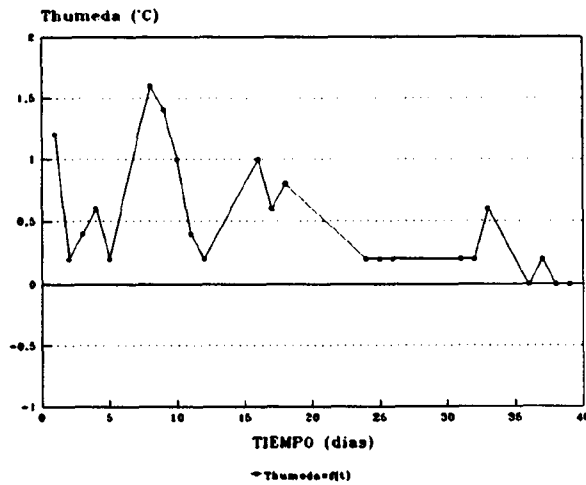


Figura 57.- Variación de la temperatura húmeda en el subnivel

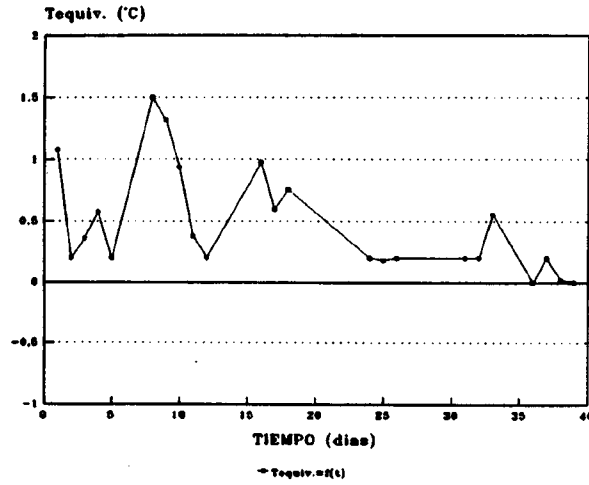


Figura 58.- Variación de la temperatura equivalente en el subnivel

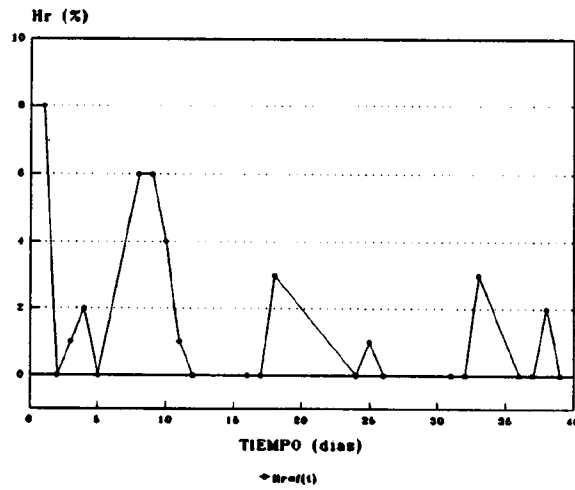


Figura 59.- Variación de la humedad relativa en el subnivel

a.2) Monóxido de carbono

El CO producido en el nivel ha estado comprendido entre 1 y 6 ppm. La concentración media de CO es de 2,47 ppm.

La figura 60 muestra la evolución del CO en el subnivel 3152.

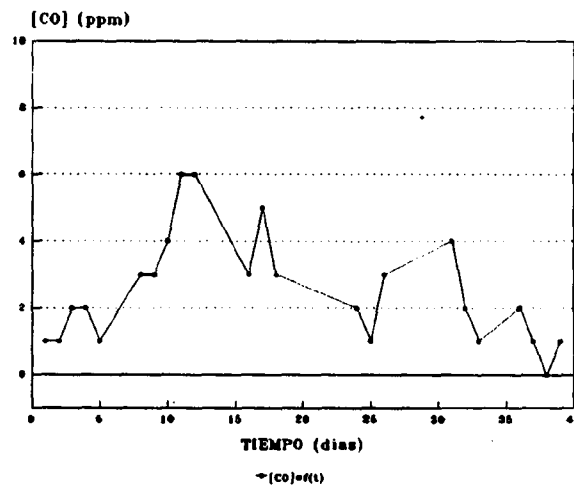


Figura 60.- Variación del contenido de CO en el subnivel

a.3) Oxígeno

El consumo de O₂ ha estado comprendido entre 0 y 0,1%.

La figura 61 muestra la evolución del O₂ en el subnivel 3152.

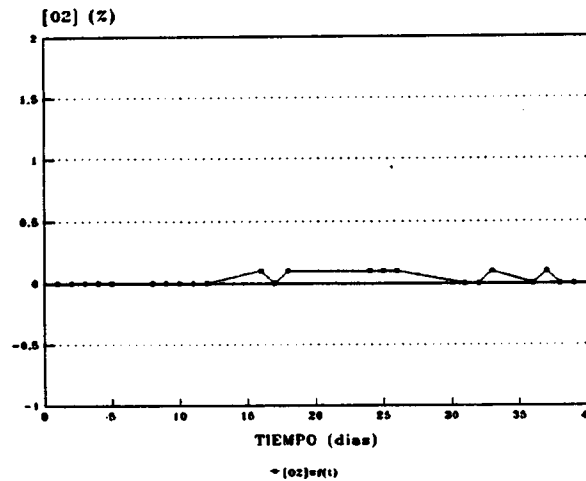


Figura 61.- Variación del contenido de O₂ en el subnivel

a.4) Caudal del aire

La velocidad del aire ha estado comprendida entre 0,29 m/s y 0,49 m/s. Esta variación ha sido paulatina coincidiendo también con la reducción progresiva de la sección. En el comienzo del estudio y coincidiendo con una velocidad del aire de 0,29 m/s, la sección era de 6,64 m² y el caudal de 1,72 m³/s.

El día 18-2-92 la sección tenía un valor de 4,76 m² coincidiendo con una velocidad del aire de 0,46 m/s y un caudal medio de 1,89 m³/s.

En los primeros 30 días, la sección varió desde 8,72 m² el día 8-1-92 hasta 5,67 m² el día 6-2-92, lo que indica una reducción de la sección del 34,97% en ese periodo de tiempo.

El caudal ha sido bastante estable en el periodo de estudio, encontrándose los valores en el intervalo comprendido entre 1,67 y 2,11 m³/s siendo el caudal medio de 1,80 m³/s.

Las figuras 62 y 63 muestran las variaciones de la velocidad del aire y caudal en el subnivel.

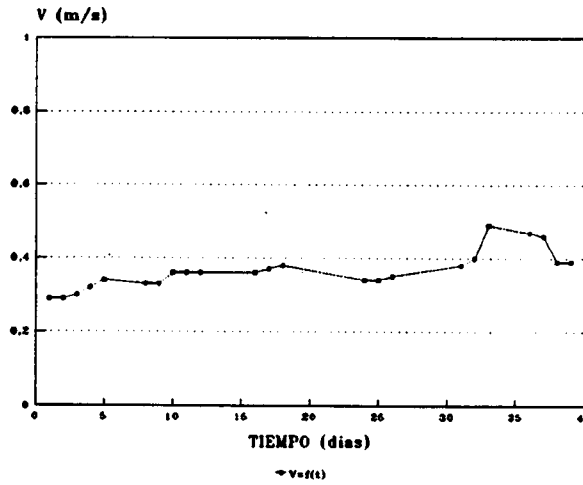


Figura 62.- Variación de la velocidad del aire en el subnivel

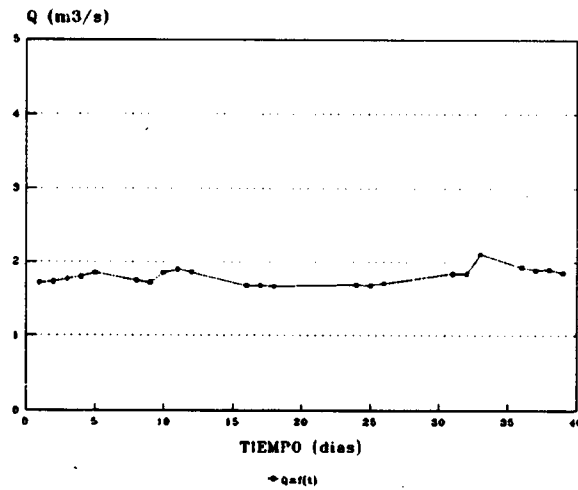


Figura 63.- Variación del caudal de aire en el subnivel

a.5) Presión atmosférica

La diferencia entre la presión atmosférica del exterior y del interior ha estado comprendida entre 55 y 64 mb. La media aritmética de todas las mediciones es de 58,70 mbar.

La figura 64 muestra las variaciones de la diferencia entre la presión atmosférica exterior y el subnivel.

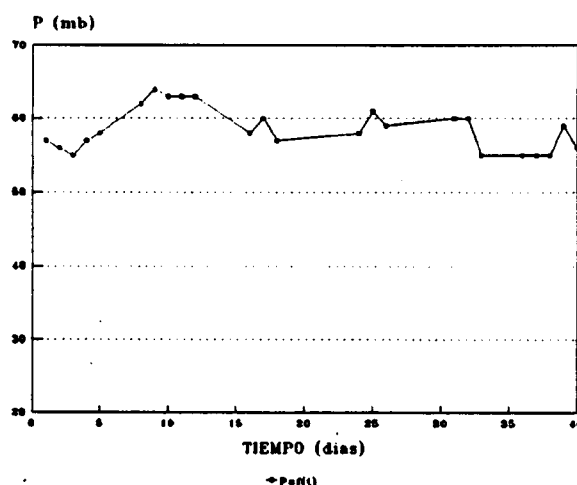


Figura 64.- Variación de la diferencia entre la presión atmosférica exterior y la del subnivel

Las variaciones de los parámetros ambientales del subnivel 3152 se encuentran en el Anexo 3.2.

b) Temperaturas superficiales del carbón de los hastiales

La temperatura superficial comienza con valores entre 21 y 23 °C que van aumentando para llegar a temperaturas entre 24 y 25 °C, con las excepciones de pequeños

calentamientos temporales en las claves de algunas secciones que han llegado hasta 38 °C, como la sección n° 7 que se encuentra a 14 m del comienzo del nivel el día 5-2-92.

Ese punto tenía una temperatura superficial de 23 °C el día 20-1-92, al día siguiente la temperatura se encontraba a 25 °C y el 5-2-92 estaba a 38 °C. El 6-2-92 disminuía en 3 °C esa temperatura.

c) Temperaturas internas del macizo de carbón

En este nivel se colocaron 15 termopares distribuidos de la forma ya indicada, en el perímetro de la sección que se encuentra a 2 m del principio del nivel. Estos termopares se colocaron el día 15-1-91 y se tomaron datos hasta el día 21-2-91.

Las temperaturas internas iniciales del macizo de carbón, así como las finales y la diferencia entre éstas que indica el calentamiento del macizo, están reflejadas en el siguiente cuadro:

Termopares Fecha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
15-1	24	25	25	25	26	27	28	30	30	24	24	24	25	24	24
21-2	29	31	31	31	32	32,5	35	36	37	26	28	28	27	28	28
Diferencia (°C)	5	6	6	6	6	5,5	7	6	7	2	4	4	2	4	4

Se puede observar que los mayores calentamientos se han centrado en los termopares que están en el hastial del nivel que se encuentra a techo, y en la clave del nivel.

La figura 65 muestra la evolución de la temperatura del termopar n° 2.

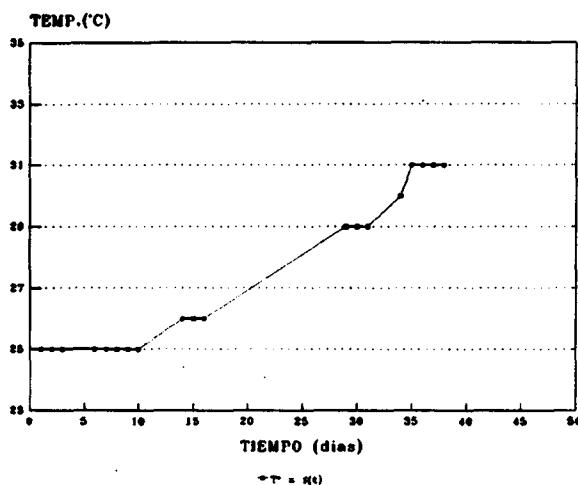


Figura 65.- Evolución de la temperatura en el termopar n° 2

d) Paradas de ventilación controladas

En el nivel 3152 se realizaron dos paradas de ventilación durante el fin de semana del 1 y 2 de Febrero de 1992. Estas paradas tuvieron como finalidad observar las variaciones de distintos parámetros que indican la oxidación del carbón sin ventilación para permitir su progresión en función del tiempo.

Antes de las paradas, las condiciones eran las siguientes:

	CO (ppm)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	T _{SECA} (°C)	T _{HUMEDA} (°C)	T _{EQU.} (°C)	Humedad (%)
PARADA 1	3	0,09	20,7	24	21,8	22,02	71
PARADA 2	0	0,05	20,9	21	16,4	16,68	60

Las diferencias entre ambas se deben a que la primera parada se produjo poco después de la salida del último relevo del sábado, por lo que el calor proveniente de los trabajadores y de las máquinas influyen en las condiciones ambientales, y la segunda parada se realizó el domingo sin que pueda existir esa influencia. Esto mismo se ha observado en los registros de los aparatos Sieger en los demás fines de semana.

En estas experiencias se han controlado las variaciones de los siguientes parámetros en función del tiempo: O₂, CO, CO₂, temperatura seca y húmeda, y humedad relativa.

Los resultados obtenidos se pueden observar en los siguientes cuadros.

MINA OPORTUNA
PARADA DE VENTILACION 1 (NIVEL 3152)

L (mm)	CO (ppm)	O2 (%)	CO2 (%)	Ta (°C)	Tb (°C)	Tc (°C)	Hr (%)	WASHBY
0,00	3,00	20,70	0,09	24,00	21,80	22,02	71,00	0,15
5,00	4,00	20,70	0,07	25,00	21,80	22,12		0,20
10,00	6,00	20,60	0,10	25,40	22,20	22,52		0,20
15,00	12,00	20,50	0,14	25,80	22,80	23,10	78,00	0,30
20,00	16,00	20,30	0,19	25,80	23,20	23,46	80,00	0,27
25,00	25,00	20,00	0,28	25,80	22,60	22,92	82,00	0,28
30,00	34,00	19,80	0,30	25,80	23,60	23,82	84,00	0,31
35,00	38,00	19,60	0,35	25,80	24,00	24,18	85,00	0,29
40,00	43,00	19,50	0,39	26,00	24,20	24,38	85,00	0,31
45,00	46,00	19,30	0,40	26,20	24,40	24,58	86,00	0,29
50,00	51,00	19,30	0,45	26,20	24,60	24,76	87,00	0,32
55,00	56,00	19,10	0,46	26,20	24,50	24,67	87,00	0,31
60,00	58,00	19,00	0,48	26,60	24,90	25,07	88,00	0,31
65,00	60,00	19,00	0,52	26,60	24,60	24,80	88,00	0,32
70,00	64,00	18,90	0,53	26,80	25,20	25,36	88,00	0,32
80,00	70,00	18,80	0,57	27,00	25,20	25,38	88,00	0,33
85,00	72,00	18,70	0,62	26,80	25,20	25,36		0,33
97,00	75,00	18,60	0,62	26,80	25,20	25,36	88,00	0,33
100,00	75,00	18,60	0,63	26,80	25,20	25,36	88,00	0,33
105,00	77,00	18,60	0,62	26,80	25,20	25,36	90,00	0,33
115,00	87,00	18,20	0,71	27,00	25,60	25,74	89,00	0,32
120,00	92,00	18,20	0,76	26,90	25,60	25,73	89,00	0,34
125,00	94,00	18,10	0,80	27,50	24,60	24,89		0,34
140,00	101,00	18,00	0,83	27,00	24,80	25,02	90,00	0,35
145,00	95,00	17,90	0,80	27,00	24,80	25,02	90,00	0,32
150,00	105,00	17,80	0,84	27,00	25,50	25,65	90,00	0,34
155,00	106,00	17,80	0,88	27,60	26,20	26,34	90,00	0,34
175,00	112,00	17,50	0,92	27,40	26,00	26,14	92,00	0,33
180,00	110,00	17,60	0,91	27,40	26,00	26,14	92,00	0,33
185,00	115,00	17,50	0,94	27,60	25,00	25,26		0,34
190,00	122,00	17,40	0,99	27,60	26,40	26,52	93,00	0,35
195,00	123,00	17,30	1,03	27,60	26,20	26,34	92,00	0,34
200,00	124,00	17,30	1,02	27,60	26,20	26,34	93,00	0,34
205,00	126,00	17,10	1,06	28,00	26,20	26,38	93,00	0,33
210,00	129,00	17,10	1,08	28,00	26,80	26,92	93,00	0,34
215,00	130,00	17,10	1,11	28,00	26,80	26,92	93,00	0,34
220,00	132,00	16,90	1,07	27,80	26,40	26,54	94,00	0,33
225,00	133,00	17,00	1,10	27,80	26,40	26,54	94,00	0,34
230,00	133,00	16,80	1,14	28,00	26,40	26,56	93,00	0,32

MINA OPORTUNA
PARADA DE VENTILACION 2 (NIVEL 3152)

T (mm.)	CO (ppm)	O2 (%)	CO2 (%)	Tb (°C)	Ti (°C)	Te (°C)	Hr (%)	L GRAHAM
0,00	0,00	20,80	0,05	21,00	16,40	16,86	60,00	0,00
5,00	2,00	20,70	0,07	21,20	17,20	17,60	66,00	0,10
10,00	9,00	20,60	0,11	21,60	18,00	18,36	70,00	0,30
15,00	16,00	20,40	0,17	21,80	18,60	18,92	72,00	0,32
20,00	24,00	20,10	0,22	22,00	18,80	19,12	74,00	0,30
25,00	35,00	19,80	0,28	22,30	19,20	19,51	76,00	0,32
30,00	39,00	19,70	0,30	22,40	19,30	19,61	77,00	0,33
35,00	48,00	19,50	0,36	22,80	19,40	19,74	77,00	0,34
42,00	55,00	19,20	0,43	22,60	19,80	20,08	77,00	0,32
45,00	59,00	19,10	0,44	22,80	20,00	20,28	78,00	0,33
50,00	60,00	19,00	0,46	23,00	20,40	20,66	78,00	0,32
55,00	69,00	18,80	0,50	23,40	20,40	20,70		0,33
60,00	68,00	18,80	0,51	23,20	20,40	20,68	78,00	0,32
65,00	73,00	18,70	0,55	23,20	20,40	20,68	79,00	0,33
70,00	81,00	18,50	0,58	23,20	20,60	20,86	78,00	0,34
75,00	85,00	18,30	0,62	23,20	20,60	20,86	79,00	0,33
81,00	87,00	18,20	0,62	23,20	20,80	21,04	80,00	0,32
85,00	91,00	18,30	0,61	23,30	20,60	20,87	83,00	0,35
90,00	81,00	18,40	0,55	23,60	21,30	21,53		0,32
95,00	95,00	18,20	0,63	23,70	21,20	21,45		0,35
105,00	100,00	18,00	0,65	23,60	21,00	21,26	80,00	0,34
110,00	99,00	18,10	0,63	23,60	21,20	21,44	82,00	0,35
120,00	97,00	18,00	0,64	23,80	21,40	21,64	82,00	0,33
125,00	108,00	17,80	0,71	24,10	21,40	21,67		0,35
130,00	106,00	17,80	0,70	24,10	21,60	21,85	84,00	0,34
135,00	103,00	17,70	0,71	24,40	21,60	21,88	84,00	0,32
140,00	109,00	17,70	0,72	24,40	22,40	22,60		0,34
155,00	107,00	17,60	0,74	24,40	22,00	22,24	83,00	0,32
160,00	112,00	17,60	0,77	24,40	22,20	22,42	83,00	0,34
165,00	116,00	17,40	0,81	24,80	22,40	22,64	83,00	0,33
170,00	118,00	17,30	0,84	24,80	22,40	22,64		0,33
185,00	112,00	17,50	0,83	24,80	22,40	22,64	84,00	0,33
190,00	121,00	17,30	0,86	25,00	22,60	22,84		0,34
195,00	127,00	16,90	1,04	25,20	22,60	22,86	85,00	0,32
200,00	121,00	17,20	0,89	25,00	22,80	23,02		0,33
205,00	122,00	17,10	0,91	25,20	22,80	23,04	86,00	0,32
210,00	124,00	17,30	0,85	25,30	22,80	23,05		0,34
215,00	127,00	17,20	0,91	25,20	22,90	23,13	86,00	0,34
220,00	119,00	17,20	0,88	25,40	22,90	23,15		0,32
225,00	121,00	17,20	0,89	25,20	23,00	23,22	86,00	0,33
235,00	135,00	16,80	1,02	25,60	23,00	23,26	86,00	0,33
245,00	126,00	16,80	0,94	25,60	23,20	23,44	87,00	0,31

6.3.4 Evolución de las temperaturas internas, superficiales y volumen en acumulaciones progresivas de carbón

Las acumulaciones de carbón pueden sufrir calentamientos internos, en función de su volumen y del tiempo de exposición al aire.

En la mina se realizó un control sobre ciertas acumulaciones situadas en la parte inferior del transportador PF-1 del 1012, en la planta 10ª. Este transportador recogía todo el carbón de ese panel y lo llevaba hasta la cinta transportadora general de la zona Este de esa planta.

Se colocaron termopares en 5 puntos en los que ese transportador sufría pérdidas de carbón. El carbón acumulado era de pequeña granulometría y en cada punto se depositaba más o menos rápidamente.

Para la colocación de los termopares, se limpiaron antes esos puntos de acumulación y se dejaron los termopares en el suelo.

El día 18-11-91 se comenzó el control y finalizó el 27-12-91 momento en el que se acabó de explotar el panel.

Este control fue problemático debido a la limpieza periódica de las acumulaciones por parte de personal de la mina.

Los termopares colocados fueron los números 10, 12, 13, 14 y 15. El termopar nº 11 se colocó debajo de la cinta transportadora cuya acumulación era mínima y no se observó ninguna variación de la temperatura interna.

El termopar nº 10 registró un aumento de 28°C desde el día 20-11-91 hasta el 12-12-91. En este periodo de tiempo se registró una acumulación de 0,885 m³ de carbón.

Con este volumen final, la temperatura interna alcanzó 49°C. El termopar n° 12 incrementó su temperatura en 7°C entre los días 18-11-91 hasta el 27-12-91, y se observó una acumulación de carbón sobre el termopar de 0,20 m³.

El termopar n° 13 se colocó el día 18-11-91 y su temperatura aumentó desde 21°C hasta 28°C, medición realizada el día 29-11-91, y un volumen de carbón de 0,052 m³.

El n° 14 aumentó su temperatura en 2°C en 39 días y el volumen final de carbón acumulado fue de 0,023 m³.

El termopar n° 15 se colocó el 18-11-91 y su medición de temperaturas tuvo lugar hasta el 12-12-91. En este período de tiempo, la temperatura tuvo un ascenso de 5°C y el volumen de la acumulación fue de 0,036 m³.

6.3.5.- Parada de ventilación en la mina de Carbones de Pedraforca

El 28-3-92 se realizó una parada de ventilación secundaria en el 5° subnivel del paquete 5^{as} y 6^{as} que se encontraba en avance. Esta parada tuvo una duración total de 945 minutos dividido en dos jornadas. El 28-3-92 se hicieron mediciones durante 175 minutos y al día siguiente, con la ventilación aún parada, se continuó el estudio durante 30 minutos más.

Las condiciones iniciales, a los 175 min y a los 945 min desde el comienzo de la parada, son las siguientes:

	Minuto 0	Minuto 175	Minuto 945
Temperatura seca (°C)	15,2	14,8	14,6
Temperatura húmeda (°C)	13,2	13,8	13,3
Temperatura equivalente (°C)	13,4	13,9	13,43
Humedad (%)	79	89	85
CO (ppm)	0	5	5
O ₂ (%)	20,8	20	20,3
CO ₂ (%)	0,04	0,16	0,13
CH ₄ (%)	0,25	1,55	> 10%

Se puede observar que los parámetros varían muy poco, excepto el CH₄ que se desorbe y que por falta de ventilación se va acumulando, midiéndose una concentración mayor del 10% en la parte superior del subnivel.

La desorción de CH₄ puede ser un impedimento para la oxidación del carbón no permitiendo la adsorción superficial del oxígeno.

Los datos de las mediciones se dan en el cuadro siguiente:

CARBONES DE PEDRAFORCA (MINA SANTA BARBARA)
PARADA VENTILACION (NIVEL 5º CAPA 5ª-6ª)

(mm)	H ₂ O (%)	H ₂ O (%)	H ₂ O (%)	CO ₂ (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO ₂ (%)	GRANIAM
0,00	15,20	13,20	79,00	0,00	20,80	0,25	0,04	0,00
5,00	14,80	13,20	81,00	1,00	20,70	0,30	0,04	0,03
10,00	15,00	13,40	82,00	1,00	20,70	0,40	0,04	0,03
15,00	14,80	13,20	81,00	1,00	20,70	0,50	0,05	0,03
20,00	14,60	13,20	84,00	1,00	20,60	0,55	0,05	0,03
25,00	14,60	13,30	85,00	1,00	20,60	0,60	0,05	0,03
30,00	14,40	13,20	86,00	2,00	20,60	0,70	0,05	0,05
35,00	14,60	13,40	86,00	2,00	20,60	0,75	0,06	0,05
40,00	14,60	13,40	86,00	2,00	20,40	0,80	0,07	0,03
45,00	14,40	13,30	87,00	2,00	20,50	0,80	0,07	0,04
50,00	14,40	13,30	87,00	2,00	20,50	0,85	0,07	0,04
55,00	14,80	13,40	84,00	3,00	20,50	0,90	0,07	0,06
60,00	14,60	13,40	86,00	3,00	20,50	0,95	0,09	0,06
65,00	14,60	13,40	86,00	3,00	20,40	1,10	0,10	0,05
70,00	14,80	13,40	84,00	3,00	20,40	1,10	0,10	0,05
75,00	14,60	13,40	86,00	3,00	20,40	1,15	0,10	0,05
80,00	14,60	13,40	86,00	4,00	20,40	1,15	0,11	0,07
85,00	14,60	13,40	86,00	4,00	20,30	1,15	0,11	0,06
90,00	14,60	13,40	86,00	4,00	20,30	1,20	0,11	0,06
95,00	14,60	13,40	86,00	4,00	20,30	1,25	0,11	0,06
100,00	14,60	13,40	86,00	4,00	20,30	1,30	0,12	0,06
105,00	14,50	13,40	87,00	4,00	20,30	1,30	0,11	0,06
110,00	14,80	13,50	85,00	4,00	20,30	1,30	0,11	0,06
115,00	14,80	13,50	85,00	4,00	20,20	1,30	0,12	0,05
120,00	14,60	13,20	84,00	4,00	20,20	1,30	0,12	0,05
125,00	14,60	13,50	87,00	5,00	20,20	1,35	0,12	0,06
130,00	14,60	13,20	84,00	5,00	20,20	1,40	0,13	0,06
135,00	14,60	13,60	89,00	5,00	20,20	1,45	0,13	0,06
140,00	14,60	13,70	90,00	5,00	20,20	1,45	0,14	0,06
145,00	14,80	13,60	86,00	6,00	20,10	1,45	0,14	0,07
150,00	14,60	13,80	92,00	6,00	20,10	1,60	0,15	0,07
155,00	14,80	13,80	89,00	6,00	20,10	1,60	0,16	0,07
160,00	14,80	13,60	86,00	6,00	20,00	1,65	0,16	0,06
165,00	14,60	13,80	92,00	6,00	20,00	1,65	0,16	0,06
170,00	14,60	13,80	92,00	5,00	20,10	1,55	0,15	0,06
175,00	14,80	13,80	89,00	5,00	20,00	1,55	0,16	0,05
915,00	14,60	13,20	84,00	7,00	20,30	1,30	0,16	0,10
920,00	14,60	13,20	84,00	7,00	20,20	1,20	0,16	0,09
925,00	14,40	13,20	86,00	5,00	20,30	1,10	0,14	0,07
930,00	14,60	13,20	84,00	6,00	20,40	1,00	0,14	0,10
935,00	14,60	13,20	84,00	6,00	20,30	1,20	0,14	0,09
940,00	14,60	13,20	84,00	6,00	20,20	1,20	0,14	0,07
945,00	14,60	13,30	85,00	5,00	20,30	1,00	0,13	0,07

6.3.6.- Análisis de los resultados de las mediciones en mina

6.3.6.1.- Paradas de ventilación

a) Paradas de ventilación en el subnivel 3121

Con los datos obtenidos en el experimento se han realizado regresiones lineales, dando unos ajustes próximos de 100% al relacionar el contenido de CO y O₂ entre sí. Estas regresiones son las siguientes:

Parada 1

(*) Consumo de O₂ en función de la producción de CO

$$\Delta O_2 (\%) = 20,85 - 0,026 [\text{CO}(\text{ppm})] \quad (1)$$

Por cada ppm de CO existe un consumo de 260 ppm de O₂

Parada 2

(*) Consumo de O₂ en función de la producción de CO

$$\Delta O_2 (\%) = 20,97 - 0,025 [\text{CO}(\text{ppm})] \quad (2)$$

Para cada ppm producido de CO ha habido un consumo de 250 ppm de O₂.

Las mediciones y las regresiones lineales realizadas se encuentran en los Anexos 16 y 17, respectivamente.

Al arrancar nuevamente el ventilador en la segunda parada, se realizaron mediciones hasta la normalización de las condiciones ambientales. Se hicieron ajustes sobre sistemas de 1^{er} orden, dando como resultados:

(*) Evolución de la concentración de O₂ en el tiempo

$$[\text{O}_2] (t) = 20,1 + 0,8 (1 - e^{-0,5t}) \quad (3)$$

$$T = 2 \text{ minutos}$$

$$[O_2]_{t=\text{inf}} = 20,9\%$$

$$\left(\frac{d [O_2]}{dt} \right)_{t=0} = 0,40$$

El residuo de la suma de los cuadrados es de 99,82%

- (*) Evolución de la concentración de CO en el tiempo

$$[CO](t) = 4 + 30 \cdot e^{-0,37t} \quad (4)$$

$$T = 2,70 \text{ minutos}$$

$$[CO]_{t=\text{inf}} = 4 \text{ ppm}$$

$$\left(\frac{d [CO]}{dt} \right)_{t=0} = -11,1$$

El residuo de la suma de los cuadrados es de 99,96%

- (*) Evolución de la temperatura seca en el tiempo

$$T_s(t) = 24,6 + 0,98 \cdot e^{-0,175t} \quad (5)$$

$$T = 5,71 \text{ minutos}$$

$$(T_s)_{t=\text{inf}} = 24,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\left(\frac{d (T_s)}{dt} \right)_{t=0} = -0,171$$

El residuo de la suma de los cuadrados es de 97,08%

- (*) Evolución de la temperatura húmeda en el tiempo

$$Th(t) = 21,6 + 3,2 \cdot e^{-0,22t} \quad (6)$$

$$T = 4,44 \text{ minutos}$$

$$(Th)_{t=\text{inf}} = 21,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\left(\frac{d (Th)}{dt} \right)_{t=0} = -0,72$$

El residuo de la suma de los cuadrados es de 98,45%

(*) Evolución de la humedad relativa en el tiempo

$$Hr(t) = 76 + 17 \cdot e^{-0,235t} \quad (7)$$

$$T = 4,25 \text{ minutos}$$

$$(Hr)_{t=\infty} = 76\%$$

$$\left(\frac{d (Hr)}{dt} \right)_{t=0} = 3,995$$

El residuo de la suma de los cuadrados es de 95,17%

Las representaciones de estas funciones se pueden observar en el Anexo 18.

b) Paradas de ventilación en el subnivel 3152

Con los datos obtenidos se han realizado regresiones, relacionando las producciones de CO y CO₂ con el consumo de O₂.

Asimismo se han realizado gráficos de la evolución de estos gases en función del tiempo para la determinación de la velocidad de oxidación mediante el consumo de O₂ y la velocidad de producción de los gases que se han formado en la oxidación CO y CO₂.

Se ha observado que, en las primeras etapas de la oxidación, las relaciones entre CO, CO₂ y O₂ han sido lineales como se muestra a continuación:

Parada 1.-

- (*) Consumo de O₂ en función de la producción de CO

$$\Delta O_2 (\%) = 20,74 - 0,028 [\text{CO (ppm)}] \quad (8)$$

Para cada ppm de CO producido ha habido un consumo de 280 ppm de O₂.

El residuo de la suma de los cuadrados es del 99,64%.

- (*) Consumo de O₂ en función de la producción de CO₂

$$\Delta O_2 (\%) = 20,89 - 3,59 [\text{CO}_2 (\%)] \quad (9)$$

Por una producción de 1% de CO₂ se han consumido 3,59% de O₂.

El residuo de la suma de los cuadrados es del 99,40%.

- (*) Relación entre las producciones de CO₂ y CO

$$\Delta \text{CO (ppm)} = -5,15 + 126,16 [\text{CO}_2 (\%)] \quad (10)$$

Por cada 1% de CO₂ producido se han producido 126,16 ppm de CO.

El residuo de la suma de los cuadrados es del 99,66%.

Parada 2.-

- (*) Consumo de O₂ en función de la producción de CO

$$\Delta O_2 (\%) = 20,85 - 0,029 [\text{CO (ppm)}] \quad (11)$$

Por 1 ppm producido de CO ha habido un consumo de 290 ppm de O₂.

El residuo de la suma de los cuadrados es del 99,24%.

- (*) Consumo de O₂ en función de la producción de CO₂

$$\Delta O_2 (\%) = 20,97 - 4,31 [\text{CO}_2 (\%)] \quad (12)$$

Para producir un 1% de CO₂ se han consumido 4,31 % de O₂.

El residuo de la suma de los cuadrados es del 98,75%.

- (*) Relación entre las producciones de CO y CO₂

$$\Delta \text{CO (ppm)} = -3,24 + 143,96 [\text{CO}_2 (\%)] \quad (13)$$

Por cada 1% de CO₂ se han producido 143,96 ppm de CO

El residuo de la suma de los cuadrados es del 97,54%.

Las regresiones realizadas en las dos paradas se encuentran en los Anexos 19 y 20, respectivamente.

En cuanto a los parámetros medidos en función del tiempo, se han ajustado sobre sistemas de 1^{er} orden dando las siguientes funciones:

Parada 1.-

(*) Evolución de la temperatura seca en función del tiempo

$$Ts(t) = 24,4 + 3,34 (1 - e^{-0,016t}) \quad (14)$$

$$T = 62,5 \text{ minutos}$$

$$(Ts)_{t=\text{inf}} = 27,74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\left(\frac{d(Ts)}{dt} \right)_{t=0} = 0,053$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 90,49%.

(*) Evolución de la temperatura húmeda en función del tiempo

$$Th(t) = 21,8 + 4,48 (1 - e^{-0,016t}) \quad (15)$$

$$T = 62,5 \text{ minutos}$$

$$(Th)_{t=\text{inf}} = 26,28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\left(\frac{d(Th)}{dt} \right)_{t=0} = 0,072$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 89,69%.

- (*) Evolución de la humedad relativa en función del tiempo

$$Hr(t) = 71,2 + 20,9 (1 - e^{-0,0263t}) \quad (16)$$

$$T = 38,02 \text{ minutos}$$

$$(Hr)_{t=\text{inf}} = 92,1\%$$

$$\left(\frac{d(Hr)}{dt} \right)_{t=0} = 0,55$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 93,42%.

- (*) Evolución de la temperatura equivalente en función del tiempo

$$T_e(t) = 22,4 + 4,18 (1 - e^{-0,013t}) \quad (17)$$

$$T = 76,92 \text{ minutos}$$

$$(T_e)_{t=\text{inf}} = 26,58 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\left(\frac{d(T_e)}{dt} \right)_{t=0} = 0,054$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 90,19%.

- (*) Evolución del índice de Graham en función del tiempo

$$I_G(t) = 0,15 + 0,18 (1 - e^{-0,051t}) \quad (18)$$

$$T = 19,61 \text{ minutos}$$

$$(I_G)_{t=\text{inf}} = 0,33\%$$

$$\left(\frac{d(I_G)}{dt} \right)_{t=0} = 0,0092$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 90,36%.

- (*) Evolución del contenido de O_2 en función del tiempo

$$[O_2](t) = 15,9 + 4,83 \cdot e^{-0,0063t} \quad (19)$$

T = 158,73 minutos

$[O_2]_{t=inf} = 15,9\%$

$$\left(\frac{d[O_2]}{dt} \right)_{t=0} = -0,030$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 98,86%.

(*) Evolución del contenido de CO₂ en función del tiempo

$$[CO_2](t) = 0,09 + 1,586 (1 - 3^{-0,0044t}) \quad (20)$$

T = 227,27 minutos

$[CO_2]_{t=inf} = 1,676\%$

$$\left(\frac{d[CO_2]}{dt} \right)_{t=0} = 0,00698$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 99,03%.

(*) Evolución de la concentración de CO en función del tiempo

$$[CO](t) = 3 + 170,8 (1 - e^{-0,0057t}) \quad (21)$$

T = 175,43 minutos

$[CO]_{t=inf} = 173,8 \text{ ppm}$

$$\left(\frac{d[CO]}{dt} \right)_{t=0} = 0,974$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 99,26%.

Estas evoluciones y sus derivadas se encuentran reflejadas en el Anexo 21.

Parada 2.-

- (*) Evolución de la temperatura seca en función del tiempo

$$T_s(t) = 21 + 4,99 (1 - e^{-0,008t}) \quad (22)$$

$$T = 125 \text{ minutos}$$

$$(T_s)_{t=\text{inf}} = 25,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\left(\frac{d(T_s)}{dt} \right)_{t=0} = 0,04$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 96,55%.

- (*) Evolución de la temperatura húmeda en función del tiempo

$$T_h(t) = 16,4 + 6,42 (1 - e^{-0,016t}) \quad (23)$$

$$T = 62,5 \text{ minutos}$$

$$(T_h)_{t=\text{inf}} = 22,82 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\left(\frac{d(T_h)}{dt} \right)_{t=0} = 0,10$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 94,83%.

- (*) Evolución de la humedad relativa en función del tiempo

$$H_r(t) = 60 + 23,71 (1 - e^{-0,034t}) \quad (24)$$

$$T = 29,41 \text{ minutos}$$

$$(H_r)_{t=\text{inf}} = 83,71 \%$$

$$\left(\frac{d(H_r)}{dt} \right)_{t=0} = 0,81$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 89,22%.

- (*) Evolución de la temperatura equivalente en función del tiempo

$$Te(t) = 17 + 6,16 (1 - e^{-0,014t}) \quad (25)$$

$$T = 71,43 \text{ minutos}$$

$$(Te)_{t=\text{inf}} = 23,16 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\left(\frac{d(Te)}{dt} \right)_{t=0} = 0,09$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 95,59%.

- (*) Evolución del índice de Graham en función del tiempo

$$I_G(t) = 0,33 (1 - e^{-0,139t}) \quad (26)$$

$$T = 7,19 \text{ minutos}$$

$$(I_G)_{t=\text{inf}} = 0,33\%$$

$$\left(\frac{d(I_G)}{dt} \right)_{t=0} = 0,046$$

- (*) Evolución de la concentración de O_2 en función del tiempo

$$[O_2](t) = 17,1 + 3,91 \cdot e^{-0,0143t} \quad (127)$$

$$T = 69,93 \text{ minutos}$$

$$[O_2]_{t=\text{inf}} = 17,1\%$$

$$\left(\frac{d[O_2]}{dt} \right)_{t=0} = -0,056$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 98,14%.

- (*) Evolución del contenido de CO_2 en función del tiempo

$$[CO_2](t) = 0,05 + 0,95 (1 - e^{-0,01t}) \quad (28)$$

$$T = 100 \text{ minutos}$$

$$[CO_2]_{t=\text{inf}} = 1,0\%$$

$$\left(\frac{d[CO_2]}{dt}\right)_{t=0} = 0,0095$$

El residuo de la suma de cuadrados es del 96,64%.

(*) Evolución de la concentración de CO en función del tiempo

$$[CO](t) = 132,97 (1 - e^{-0,012t}) \quad (29)$$

T = 83,33 minutos

$$[CO]_{t=\infty} = 132,97 \text{ ppm}$$

$$\left(\frac{d[CO]}{dt}\right)_{t=0} = 1,60$$

El residuo de la suma de cuadrados es del 98,85%.

Estas evoluciones y sus derivadas se encuentran en el Anexo 22.

c) Comparación de los resultados entre el subnivel 3121 y 3152

El siguiente cuadro puede servir de resumen de las 4 paradas de ventilación, 2 en el nivel 3121 y 2 en el nivel 3152:

		O ₂ =f(CO) (ppmO ₂ /ppmCO)	O ₂ =f(CO ₂) (%O ₂ /%CO ₂)	CO=f(CO ₂) (ppmCO/%CO ₂)
AVANCE	1ª PARADA 3121	260	-	-
	2ª PARADA 3121	250	-	-
SUTIRAJE	1ª PARADA 3152	280	3,59	126,16
	2ª PARADA 3152	290	4,31	143,96

Las paradas de ventilación del nivel 3121 han sido en fase de avance, en cambio las de 3152 han sido en sutiraje.

El consumo de O_2 en función de la producción de CO es menor en avance, lo que también indica una mayor facilidad del carbón por oxidarse, ya que para producir una misma cantidad de CO se necesita menos O_2 . Esto no quiere decir que todo el O_2 consumido haya sido empleado para la formación de CO, sino que en la oxidación se produce también CO_2 y además hay cierta proporción de O_2 que queda adsorbido en el carbón sin reaccionar.

6.4.- TRABAJOS REALIZADOS EN LABORATORIO

6.4.1.- Descripción

Los análisis de gases han sido realizados por el LARECOM (León) y los ensayos con las muestras de carbón han sido realizados por el LOM, bajo la siguiente especificación:

- Análisis inmediato y elemental
- Formas de azufre
- Temperatura mínima de ignición en capa
- Temperatura mínima de inflamación en nube
- Método del agua oxigenada (índice de Maciejasz)
- Ensayos en estufa isoterma
- Ensayos de calorimetría adiabática
- Termogravimetría asociada a análisis térmico diferencial o asociado a calorimetría diferencial de barrido.

6.4.2.- Resultados obtenidos

Los ensayos realizados en laboratorio con las muestras de carbón se han arrojado los resultados que se muestran en el cuadro siguiente.

ANALISIS INMEDIATO, ELEMENTAL Y FORMAS DE AZUFRE

		%VOLATILES	%CENIZAS	%HUMEDAD	%CO ₂	%C	%H	%St	%Ss	%So	%Sp
1	P-3111	37	10.2	6.15	0.6	62.47	4.55	4.6	0.12	0.05	4.43
2	F-3111	36.95	11.5	3.85	1.6	62.95	4.18	4.96	0.18	0.53	4.25
3	P-3111 (H ₂ O)	37.6	12.75	0.15	1	63.29	4.02	6.65	0.07	1.4	5.18
4	P-3121	36.05	18.6	2.05	0.8	57.43	4	5.56	0.18	1.15	4.23
5	F-3121	37.35	12	1.1	1.6	64.11	4.02	5.32	0.05	0.5	4.77
6	P-3152	39.85	9.65	0.1	0.4	66.41	4.17	5.24	0.25	0.02	4.97
7	F-3152	33.35	12.7	6	1.4	59.13	4.19	6.44	0.38	1.4	4.66
8	P-3171	34.55	9.1	7.15	0.4	62.45	4.73	4.68	0.08	0.65	3.95

ENSAYOS TERMICOS

		T CAPA	T NUBE	INDICE DE MACIEJASZ	ESTUFA ISOTERMICA			CALORIMETRO	TG			DSC		
					T50	T150	T400		GP	TDM	TI	TIE	TFE	TCP
1	P-3111		460	0				1	0.18	356	314	105	279	212
2	F-3111		460	14.1				0	0.18	352	312	111	279	217
3	P-3111 (H ₂ O)		440	18.7				53	0.47	362	323	108	279	213
4	P-3121		480	16.4				9	0.32	368	324	117	303	208
5	F-3121		440	12.1				12	0.3	358	312	111	279	207
6	P-3152		460	10.1				2	0.27	356	311	105	267	209
7	F-3152	220	460	24.3	130	110	100	2	0.41	345	310	99	285	219
8	P-3171	220	460	11.3	120	110	100	44	0.39	349	308	105	303	215

P-3111 - Principio del nivel 3111

F-3111 - Fin del nivel 3111

S_t = azufre total en la muestra

S_s = azufre perteneciente a los sulfatos

S_p = azufre pirítico

S_o = azufre orgánico

T50 = temperatura de ignición con un volumen de 50 cm³

TG = análisis termogravimétrico

GP = incremento de peso al inicio del calentamiento

TDM = temperatura de máxima pérdida de peso

TI = temperatura de inducción a la combustión

DSC = ensayo de calorimetría diferencial de barrido

TIE = temperatura mínima inicial de la reacción exotérmica

TFE = temperatura máxima alcanzada durante la reacción exotérmica

TCP = temperatura de cambio de pendiente

Los resultados de los análisis de gases son los siguientes:

	CO ₂ (%)	CO(%)	N(%)	O ₂ (%)
P-3111	0,031	<0,01	78,6	21,3
F-3111	0,025	<0,01	78,6	21,3
P-3121	0,036	<0,01	78,7	21,2
F-3121	0,039	<0,01	78,9	20,8
P-3152	0,109	<0,01	78,4	20,5
F-3152	0,070	<0,01	78,8	20,5

6.4.3.- Análisis de los resultados

El ensayo de termogravimetría proporciona 3 parámetros: GP, TDM y TI.

Los gráficos de este ensayo muestran que el carbón, al principio de la oxidación, sufre una pérdida de peso progresiva hasta llegar a un punto que tiene lugar una ligera ganancia de peso. Este aumento se produce a temperaturas cercanas a 200 °C y en un pequeño periodo de tiempo, volviendo seguidamente a perder peso. Esta pérdida de peso llega a un punto de máxima pendiente que es el parámetro TDM. Este parámetro se muestra en la curva derivada de la curva de pérdida de peso en función de la temperatura.

El punto en el cual se cortan la tangente trazada por el punto TDM y la tangente trazada en la zona que no hay pérdida de peso, es el parámetro TI.

El ensayo de la calorimetría diferencial de barrido (DSC), proporciona 3 parámetros: TIE, TFE y TCP.

El gráfico de este ensayo comienza con una reacción endotérmica que seguidamente da lugar a una temperatura de inicio de la reacción exotérmica que es el parámetro TIE. Esta reacción sufre un aumento de pendiente y la reacción exotérmica se hace más rápida hasta llegar a una temperatura máxima alcanzada durante la reacción exotérmica. La temperatura a la que produce el cambio de pendiente es el parámetro TCP y la temperatura final es el parámetro TFE. Después de esta temperatura máxima se produce una reacción endotérmica muy suave.

El ensayo del calorímetro y los índices de Maciejasz y TIE indican que la muestra es menos reactiva cuanto más bajos son sus valores.

Los índices GP, TDM, TI, TCP, los ensayos de la estufa isotérmica, temperatura en capa y en nube, así como el contenido de CO₂ indican que la muestra es más reactiva cuanto más bajos son sus valores.

Al comparar las muestras al principio y al final de cada nivel, muestra fresca y muestra oxidada, la muestra oxidada debería ser menos reactiva que la fresca.

Subnivel 3111.-

En los ensayos realizados con muestras del nivel 3111, el contenido de CO₂, el ensayo del calorímetro y el índice TCP muestran que el carbón más fresco es el más reactivo.

En cambio los índices TDM, TI y TIE muestran que el carbón más oxidado es el más reactivo. Los análisis muestran un porcentaje en azufre pirítico mayor en la muestra final, por eso el índice de Maciejasz es mayor en ésta.

El ensayo de temperatura en nube y el índice GP son iguales por lo que no muestra una mayor reactividad de una a otra muestra.

Subnivel 3121.-

En los ensayos realizados con muestras del nivel 3121, el contenido de CO₂, y el índice TIE indican una mayor reactividad del carbón fresco. El ensayo de la temperatura en nube, el del calorímetro y los índices TDM y TI indican una mayor reactividad de la muestra oxidada.

El contenido en azufre pirítico es mayor en la muestra fresca y por ello el índice de Maciejasz es también mayor.

Los índices GP y TCP son similares por lo que no indican una diferencia de reactividad.

Subnivel 3152.-

En los ensayos realizados con carbón del nivel 3152, el contenido de CO₂ y los índices GP, TIE y TCP indican una mayor reactividad en el carbón fresco. El índice TDM indica que el carbón oxidado es más reactivo.

El contenido en azufre pirítico es mayor en la muestra oxidada por lo que el índice de Maciejasz es también mayor.

El ensayo de temperatura en nube, el del calorímetro y el índice TI no muestran una mayor reactividad de una o de otra muestra.

Los gráficos de los ensayos de termogravimetría y de calorimetría diferencial de barrido de todas las muestras de carbón se encuentran en el Anexo 23 y 24 respectivamente.

a) Análisis de los resultados del ensayo de la estufa isotérmica

Los resultados obtenidos y las dimensiones de los recipientes cilíndricos del ensayo de la estufa isotérmica realizada sobre dos de las muestras de carbón de la mina Oportuna (final del nivel 3152 y principio del nivel 3172) son:

V (cm ³)	Rc (cm)	T52 (°C)	T72 (°C)
50	2	130	120
100	2,85	110	110
400	4	100	100

siendo:

- V- volumen de los recipientes cilíndricos utilizados en el ensayo
- Rc- radio de la base del cilindro llamado radio crítico
- T52- temperatura crítica o de ignición de la muestra del final del nivel 3152
- T72- temperatura crítica o de ignición de la muestra del comienzo del nivel 3172

Con estos parámetros se han establecido las relaciones entre Rc y T52 y entre Rc y T72.

La representación matemática de la relación $Rc = f(Tc)$ está dada por la función del modelo de Frank Kamenetskii.

Este modelo se refiere a los cambios térmicos en un sólido. Según esto, la temperatura en un sólido no es homogénea, realizándose cambios térmicos limitados por su conductividad térmica.

La función es la siguiente:

$$L \frac{\delta c \cdot Tc^2}{Rc^2} = M - \frac{N}{Tc}$$

otra presentación de esta función es la siguiente:

$$Rc = A \cdot Tc \cdot e^{B/Tc}$$

siendo:

- $\delta c =$ factor de forma. Para un cilindro $\delta_c = 2 + 0,84 r^2/L^2$
- $Tc =$ temperatura crítica o de ignición (°K)
- $Rc =$ radio crítico del material, correspondiente a la temperatura crítica Tc

M y N= son dos constantes características del material que pueden ser determinadas experimentalmente

A y B= son parámetros calculados en los ajustes efectuados sobre sistemas de 1^{er} orden.

Despejando Rc en la primera función se puede relacionar A y B entre M y N respectivamente, según esto:

$$M = L \frac{\delta C}{A^2}$$

$$N = 2B$$

Los resultados obtenidos en ajustes sobre la función $Rc = A \cdot Tc \cdot e^{B/Tc}$ son:

- Nivel 3152

$$Rc = 2,3 \cdot 10^{-7} \cdot Tc \cdot e^{\frac{3970}{Tc}}$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 97,42%

- Nivel 3172

$$Rc = 5,9 \cdot 10^{-9} \cdot Tc \cdot e^{\frac{5342,4}{Tc}}$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 99,92%.

Estos ajustes se encuentran representados en el Anexo 25.

Si se aplican las relaciones entre A y M y entre B y N:

- Nivel 3152

$$A = 2,3 \cdot 10^{-7} \quad M = 31,36$$

$$B = 3970 \quad N = 7940$$

$$\delta c = 2 + 84 r^2/L$$

Al ser en los recipientes la relación $r/L = 0,5$; entonces:

$$\delta c = 2,21$$

luego:

$$L \frac{2,21 \cdot Tc^2}{Rc^2} = 31,36 - \frac{7940}{Tc}$$

- Nivel 3172

$$A = 5,9 \cdot 10^{-9} \quad M = 38,69$$

$$B = 5342,4 \quad N = 10684,8$$

luego:

$$L \frac{2,21 \cdot Tc^2}{Rc^2} = 38,69 - \frac{10684,8}{Tc}$$

Si se realizan regresiones lineales sobre la función:

$$L \frac{\delta c \cdot Tc^2}{Rc^2} = M - \frac{N}{Tc}$$

Se obtendrán las siguientes funciones:

- Nivel 3152

$$L \frac{2,21 \cdot Tc^2}{Rc^2} = 30,15 - \frac{7537,08}{Tc}$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 98,03%

- Nivel 3172

$$L \frac{2,21 \cdot Tc^2}{Rc^2} = 39,13 - \frac{10922,1}{Tc}$$

El residuo de la suma de los cuadrados es del 99,93%.

Estas funciones se encuentran representadas en el Anexo 26.

Si la muestra de carbón del final del nivel 3152 se encuentra a una temperatura de 25 °C, el radio crítico

$$Rc = 2,3 \cdot 10^{-7} \cdot Tc \cdot e^{\frac{3970}{Tc}}$$

tendría un valor de 0,41 m. Por lo tanto una acumulación de carbón en forma cilíndrica teniendo la base un radio de 0,41 m y el cilindro una longitud de 0,41 m supone un volumen crítico de 0,22 m³.

Si la muestra de carbón del comienzo del nivel 3172 se encontrara a una temperatura de 25 °C, el radio crítico

$$Rc = 5,9 \cdot 10^{-9} \cdot Tc \cdot e^{\frac{5342,4}{Tc}}$$

tendría un valor de 1,07 m y un volumen crítico de 3,84 m³.

Se observa que el carbón del final del nivel 3152 parece más reactivo ya que llega al punto de ignición del carbón con una acumulación menor.

7.- RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el presente trabajo esencialmente de campo, se han estudiado los factores geomineros que inciden en la aparición de los fuegos en las minas subterráneas de carbón en general y de lignito en particular, realizándose posteriormente un seguimiento detallado de varias labores de arranque en la Mina Oportuna de Endesa y en la Mina Santa Bárbara de Carbones de Pedraforca, S.A., con el propósito de investigar el origen y evolución de los focos de autocalentamiento.

A la vista de los antecedentes de ambas minas con relación a los fuegos, se decidió centrar el estudio de detalle en la Mina Oportuna y, en función de los resultados, continuar el trabajo en la Mina Santa Bárbara. La labor desarrollada ha consistido en:

- Monitorización de los parámetros ambientales en las labores de arranque.
- Medición de temperaturas superficiales de los hastiales de carbón.
- Medición de temperaturas internas del macizo de carbón.
- Estudio de puntos de calentamiento del carbón en la capa.
- Estudio de la evolución de las temperaturas en las acumulaciones de carbón arrancado.
- Toma de muestras de carbón durante la marcha de la explotación.
- Realización de experimentos que permitieran caracterizar el comportamiento de la labor con relación al autocalentamiento del carbón en capa (Paradas de ventilación).

Este trabajo de campo se ha complementado con las pruebas y análisis de laboratorio, empleando la instrumentación y metodología puestas a punto hasta el momento por el LOM, completando los objetivos del proyecto.

Los principales resultados obtenidos en el seguimiento de las labores en la Mina Oportuna son los siguientes:

1º) Análisis y ensayos sobre las muestras de carbón

a) Identificación de las muestras

MUESTRA	PROCEDENCIA
F-21	Principio del nivel 3111
F-22	Fin del nivel 3111
F-23	Principio del Nivel 3121
F-24	Fin del nivel 3121
F-25	Principio del Nivel 3152
F-26	Principio del nivel 3111 (Conservado en agua)
F-27	Fin del nivel 3152
F-28	Principio del nivel 3172

B) Análisis inmediato

MUESTRA	VOLATILES (%)	CENIZAS (%)	HUMEDAD (%)	CO ₂ (%)
F-21	37,00	10,20	6,15	0,60
F-22	36,95	11,50	3,85	1,60
F-23	36,05	18,60	2,05	0,80
F-24	37,35	12,00	1,10	1,60
F-25	39,85	9,65	0,10	0,40
F-26	37,60	12,75	0,15	1,00
F-27	33,35	12,70	6,00	1,40
F-28	34,55	9,10	7,15	0,40

c) Análisis elemental

MUESTRA	CARBONO (%)	HIDROGENO (%)
F-21	62,47	4,55
F-22	62,95	4,18
F-23	57,43	4,00
F-24	64,11	4,02
F-25	66,41	4,17
F-26	63,29	4,02
F-27	59,13	4,19
F-28	62,45	4,73

d) Formas de azufre

MUESTRA	S _{TOTAL}	S _{SULFATO}	S _{ORGANICO}	S _{PIRITICO}
F-21	4,60	0,12	0,05	4,43
F-22	4,96	0,18	0,53	4,25
F-23	5,56	0,18	1,15	4,23
F-24	5,32	0,05	0,50	4,77
F-25	5,24	0,25	0,02	4,97
F-26	6,64	0,07	1,40	5,18
F-27	6,44	0,38	1,40	4,66
F-28	4,68	0,08	0,65	3,95

e) Índice de Maciejasz o del agua oxigenada

MUESTRA	INDICE MACIEJASZ
F-21	ND
F-22	14,1
F-23	16,4
F-24	12,1
F-25	10,1
F-26	18,7
F-27	24,3
F-28	11,3

2º) Fuegos declarados

Durante la observación de las labores de explotación de los subniveles 3111, 3121, y 3152, no se produjo ningún fuego declarado. En el nivel 3111 se realizó un seguimiento de la evolución de las campanas en la clave del subnivel, detectándose un calentamiento progresiva pero sin llegar a producirse un fuego.

3º) Evolución de las condiciones ambientales durante la marcha normal de las labores

Los registros obtenidos durante la monitorización de las labores, arrojan el siguiente resultado:

a) Temperatura y humedad

a.1) Subnivel 3111

- Temperatura seca

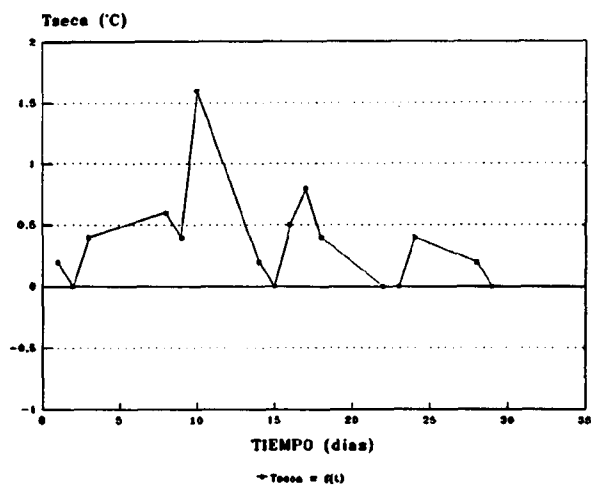


Figura 66.- Variación de la temperatura seca en el subnivel

La diferencia entre la temperatura seca de la entrada del nivel y el frente ha oscilado entre 0 °C y 1,6 °C. La media aritmética es de 0,36 °C.

- Temperatura húmeda

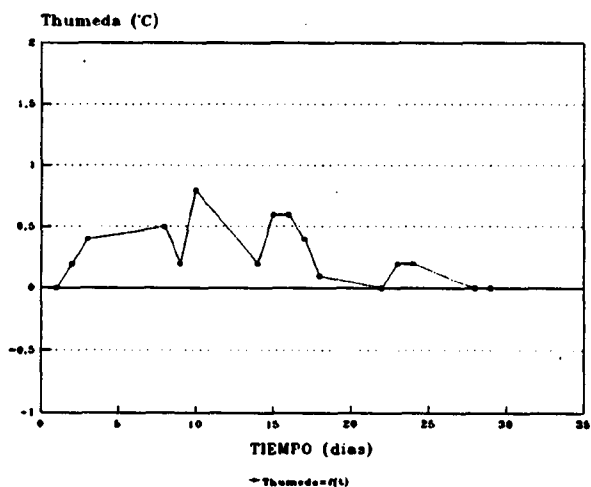


Figura 67.- Variación de la temperatura húmeda en el subnivel

El aumento de la temperatura húmeda a lo largo del nivel ha variado entre 0 y 0,8 °C. La media aritmética de las mediciones es de 0,27 °C.

- Temperatura equivalente

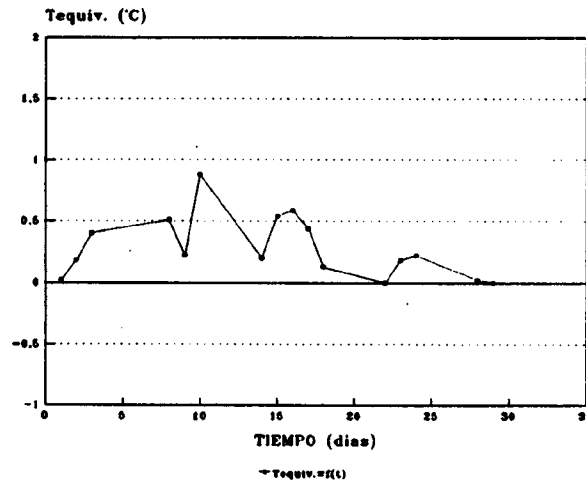


Figura 68.- Variación de la temperatura equivalente en el subnivel

La diferencia entre la temperatura equivalente de la entrada del nivel y el frente ha oscilado entre 0 °C y 0,88 °C. La media aritmética de las mediciones es de 0,28 °C.

- Humedad relativa

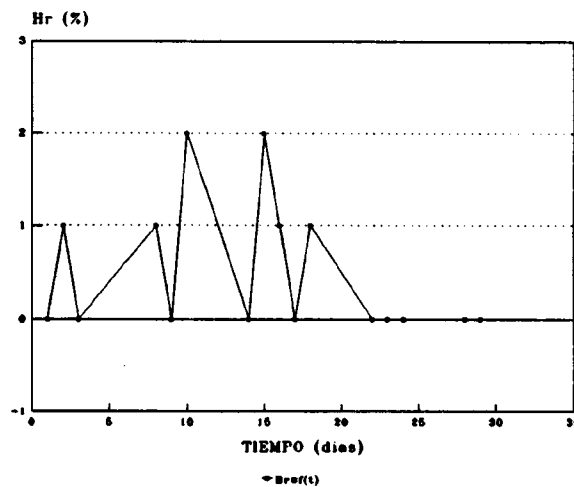


Figura 69.- Variación de la humedad relativa en el subnivel

La variación de la humedad entre el punto de entrada y el frente ha estado comprendido entre 0% y 2%, siendo la media aritmética del 0,50%.

a.2) Subnivel 3121

- Temperatura seca

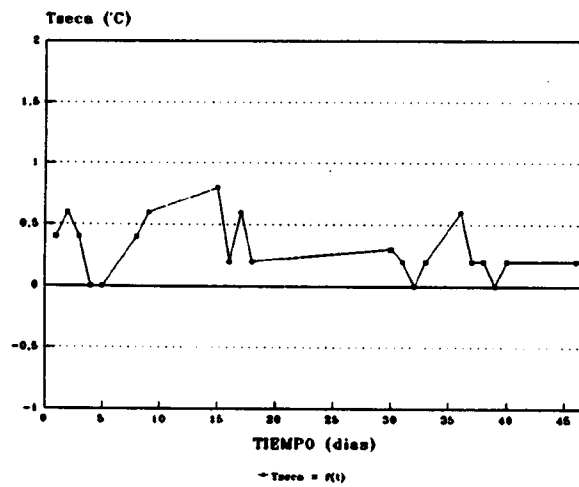


Figura 70.- Variación de la temperatura seca en el subnivel

La temperatura seca ha variado entre 0 °C y 0,8 °C. La media aritmética es de 0,30 °C.

- Temperatura húmeda

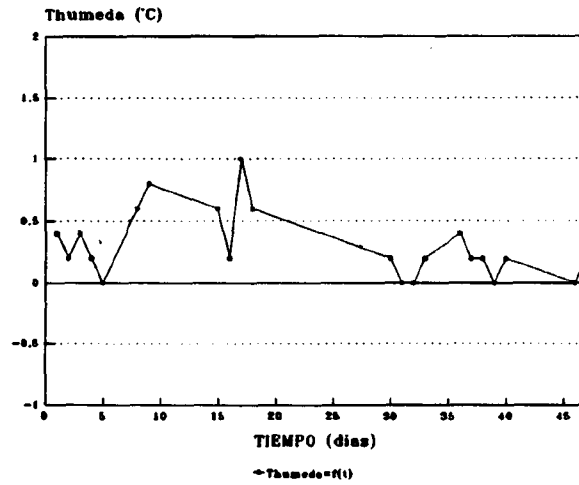


Figura 71.- Variación de la temperatura húmeda en el subnivel

La temperatura húmeda ha variado entre 0 °C y 1 °C. La media aritmética es de 0,30 °C.

- Temperatura equivalente

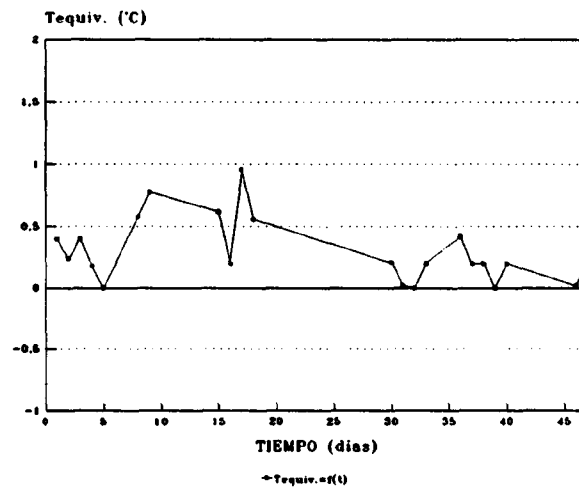


Figura 72.- Variación de la temperatura equivalente en el subnivel

La temperatura equivalente ha sufrido variaciones entre 0 y 0,96 °C. La media aritmética es de 0,30 °C.

- Humedad relativa

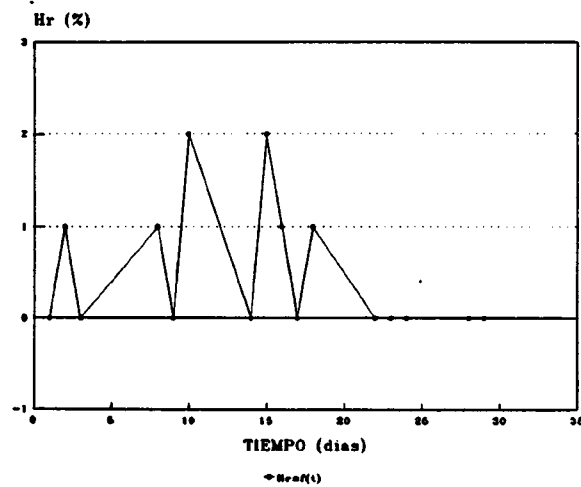


Figura 73.- Variación de la humedad relativa en el subnivel

La humedad relativa del aire ha variado entre 0% y 4%. La media aritmética es de 0,64%.

a.3) Subnivel 3152

- Temperatura seca

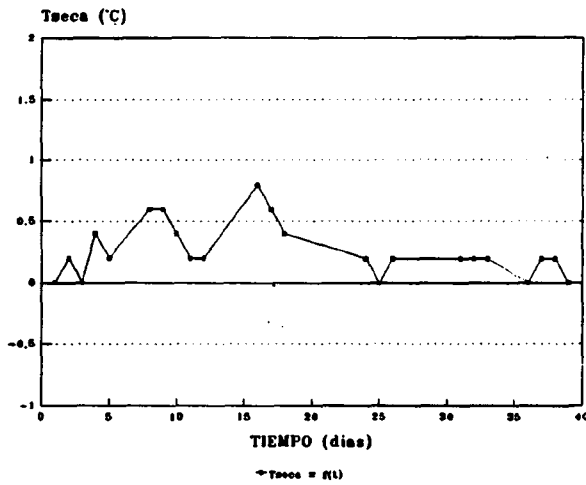


Figura 74.- Variación de la temperatura seca en el subnivel

La temperatura seca ha variado entre 0 y 0,8 °C. La media aritmética es de 0,26 °C.

- Temperatura húmeda

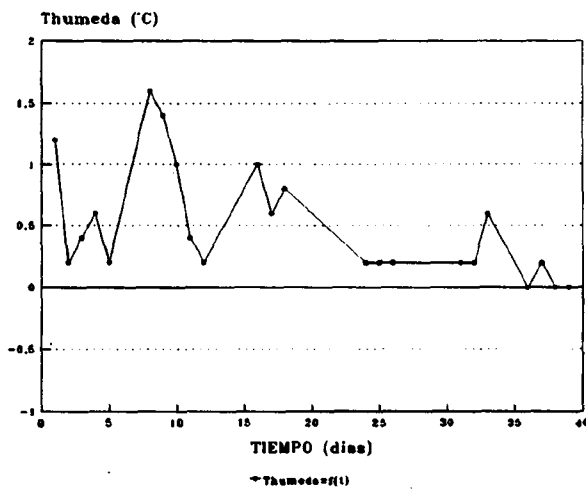


Figura 75.- Variación de la temperatura húmeda en el subnivel

La temperatura húmeda ha variado a lo largo del nivel entre 0 y 1,6 °C. La media aritmética es de 0,49 °C.

- Temperatura equivalente

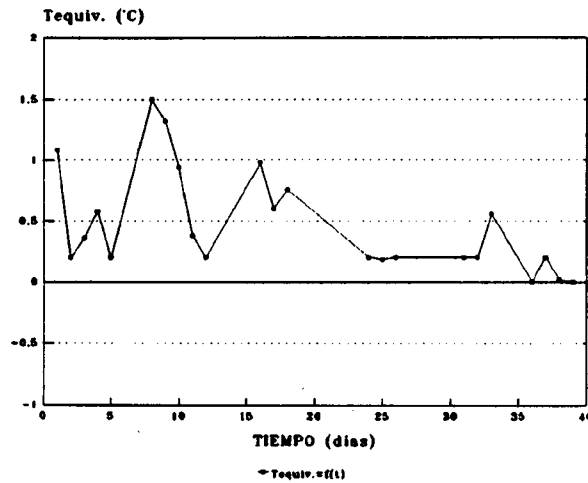


Figura 76.- Variación de la temperatura equivalente en el subnivel

La temperatura equivalente ha oscilado entre 0, y 1,5 °C, siendo su media aritmética de 0,47 °C.

- Humedad relativa

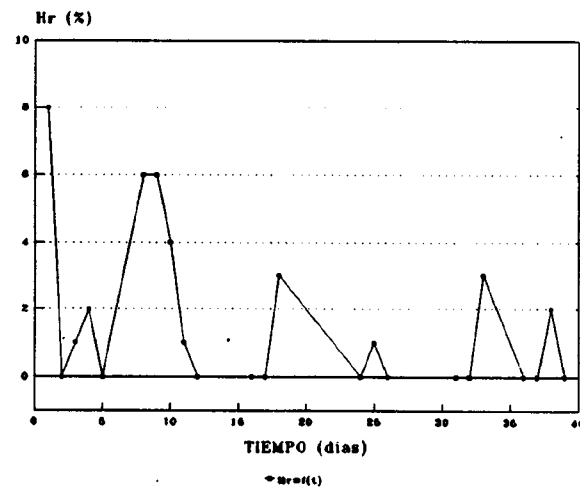


Figura 77.- Variación de la humedad relativa en el subnivel

La humedad relativa del aire ha estado comprendida entre 0% y 8%. La media aritmética es de 1,6%.

b) Monóxido de carbono

b.1) Subnivel 3111

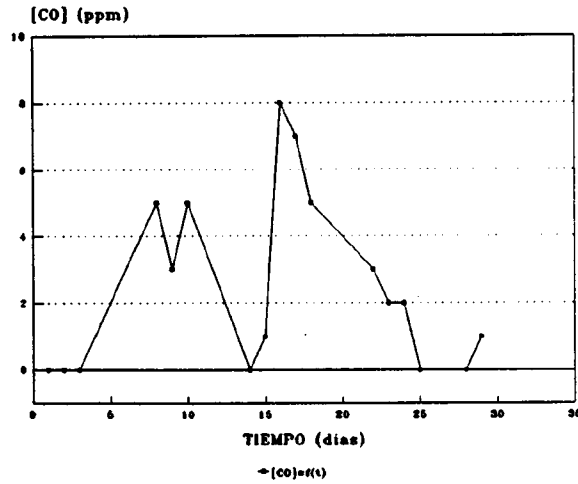


Figura 78.- Variación del contenido de CO en el subnivel

El CO medido a lo largo del nivel estaba comprendido entre 0 ppm y 8 ppm. El valor medio es de 2,47 ppm.

b.2) Subnivel 3121

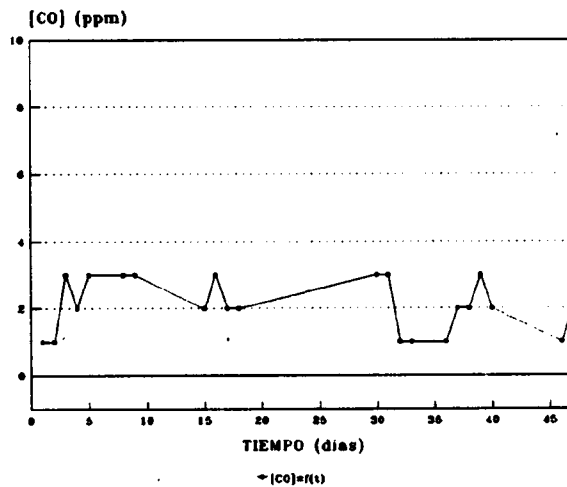


Figura 79.- Variación del contenido de CO en el subnivel

El CO medido estuvo comprendido entre 1 y 3 ppm. La media aritmética es de 2,09 ppm.

b.3) Subnivel 3152

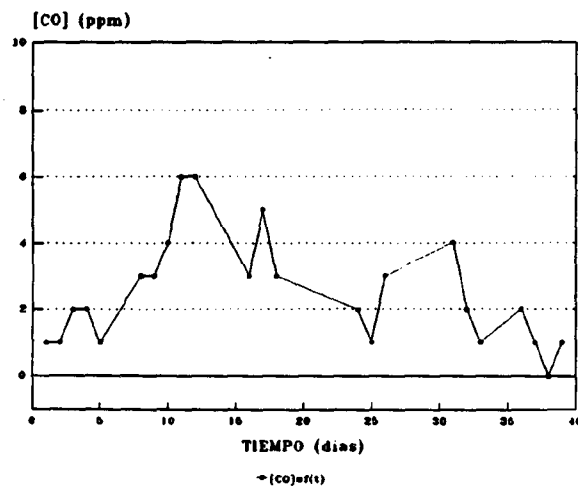


Figura 80.- Variación del contenido de CO en el subnivel

El CO producido en el nivel estuvo comprendido entre 1 y 6 ppm. La concentración media es de 2,47 ppm

c) Oxígeno

c.1) Subnivel 3111

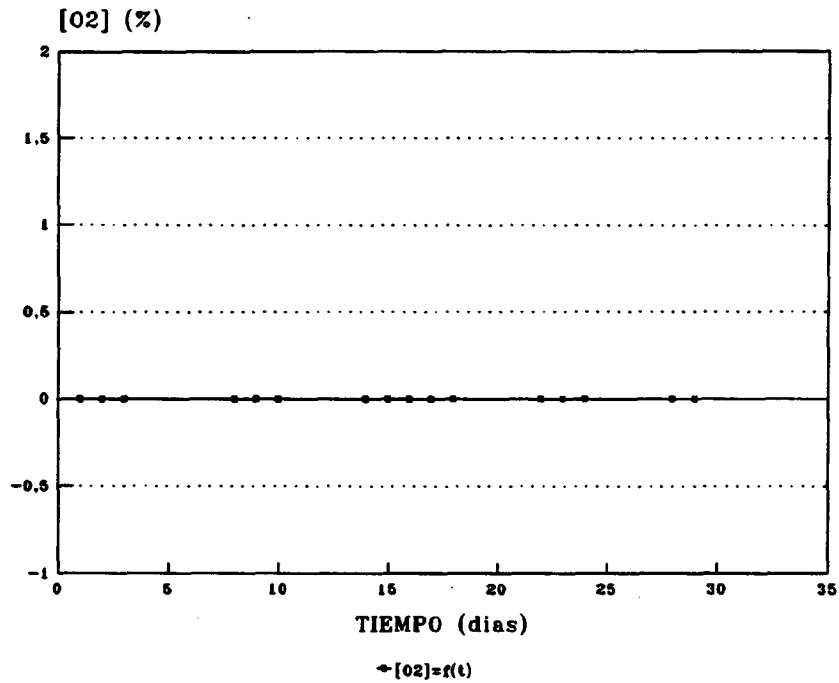


Figura 81.- Variación del contenido de O₂ en el subnivel

No se ha observado ninguna variación del contenido de O₂ a lo largo del nivel. Hay que tener en cuenta que el error del aparato es del 0,1%.

c.2) Subnivel 3121

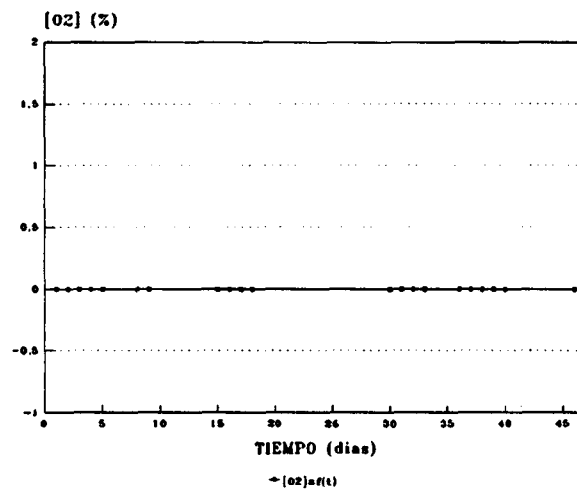


Figura 82.- Variación del contenido de O₂ en el subnivel

En este subnivel tampoco se ha observado variación alguna en el contenido de O_2 .

c.3) Subnivel 3152

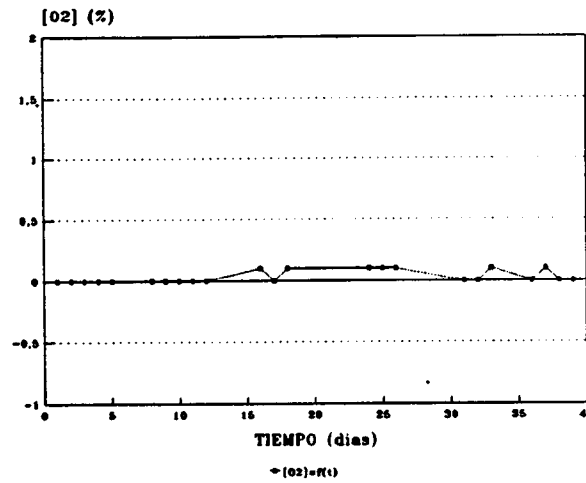


Figura 83.- Variación del contenido de O_2 en el subnivel

El consumo de O_2 a lo largo del subnivel ha estado comprendido entre 0% y 0,1%.

d) Caudal del aire

d.1) Subnivel 3111

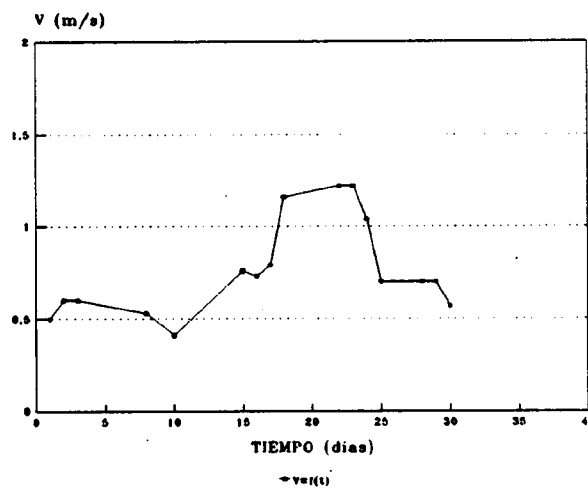


Figura 84.- Variación de la velocidad del aire en el subnivel

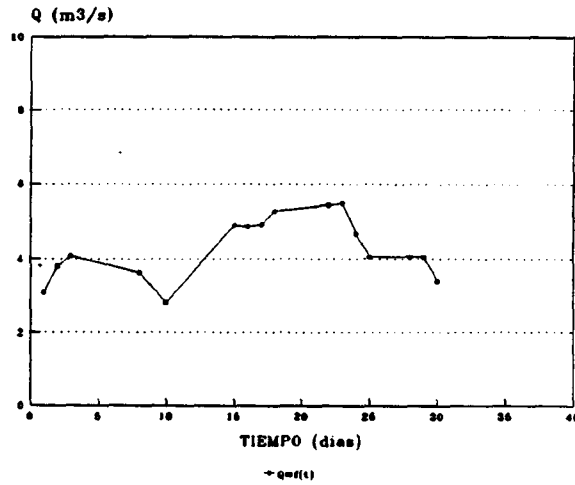


Figura 85.- Variación del caudal de aire en el subnivel

El caudal medio en la labor ha sido de 4,3 m³/s y la velocidad media de 0,76 m/s.
 La velocidad ha variado entre 0,50 m/s y 1,22 m/s.

d.2) Subnivel 3121

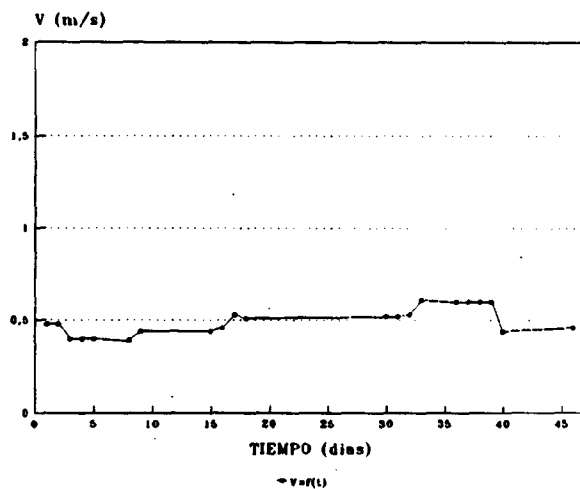


Figura 86.- Variación de la velocidad del aire en el subnive

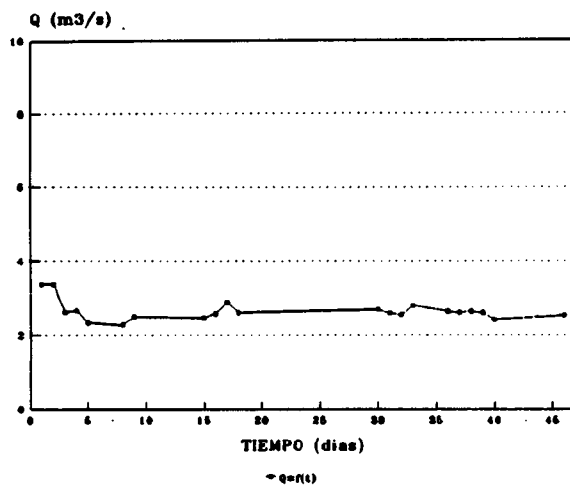


Figura 87.- Variación del caudal de aire en el subnivel

El caudal medio en la labor ha sido de $2,69 \text{ m}^3/\text{s}$ y la velocidad del aire se encontró entre $0,39 \text{ m/s}$ y $0,61 \text{ m/s}$.

d.3) Subnivel 3152

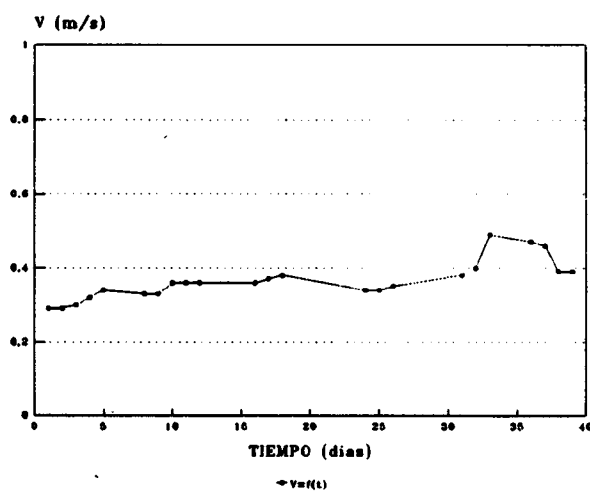


Figura 88.- Variación de la velocidad del aire en el subnivel

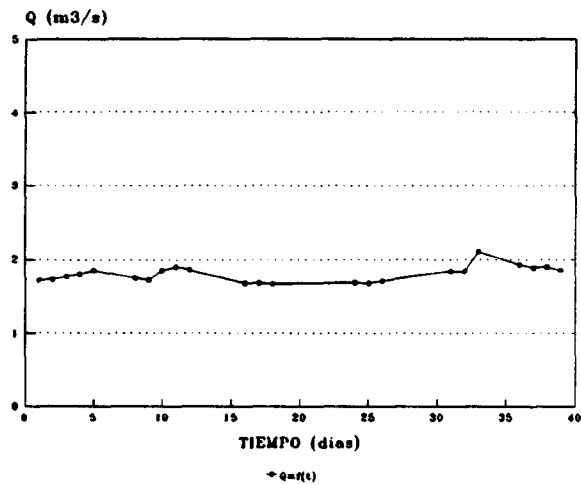


Figura 89.- Variación del caudal de aire en el subnivel

El caudal del aire estuvo comprendido entre 1,67 y 2,11 m³/s siendo el caudal medio de 1,80 m³/s.

e) Presión atmosférica

e.1) Subnivel 3111

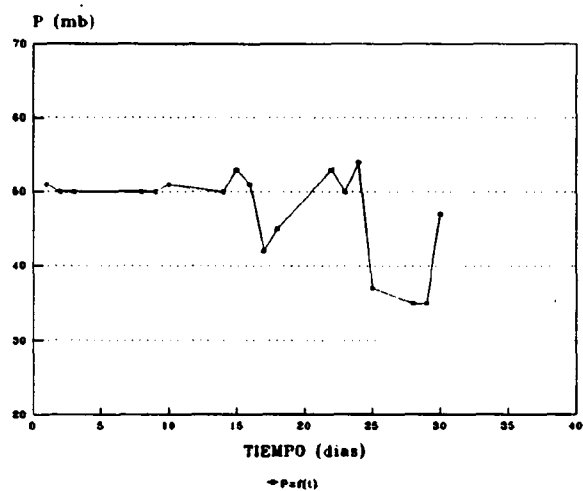


Figura 90.- Variación de la diferencia entre la presión atmosférica

La diferencia de presión entre el exterior de la mina y la labor ha variado entre 35 y 54 mbar. La media aritmética de las mediciones es de 45,11 mbar.

e.2) Subnivel 3121

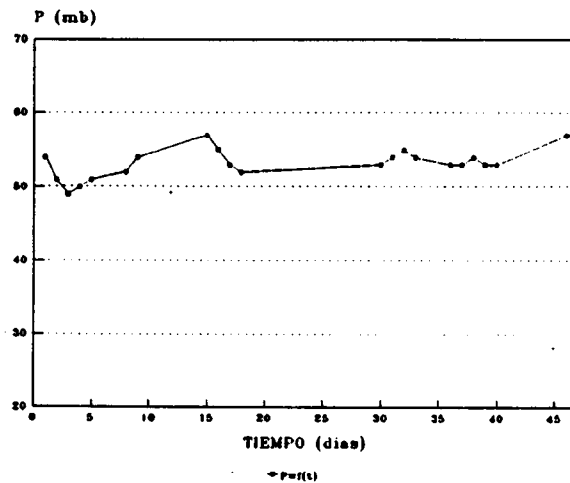


Figura 91.- Variación de la diferencia entre la presión atmosférica

La diferencia de presión entre el exterior y el nivel 3121 ha estado comprendida entre 49 y 57 mbar. La media aritmética de las mediciones es de 53,14 mbar.

e.3) Subnivel 3152

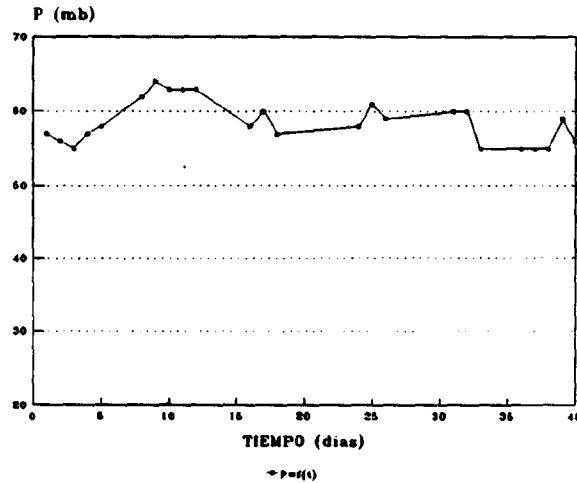


Figura 92.- Variación de la diferencia entre la presión atmosférica

La diferencia de presión entre el exterior y el nivel 3152 ha estado comprendida entre 55 y 64 mbar. La media aritmética es de 58,70 mbar.

4º) Evolución de las condiciones ambientales durante las paradas controladas de la ventilación secundaria.

a) Regresiones lineales que relacionan los contenidos de CO, CO₂, y O₂ entre sí.

Las expresiones generales de estas relaciones son las siguientes:

- $\Delta O_2 (\%) = a + b [\text{CO (ppm)}]$
- $\Delta O_2 (\%) = c + d [\text{CO}_2 (\%)]$
- $\Delta \text{CO (ppm)} = e + f [\text{CO}_2 (\%)]$

Los valores de las constantes figuran en el siguiente cuadro:

	SUBNIVEL 3121		SUBNIVEL 3152	
	PARADA 1	PARADA 2	PARADA 1	PARADA 2
a	20,85	20,97	20,74	2,85
b	-0,26	-0,025	-0,028	-0,029
c	-	-	20,89	20,97
d	-	-	-3,59	-4,31
e	-	-	-5,15	-3,24
f	-	-	126,16	143,96

- b) Ajustes sobre sistemas de 1^{er} orden sobre los parámetros medidos en función del tiempo.

Las expresiones generales son las siguientes:

$$T_s(t) = g + h (1 - e^{i \cdot t})$$

$$T_h(t) = j + k (1 - e^{l \cdot t})$$

$$T_e(t) = m + n (1 - e^{o \cdot t})$$

$$H_r(t) = p + q (1 - e^{r \cdot t})$$

$$I_G(t) = s + \rho (1 - e^{u \cdot t})$$

$$O_2(t) = v + w \cdot e^{x \cdot t}$$

$$CO_2(t) = y + z (1 - e^{\alpha \cdot t})$$

$$CO(t) = B + \Lambda (1 - e^{\epsilon \cdot t})$$

Los valores de las constantes figuran en el siguiente cuadro:

SUBNIVEL 3152		
	PARADA 1	PARADA 2
g	24,4	21
h	3,34	4,99
i	-0,016	-0,008
j	21,8	16,4
k	4,48	6,42
l	-0,016	-0,016
m	22,4	17
n	4,18	6,16
o	-0,013	-0,014
p	71,2	60
q	20,9	23,71
r	-0,0263	-0,034

SUBNIVEL 3152		
	PARADA 1	PARADA 2
s	0,15	0
p	0,18	0,33
u	-0,051	-0,139
v	15,9	17,1
w	4,83	3,91
x	-0,0063	-0,0143
y	0,09	0,05
z	1,586	0,95
α	-0,0044	-0,01
B	3	0
Λ	170,8	132,97
ε	-0,057	-0,012

Los resultados obtenidos en la Mina Santa Bárbara son los siguientes:

- 1º) Análisis y ensayos sobre las muestras de carbón tomadas por el LOM.

a) Identificación de las muestras.

MUESTRA	PROCEDENCIA
F-16	Nivel 6. Paquete General-Vieja. Vena de muro capa Vieja. Avance minador. Oeste
F-17	Nivel 6. Idem. Vena central capa Vieja
F-18	Nivel 6. Idem. Vena de techo capa Vieja
F-19	Nivel 6. Capas segundas. Roza perpendicular a capa, cortando carbón y piedra
F-20	Nivel 5. Capa General. Hastiales del recorte de acceso a la cámara Oeste

b) Análisis inmediato

MUESTRA	VOLATILES (%)	CENIZAS (%)	HUMEDAD (%)	CO ₂ (%)
F-16	38,75	36,20	0,35	22,11
F-17	32,30	37,00	0,40	24,25
F-18	39,85	32,75	0,35	17,60
F-19	34,45	26,35	0,50	7,40
F-20	22,75	53,50	0,60	4,60

c) Análisis elemental

MUESTRA	CARBONO (%)	HIDROGENO (%)
F-16	44,14	2,79
F-17	43,15	2,75
F-18	48,95	3,26
F-19	58,00	4,16
F-20	34,74	2,85

d) Formas de azufre

MUESTRA	S total	S sulfato	S pirítico	S orgánico
F-16	3,30	0,03	0,55	2,72
F-17	3,05	0,03	0,30	2,72
F-18	3,95	0,04	0,25	3,66
F-19	4,30	0,08	1,60	2,62
F-20	4,40	0,08	1,70	2,62

e) Índice de Maciejasz o del agua oxigenada

MUESTRA	INDICE MACIEJASZ
F-16	ND
F-17	ND
F-18	ND
F-19	8,7
F-20	ND

2º) Evolución de los parámetros ambientales durante la parada de la ventilación secundaria

La parada de ventilación se realizó en el 5º subnivel del cuartel que explotaba conjuntamente las capas 5ª y 6ª.

La parada tuvo una duración de 945 minutos. Los valores iniciales y finales de los parámetros medidos se encuentran en el siguiente cuadro:

Tiempo (min)	T _s (°C)	T _h (°C)	H _r (%)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
0	15,20	13,20	79	0	20,8	0,25	0,04
945	14,60	13,30	85	5	20,3	1	0,13

Los parámetros han variado poco, excepto el CH₄ que se desorbe y debido a la falta de ventilación se va acumulando por estratos, midiéndose una concentración

mayor del 10% en la parte superior del subnivel.

De los datos obtenidos en el seguimiento de las labores en las minas de lignito estudiadas, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- 1^a) De los análisis de las muestras de carbón obtenidas, se desprende que el lignito de la Mina Oportuna presenta una clara susceptibilidad a la autocombustión, de acuerdo con el contenido de azufre pirítico ($S_p > 2\%$) y al índice del agua oxigenada ($I > 10$). Sin embargo, el lignito de la Mina Santa Bárbara no presenta esa misma susceptibilidad, examinando también el contenido de azufre pirítico y el índice del agua oxigenada. Por otro lado, la capa de lignito que se explota en Oportuna es no grisosa, mientras que en Santa Bárbara el contenido de grisú en capa alcanza incluso los $6,7 \text{ m}^3/\text{tp}$.
- 2^a) En la cuenca de Ariño y concretamente en la explotación de la capa P, la experiencia ha demostrado que la aplicación del método de subniveles con sutiraje permite un mejor control y lucha contra los fuegos que el método de tajo largo con sutiraje.
- 3^a) En los subniveles de Oportuna, los focos de autocombustión más frecuentes se localizan en las campanas originadas por las presiones del terreno y las características del carbón.
- 4^a) El tiempo de apertura del subnivel (duración del avance más hundimiento en retirada) tiene una influencia directa sobre la probabilidad de aparición de un fuego.

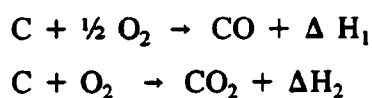
Concretamente, en los niveles estudiados (3111, 3121, 3152) en los cuales no se produjo ningún fuego declarado, la duración de la explotación fue de 39, 36 y 43 días, con longitudes de 47, 65 y 62 m, respectivamente. Además los pilares de protección que se dejan entre niveles (distancia entre ejes 15 m), evitan la existencia de corrientes de aire incontroladas a través de la zona de hundimiento.

5ª) De las mediciones de las condiciones ambientales en los niveles de Oportuna durante las paradas controladas de la ventilación secundaria ha sido posible deducir que el mecanismo de autocalentamiento que debe preceder al desencadenamiento de un fuego, tiene lugar del siguiente modo:

- 1.- Adsorción del O₂ sobre la superficie del carbón.
- 2.- Desorción de la humedad natural del carbón
- 3.- Reacción de oxidación superficial del carbón (microporos y macroporos) y desprendimiento de los productos de oxidación [CO y CO₂].

Es de destacar el crecimiento rápido observado de la temperatura y la humedad relativa del aire, lo que demuestra la exotermicidad del proceso de adsorción del O₂ y la evaporación del H₂O a nivel de microporos y macroporos. Por otro lado, el aumento de la constante de tiempo del índice de Graham confirma el retraso de la reacción de oxidación con relación a la adsorción del O₂.

Desde el punto de vista de la cinética química que se desarrolla en la superficie del carbón, todo parece indicar que a las temperaturas en que se produce el proceso observado en las paradas de ventilación, las reacciones que tienen lugar son:



La reacción de oxidación parcial muestra una constante de tiempo netamente inferior a la oxidación total.

Con relación a la adsorción del O₂ por el carbón, nótese que la concentración [O₂] en la atmósfera del subnivel, sigue, con suficiente aproximación, una ley del tipo:

$$[\text{O}_2] = [\text{O}_2]_r + \Delta[\text{O}_2]_n \cdot e^{-v/r} \quad (1)$$

donde

$[O_2]$ = Valor instantáneo de la concentración de O_2 en el aire.

$[O_2]_f$ = Valor final-asintótico de la concentración de O_2 en el aire.

$\Delta[O_2]_n$ = Valor de la fracción neta de la concentración de O_2 en el aire adsorbida por el carbón.

τ = Constante de tiempo del proceso de adsorción.

Por lo tanto, la fracción de la concentración $[O_2]$ absorbida por el carbón en cada instante será:

$$\Delta[O_2] = \Delta[O_2]_n \cdot e^{-t/\tau} \quad (2)$$

y el valor absoluto de la velocidad de adsorción:

$$V_a = 1/\tau \cdot \Delta[O_2]_n \cdot e^{-t/\tau} \quad (3)$$

Hay que resaltar que tanto la constante de tiempo τ como la fracción neta adsorbida $\Delta[O_2]_n$ dependen de la temperatura, tal y como demuestran los gráficos correspondientes a las paradas 1 y 2 de la ventilación secundaria.

- 6ª) Las mediciones de las condiciones ambientales durante la marcha normal de las labores del subnivel y durante la parada de la ventilación secundaria, han permitido su identificación, desde el punto de vista de conocer el comportamiento de estas labores a efecto del establecimiento de modelos de detección precoz de fuegos.
- 7ª) Las mediciones de las condiciones ambientales en los subniveles de la Mina Sta. Bárbara también durante paradas controladas de la ventilación secundaria, muestran un comportamiento absolutamente distinto de la labor notándose que la desorción del metano impide la adsorción del O_2 por parte del carbón y la reacción de oxidación superficial subsiguiente.

Por lo tanto el origen de los fuegos en esta mina tienen un periodo de incubación mucho mayor que en Oportuna y deben producirse en masas de carbón suelto en el hundimiento expuestas durante un largo periodo de tiempo a corrientes de aire, o en la propia capa de carbón cuando haya permanecido también un largo periodo de tiempo que permita la desgasificación prácticamente completa del carbón.

En definitiva, la afinidad por el oxígeno del carbón de Santa Bárbara es inferior a la del carbón de Oportuna, aunque los datos obtenidos en el Calorímetro Adiabático no permitan llegar a estas conclusiones experimentales.

Finalmente conviene señalar que dadas las limitaciones de tiempo lógicas de un proyecto de estas características, no ha sido posible completar la modelización de la labor a efectos del establecimiento de un modelo de seguimiento por ordenador integrado en un sistema de monitorización ambiental que permita la detección precoz de un fuego en la labor, debido a no haberse producido un fuego durante el periodo de realización de los trabajos de campo integrados en este proyecto.

8.- BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- **VIELLEDENT L.**
Mémento sur les feux et incendies dans les exploitations souterraines (1987)

- **FROGER Cl., JEGER Ch., PREGERMAIN S.**
Feux de mine (1976)

- **VIELLEDENT L.**
Utilisation des gaz inertes dans la lutte contre les feux et incendies (1982)

- **JEGER, Ch.**
Conditions de naissance des feux de mine
Publicaciones técnicas nº 3 (1972)

- **FROGER Cl.**
L'expérience de la lutte contre les feux dans les mines souterraines françaises (1986)

- **Charbonnages de France: Publications Techniques nº 7**
1972
Détection des feux

- **BREDENBRUCH E.**
Formación y prevención de fuegos de minas.
Gluckauf-90 (1954) - pág. 393/404

- **MULLER R.**
Métodos para evitar los fuegos por autoencendido en explotaciones abandonadas y en tajos con explotación por hundimiento en la "SAABERGWERKE AG".
Gluckauf-103 (1967) - pág. 1125/31

- **KRAUTSCHUN H.**
La aplicación del "Isoschaum" en minería
Chemiker Zeitung-89 (1965) pág. 441 DK 678:622

- **COQUIQUÉ A**
Consolidation et étanchéification des voies.
Cherbonnages de France: Documents Techniques n° 3-1969

- **GROSSMANN, R.**
Revestimientos con Isoschaum en los avances en galerías en carbón.
ECSC Research Project 7258-02/08/120 (1990)

- **DAVIDSON R.**
Natural oxidation of coal
IEACR/29 (1990)

- **BOTH W.**
Medidas técnicas para evitar fuegos en minas
Gluckauf-98 (1962) pag 1404

- **BOTH W.**
Prevención de fuegos espontaneos en las explotaciones por supresión de las corrientes
parásitas de aire.
Gluckauf-108 (1972) pag. 237/242

- **BOTH W.**
Apagado de fuegos de mina abiertos
Gluckauf-108 (1972) pag 1195/1200

- **BRÄNDIE E., POKUTE H., SCHIMITS P., ELLENBECK F.**
Combate con éxito de un desprendimiento de CO por el procedimiento de equilibrar las presiones
Gluckauf-116 (1980), nº 2, pág 57/63

- **STARK A., SEYFARTH H., SREDENSHECK H., STEVDEZ J.**
Stand und Entwicklung der Brandfrüherkennung bei der Bergbau AG lippe
Gluckauf 118 (1982) nº 8

- **LEON, P.**
Investigación sobre fuegos e incendios en las explotaciones subterráneas de lignito de Teruel (1989)

- **LUQUE V.**
Manual de ventilación de minas. AITEMIN

- **BURTON, R.C.; MIDDLETON, J.N.; WERNICK, B.J.; SHERESTON, B.G. and PRETORIUS, B.C.B.**
An automatic fire detection system for underground air recirculation schemes (1987)

- **BANERJEE, S.C.**
Spontaneous Combustion of Coal and Mine Fires. (1985)
A.A. Balkema. Rotterdam

- **MORRIS, R.**
Recommended ventilation techniques to be used in coal mines which are subjected to the adversa mining conditions of mine fires. (1987)
Underground Mining Methods and Technology

- **DAVID, H.**
Prévention des feux spontanés
Industrie Minérale

- **DELANNOY**
Hexafluorure de soufre
Industrie Minérale

- **Mc PHERSON**
Proceedings of the 4th US Mine Ventilation Symposium (1989)

- **WANG**
Proceeding of the 5th US Mine Ventilation Symposium (1991)

- **MUTMANSKY**
Proceeding of the 3rd US Mine Ventilation Symposium (1987)

- **MOUSSET-JONES**
Proceeding of the 2nd US Mine Ventilation Symposium (1985)

- **VIDAL, A.**
Explotación de minas. Transportes, ventilación y servicios generales del fondo (Tomo II) (1966)

- **STASSEN, P.**
Exploitation souterraine des gisements d'origine sédimentaire (1982)

- **PREGERMAIN, S.**
Lutte contre les feux souterrains dans les mines de charbon (1972)
Industrie Minérale

- HUANG ZHI-CONG
The ratio of alkanes, alkene and spontaneous combustion of coal in Liuzhi coal mining areas (1987)
22nd International Conference of safety in mines research institutes

- SMITH, A.; MIRON, Y.; LAZZARA, C.
Inhibition of spontaneous combustion of coal (1988)
Bureau of Mines

- FUNKENMEYER, M; KOCK, F.J.
Fire prevention in workings with rider seams prone to spontaneous combustion (1989)
23rd International Conference of safety in mines research institutes

- SULLIVAN, P.
Detection and control of fires and heatings in shallow abandoned coal mines (1989)
23rd International Conference of safety in mines research institutes

- BUOCZ, Z.; KOVACS, F.
Prevention possibilities against mine fires (1989)
23rd International Conference of safety in mines research institutes

- HERBERT, M.J.
A practical guide to the detection and control of mine fires (1989)
23rd International Conference of safety in mines research institutes

- ROBERTS, A.FJ.
Review paper: Mine Fires (1989)
23rd International Conference of safety in mines research institutes

- **CWIKLINSKY, LODEL, FROGER, BIGOURD**
Strategy for fire safety (1989)
23rd International Conference on safety in mines research institutes

- **WU, MA, LI, SHAO, WANG**
An investigation of the connections between large fire-areas by SF₆ tracer gas techniques (1989)
23rd International Conference of safety in mines research institutes

- **BRITISH COAL**
Development of methods for the detection of spontaneous combustion using specific indicator gases (1989)
British Coal

- **INSTITUT NATIONAL DES INDUSTRIES EXTRACTIVES**
Annales des Mines de Belgique (1979)

- **HERRING, J.R.; RICH, F.J.**
Spontaneous Coal Combustion: Mechanisms and Prediction (1983)
1983 International Conference on Coal Science Proceedings

- **CERCHAR**
Risques d'incendie par auto-echauffement dans les stockages et la manutention des produits pulverulents. Description des methodes d'essais de laboratoire:
 - Analyse Thermique Differentielle
 - Calorimetre Adiabatique
 - Etuve Isotherme

- **CERCHAR**
Risques d'incendie par auto-echauffement dans les stockages et la manutention des produits pulverulents. Description des phenomenes d'auto-echauffements