

## Los túneles de Pajares en la Línea de Alta Velocidad Noroeste

# Excavación mecanizada de túneles en presencia de gases deflagrantes 2ª parte: mecanismos de prevención en las TBM y presencia de gases en la ejecución de los túneles de Pajares

The Pajares tunnels on the Northwest high-speed railway line.

Mechanized excavation of tunnels in the presence of explosive gases.

2<sup>nd</sup> Part: Safety mechanisms on TBMs and the presence of gas during the excavation of the Pajares tunnels

**Raúl Míguez Bailo.** Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Jefe de Infraestructura. Dirección de Línea de Alta Velocidad Noroeste. ADIF. rmiguez@adif.es

**José María Jiménez Sánchez.** Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Director de Obra. Tramo Túneles de Pajares. Lotes 3 y 4. INECO. jose.sanchez@ineco.es

**Resumen:** En esta segunda parte del artículo se exponen los mecanismos y los sistemas de prevención establecidos en las tuneladoras de Pajares para operar la máquina en atmósferas con presencia de gas deflagrante, mostrando los valores de concentración de gas alcanzados en la ejecución de las obras. A modo de conclusión, se señala que la única normativa de referencia proviene del sector de la minería, pero se debe subrayar la notable diferencia existente entre las técnicas mineras y la obra civil de infraestructuras de transporte terrestre, circunstancia que debería motivar la creación de una nueva reglamentación específica en materia de seguridad y salud.

**Palabras Clave:** Pajares; Alta Velocidad; Túnel; Seguridad; Metano

**Abstract:** In the second part of this article a description is given of the safety devices and systems installed on the TBMs in Pajares to allow the operation of machinery in the presence of explosive gases and indications are given of the gas concentrations encountered during the drilling work. By way of conclusion, it is indicated that the only guidelines available in this area refer to the mining sector in spite of the considerable differences between mining techniques and those of civil works for land transport infrastructures. In the light of this circumstance, the author proposes the creation of a new and specific health and safety code.

**Keywords:** Pajares; High-speed; Tunnel; Safety; Methane

### 1. Introducción

En las últimas obras de grandes túneles de base que están siendo ejecutadas por el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) con máquinas de excavación integral mecanizada se están sufriendo los problemas derivados de la presencia de gases de naturaleza orgánica en el seno del material de excavación. Esta situación genera una problemática añadida en la planificación de la seguridad de los operarios que trabajan en nuestras obras.

La presencia de estos gases, cuyo más conocido exponente es el metano, supone realizar trabajos en una atmósfera contaminada con el riesgo potencial de sufrir una deflagración en el interior del túnel en el caso de que la concentración de este gas se sitúe entre el 5 % y el 15 % de concentración volumétrica en aire. Esta atmósfera de aire mezclado con metano es lo que se denomina grisú en las labores mineras. Fuera de dichos límites de concentración la mezcla resultante no es deflagrante, pero hay que señalar que valores de concentración de metano superiores al 15 % pueden provocar asfixia.

En esta segunda parte, de las dos que componen este artículo, se estudian los mecanismos de dilución y de detección de gases, así como los procedimientos de actuación establecidos en los túneles de Pajares, se recogen los valores de presencia de gases alcanzados, los rendimientos obtenidos en la excavación y se presenta una conclusión final sobre el problema.

## 2. Mecanismos de prevención en las TBM

### 2.1. Sistemas de dilución. Ventilación y aspiración

El principal problema que plantea la presencia de gas en el macizo es que no se puede eliminar a priori, esto es, no se puede realizar una descarga previa de dicho gas existente en el terreno a excavar, por lo que el gas se desprende de la roca en la fase de excavación, pasando a la atmósfera del interior del túnel. De acuerdo con esto, la única forma efectiva de lucha contra la presencia de gas es mantener la concentración del mismo en unos valores admisibles, evitando en todo momento que la concentración aumente hasta valores inadmisibles para la seguridad de los operarios.

Bajo esta óptica, es necesario solicitar a los fabricantes de tuneladoras unos sistemas de ventilación especialmente acondicionados y dimensionados para cada tipo de obra (longitud del túnel, sección del mismo, existencia de galerías, etc), así como sistemas de medición y control de los niveles de metano existentes en la atmósfera de la TBM. Estos dos elementos de diseño se convierten en las piezas básicas para poder operar la máquina en atmósferas grisuosas.

El esquema de ventilación general adoptado para todas las tuneladoras encargadas de ejecutar los Túneles de Pajares ha sido un complejo sistema mixto: ventilación soplante (aire limpio) - ventilación aspirante (aire viciado). Cada línea principal de ventilación cuenta con una o varias líneas secundarias, para así poder cubrir todas las zonas de la máquina y operar con cada una de ellas en función de la presencia o no de gases deflagrantes.

Para el diseño de la ventilación se han tenido en cuenta los criterios marcados por el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera, en concreto su apartado 4.7 (Labores subterráneas/Ventilación y desagüe), así como por las Instrucciones técnicas complementarias ITC que lo desarrollan. En-

tre los criterios contemplados, cabe destacar los siguientes:

- Se ha establecido para la ventilación soplante una velocidad mínima de retorno del aire viciado  $> 0,5$  m/s, superior a lo exigido en el resto de normativas existentes (0,2 m/s en las Normas Básicas de Seguridad Minera y 0,3 m/s en la normativa SIA de Suiza). Para su control permanente se ha instalado un anemómetro en la boca del túnel.
- Se ha establecido para la ventilación aspirante una frecuencia de renovación del aire del frente de 5 veces por minuto.
- Se ha fijado la velocidad máxima de circulación del aire por las tuberías en 17 m/s, para determinar el caudal máximo de operación en función del diámetro de la tubería.

A continuación se desarrolla el esquema general de ventilación:

**1. Circuito de ventilación soplante.** Permite desplazar el aire limpio proveniente del exterior hacia el frente de excavación, en concreto hasta la cámara de la rueda de corte de la TBM. Este circuito está compuesto por los siguientes elementos:

- *Ventilación exterior (Ventilador 0):* Instalación en el emboquille del túnel de un ventilador que capta el aire limpio de la atmósfera y lo impulsa hasta la parte trasera del back-up de la TBM, a través de un conducto flexible de ventilación de unos 2,6 m de diámetro, que se fija a la clave del túnel. Se trata de un ventilador axial de unos 250 kW de potencia, capaz de suministrar un caudal variable (50 - 90 m<sup>3</sup>/s), en función de la longitud de túnel ejecutado.
- *Ventilación soplante principal (Ventilador 1):* Instalación de un ventilador situado en el último remolque del back-up, a la salida de la tubería flexible de alimentación de la máquina desde el exterior. Se trata de un ventilador axial de unos 160 kW de potencia, capaz de suministrar un caudal de 45 m<sup>3</sup>/s, que impulsa el caudal de aire limpio hacia el frente, a lo largo del back-up, a través de un conducto principal de 1500 mm de diámetro. Este conducto se bifurca en la parte intermedia del back-up en dos conductos de 1.100 mm cada uno, que se prolongan hasta la parte delantera

del back-up, terminando uno de ellos en un conducto de ventilación de torbellino tipo Coanda, y otro en un ventilador secundario (ventilador 2).

- **Ventilación soplante secundaria (Ventilador 2):** Consta de un ventilador de 45 kW que impulsa el flujo de aire hacia la cámara de escombros de la rueda de corte, en su zona inferior, para evitar que se creen zonas de remanso donde se puedan quedar almacenadas bolsas de metano. Los puntos de inyección en la cámara son simétricos respecto del eje vertical para evitar recirculaciones dentro de la cabeza de corte, aportando un caudal de 4,5 m<sup>3</sup>/s en cada punto. Este ventilador es necesario por las numerosas pérdidas de carga que se producen en la impulsión hasta la cámara, ya que debido a la escasa disponibilidad de espacio, ocupado prácticamente en su totalidad por elementos de la tuneladora, los conductos presentan codos y estrechamientos (reducción de diámetro de 1.100 a 500 mm).

- **Complementos para una dilución efectiva:** El gas grisú, por su menor densidad respecto al aire, tiende a acumularse en las zonas superiores de la máquina, ocupando sobre todo aquellos huecos de más difícil acceso que normalmente constituyen zonas de "calma" donde no llega adecuadamente la ventilación normal. Para evitar este fenómeno se decidió diseñar un sistema complementario para forzar en esas zonas la dilución del aire cargado de metano y favorecer su desplazamiento a las zonas de aspiración. Este sistema consta de dos medidas adicionales:

- **Conducto de ventilación de torbellino Coanda:** situado en uno de los ramales de la ventilación soplante principal que termina en la parte delantera del back-up, entre el erector de dovelas y el captador de polvo de la ventilación aspirante. Por su configuración permite expulsar el aire en dos direcciones: longitudinalmente, paralela al eje de la tubería y tangencialmente, perpendicular al mismo, favoreciendo de este modo la agitación y renovación del aire en la zona de ubicación.
- **Toberas de chorro:** Son coronas circulares (de unos 120 mm de diámetro) que disponen de unas ranuras circunferenciales en una de sus caras internas, por las que sale el chorro de aire comprimido con que se las alimenta. Se trata de un sistema idóneo para su implantación en una

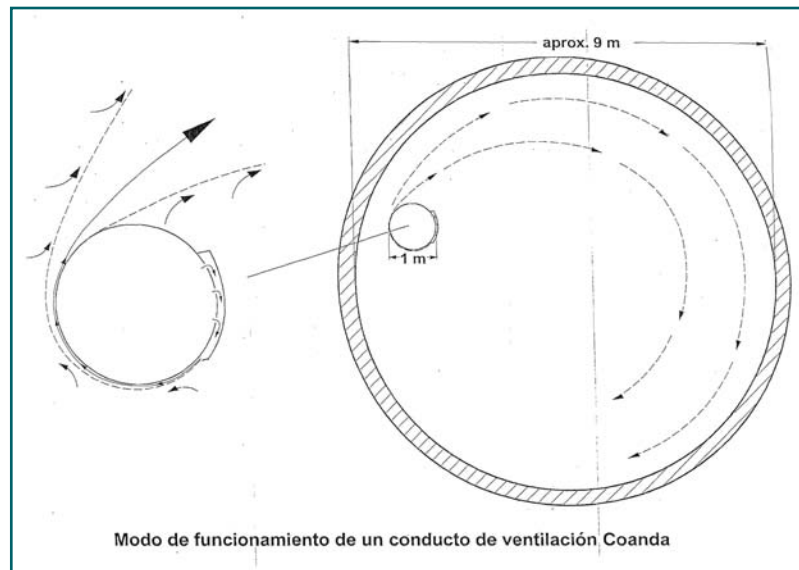


Fig. 9. Conducto de ventilación tipo Coanda.

tuneladora, por el pequeño tamaño de las toberas, que permite fijarlas en zonas "muertas" de la estructura del escudo, de difícil acceso, así como por la facilidad de alimentación de las mismas, ya que una manguera de 2" de diámetro de aire comprimido a 6 bares permite alimentar hasta 10 toberas, con bifurcaciones de 3/4" o 1". La distribución de toberas en la tuneladora es la siguiente:

- 3 toberas en el mamparo del escudo delantero (T1, T2, T3).
- 2 toberas en la cola del escudo (T4, T5).

- 2 toberas entre escudo y back-up (T6, T7).
- 1 tobera cerca de los orificios para las sondas de perforación para tratamiento del terreno o ejecución de paraguas de micropilotes (T8).

**2. Circuito de ventilación aspirante.** Permite desplazar el aire viciado del frente de excavación hasta la parte trasera del back-up donde se incorpora a la corriente de retorno del túnel. El circuito está compuesto por dos líneas diferentes, una con aspiración en la cámara de escombros y otra con aspiración en el back-up:

- **Ventilación aspirante principal (Ventilador 3):** Esta línea presenta varios puntos de aspiración, los más próximos al frente de excavación. En la cámara de escombros de la rueda de corte cuenta con dos puntos de aspiración, similares a los de impulsión, situados de manera simétrica y aspirando un caudal de  $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$  en cada punto, con la diferencia de que la aspiración se realiza en la zona alta de la cámara, donde se forman las bolsas de metano por la menor densidad que presenta este gas respecto a la del aire. El tercer punto de aspiración de esta línea se sitúa a la altura de la tolva de recepción de escombros, situada tras el mamparo del escudo delantero y está diseñada para aspirar  $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . El caudal suma de las tres aspiraciones es conducido a través de las tuberías de aspiración hasta el captador de polvo diseñado para un caudal de  $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$  y situado en la parte delantera del back-up. Este elemento permite, como su propio nombre indica, captar la mayor cantidad de polvo del aire aspirado, realizando un filtrado del mismo, para poder posteriormente devolverlo a la corriente de retorno del túnel en unas condiciones óptimas. De este modo se mantiene una atmósfera saludable para los operarios que trabajan en el túnel y se mejora por tanto la visibilidad en el interior del mismo, aspecto fundamental para garantizar la seguridad en el tráfico de composiciones. La capacidad de succión de este circuito se genera mediante un ventilador axial de unos  $75 \text{ kW}$  de potencia y un caudal de aspiración de  $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , que fuerza el aire a pasar a través del captador de polvo y lo empuja a la parte trasera del back-up para devolverlo a la corriente de retorno del túnel. Los diámetros de los conductos que configuran este circuito de aspiración varían desde los

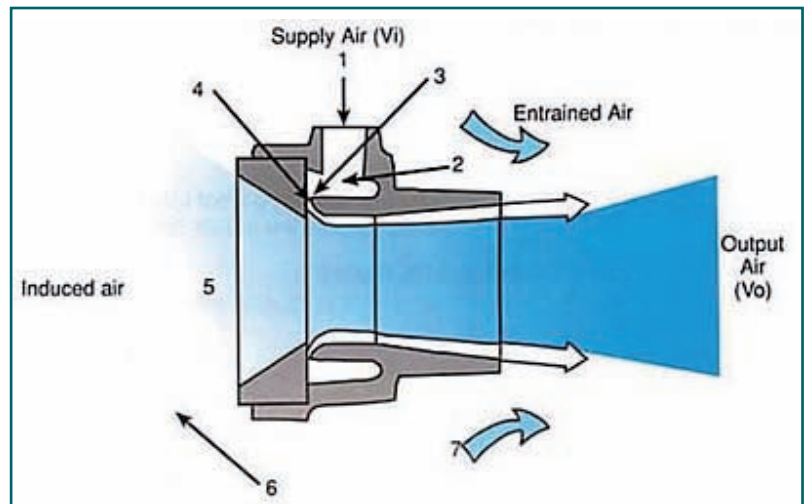


Fig. 10. Tobera alimentada por aire comprimido "air movers".

450 mm en la zona del frente de excavación hasta los 800 mm en la parte trasera del back-up.

- **Ventilación aspirante secundaria (Ventilador 4):** La aspiración en esta línea se realiza a lo largo de toda la máquina, pero principalmente en la parte alta del escudo frontal, donde se colocan dos tomas de aspiración simétricas de  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$  cada una, ya que es la zona donde con más probabilidad se pueden formar bolsas de metano. Además de estas dos tomas existen otras dos más a lo largo del back-up, con una capacidad de aspiración de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  cada una. Un ventilador situado en la parte posterior de la última toma fuerza el caudal resultante de la aspiración de todos los puntos an-

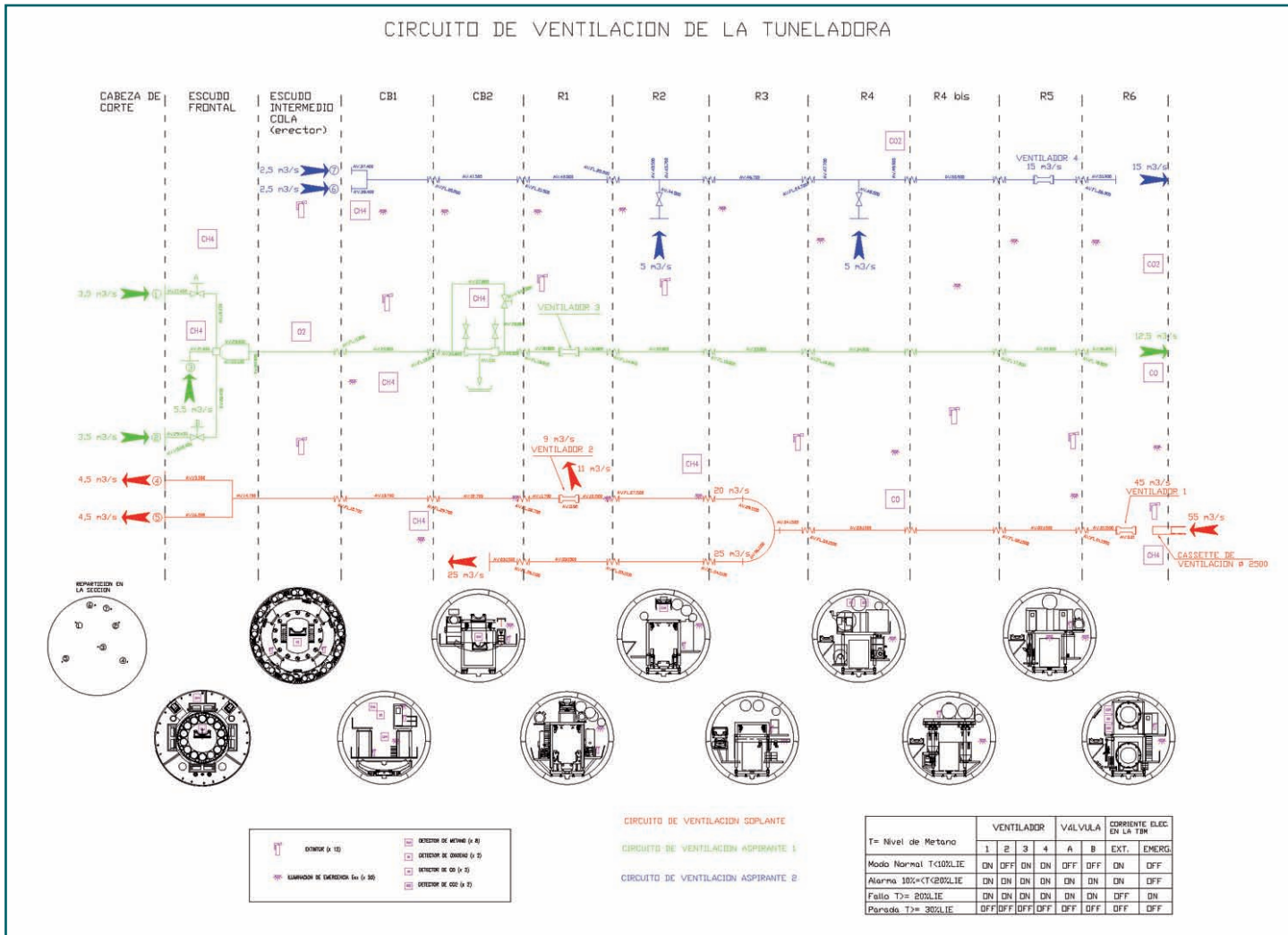


Fig. 11. Esquema general de ventilación de la TBM. Ubicación de sensores de gases.

tes citados hasta la parte trasera del back-up, donde se vierte a la corriente de retorno del túnel. Su caudal de funcionamiento es de 15 m³/s y la potencia instalada es de 75 kW.

Los parámetros básicos de la ventilación en los Túneles de Pajares se resumen en la tabla 1.

### 2.2. Sistemas de detección de gases

El segundo pilar sobre el que descansa la operatividad de la tuneladora en atmósferas grisuosas es la monitorización de la concentración de gas grisú de manera continua. Esta información puede permitir dos actuaciones fundamentales en el interior del túnel:

Tabla 1.		
	Parámetro	Valor
<b>V. Soplante</b>	Caudal mínimo ( $V_{\text{retorno}} > 0,5 \text{ m/s}$ ) Diámetro tubería principal soplante Capacidad ventiladores exteriores Velocidad máxima en tubería	39 m³/s 2,60 m 90 m³/s 17 m/s
<b>V. Aspirante</b>	Caudal necesario para renovación aire en cámara de excavación > 5 veces/minuto Diámetro tubería aspirante	13 m³/s 1,00 m

Fig. 12. Detector de gases portátil.



Fig. 13. Detector de gases fijo.

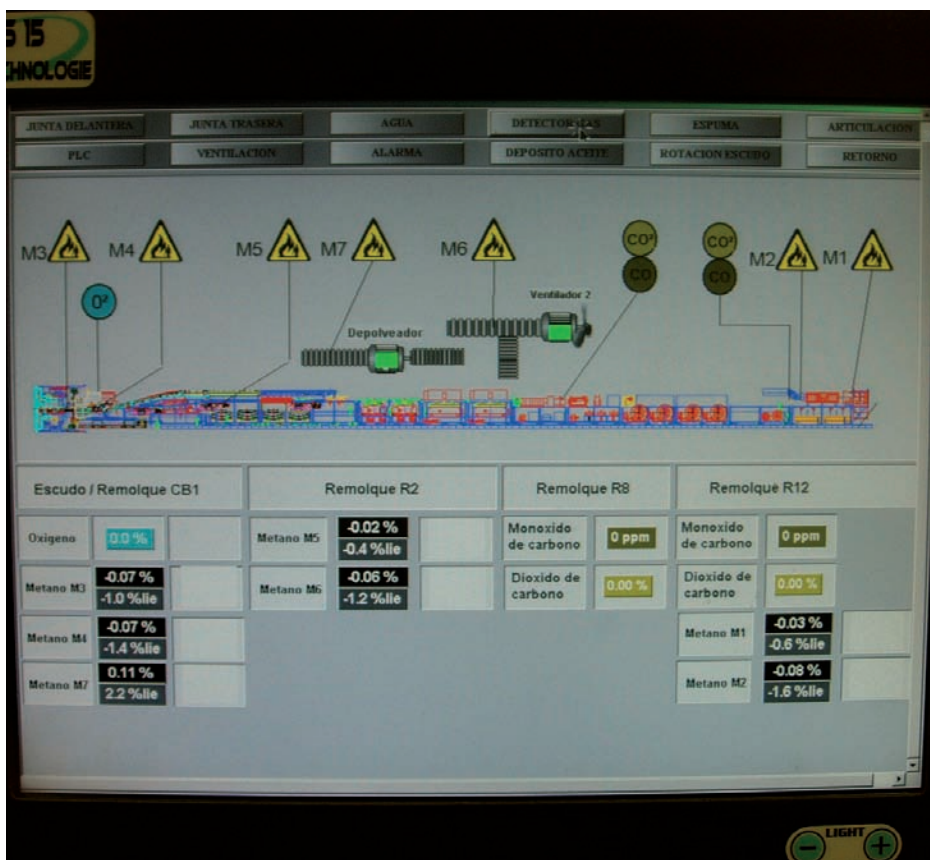


Fig. 14. Panel de control de gases instalado en la cabina del piloto.

- Elaborar procedimientos de actuación del personal de trabajo en base a la información suministrada por los detectores.
- Implantar automatismos en el PLC (*Programmable Logic Controller*) de la tuneladora para que ésta actúe de determinada forma en función de los valores de concentración que detecten los equipos. El PLC es un equipo electrónico programable diseñado para controlar en tiempo real y en ambiente industrial un proceso secuencial. De manera muy resumida se puede decir que el sistema produce una reacción a la información recibida por los captadores del sistema automatizado (finales de carrera, células fotoeléctricas, sensores, encoders, teclados, etc.) y se actúa a través de secuencias programadas sobre los accionadores de la instalación (motores, electroválvulas, indicadores luminosos, etc.), variando su régimen de funcionamiento. En definitiva, se trata de un lazo cerrado entre un dispositivo que controla (PLC) y la instalación en general.

Se pueden implantar dos tipos de medidores de gas: equipos portátiles y equipos fijos asociados al PLC de las tuneladoras.

Los equipos portátiles ofrecen la versatilidad y agilidad necesaria para comprobaciones puntuales y para la realización de trabajos singulares. Debido a su pequeño tamaño y alimentación independiente, a través de una batería, permite al trabajador llevarlo de forma continua durante la ejecución de trabajos en zonas susceptibles de generación de gas. De este modo se asegura su protección ya que el equipo portátil emite una alarma acústica y luminosa en caso de detección de gases en concentraciones peligrosas. Los equipos portátiles utilizados para la ejecución de túneles suelen medir la concentración de cinco gases ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SH_2$  y  $SO_2$ ). No obstante, existe una amplia variedad en el mercado para este tipo de dispositivos.

Los equipos fijos se constituyen como elementos de seguridad integral al controlar de forma permanente el espacio de trabajo en la TBM, mediante la

colocación de detectores a lo largo de toda la máquina y su actuación como interruptores en la secuencia general de trabajo de la tuneladora.

Por tanto, la protección de la máquina está basada en las señales proporcionadas por un conjunto de detectores de gases, en funcionamiento permanente y conectados con el PLC. La lectura de cada detector puede visualizarse tanto en su propio display (en caso de que disponga de él), como en el cuadro de control de gases y en las pantallas de control de la cabina del piloto de la TBM. Estos detectores están diseñados para trabajar en atmósferas explosivas ya que se alimentan por una tensión de seguridad intrínseca de 24 Voltios en corriente continua y están protegidos contra sobrecargas por fusibles.

La ubicación de los detectores de metano fijos de la máquina se establece en función de la posibilidad de presencia de gas en el interior de la tuneladora. La zona más próxima al frente de excavación siempre será susceptible de presentar las mayores concentraciones puntuales de gas, pues una vez que éste se introduce en el túnel se va diluyendo con la ventilación existente. De este modo se han establecido como zonas prioritarias las siguientes:

- *Escudo delantero*, justo detrás del mamparo de la rueda de corte. En esta zona se han implantado de 2 a 3 sensores, localizados en el acceso a la cámara de desescombro y en las partes superiores del escudo (zonas de posible acumulación). Los detectores se encuentran a una distancia aproximada del frente de 5 a 10 m.
- *Entre el accionamiento principal y el erector de dovelas*. En esta zona se han implantado de 1 a 2 sensores, para controlar las posibles entradas de aire viciado que pueden producirse entre el anillo y el escudo de cola durante la operación de inyección del trasdós. Además, esta zona se considera de especial importancia por ser la más próxima al frente con presencia constante de personal. Los detectores se encuentran a una distancia aproximada del frente de 8 a 15 m.
- *Junto a la cabina del piloto*, en el primer remolque, se ha implantado un detector para controlar la cabecera del back-up. Se encuentra a una distancia aproximada del frente de 20 m.
- *En las proximidades del ventilador secundario* se ha implantado un detector, como elemento de control



Fig. 15. Panel de control de gases instalado en el back-up.

en el back-up de la tuneladora. Se encuentran a una distancia aproximada del frente de 90 m.

- *En la salida de la tubería de ventilación aspirante*, al final del back-up, se ha implantado un detector para controlar el aire viciado de la aspiración, que se lleva a cabo en el punto de vertido del material excavado sobre la cinta, en la cámara de desescombro, donde se pueden presentar posibles concentraciones de gas. La instalación de este detector debe efectuarse en el centro de la corriente y protegido por una placa deflectora, para que se encuentre en la sombra de la corriente y así evitar la distorsión de medidas por la suciedad y el soplo directo. Se encuentran a una distancia aproximada del frente de 160 m.

Todos los equipos de medición deben someterse a calibraciones periódicas para garantizar su perfecto funcionamiento de manera continua. Con objeto de comprobar el funcionamiento global del sistema de detección, deben realizarse simulacros de presencia de gas, generando una atmósfera explosiva en cada uno de los sensores, y verificando los mecanismos de desconexión de equipos para las diferentes concentraciones. Además, tal y como se detalla en el punto referido a los procedimientos de trabajo, en el caso de que alguno de los sensores se encuentre averiado se modifican los procedimientos de seguridad para contemplar esta situación.



Fig. 16. Realizando calibración de uno de los sensores.

La mayor dificultad que presenta la implantación de detectores fijos de gas es la imposibilidad práctica de ubicar sensores en la rueda de corte, que es la zona donde mayores concentraciones puntuales de gas se pueden llegar a alcanzar en la fase de excavación, pues debido al polvo que se genera en la fase del avance de la tuneladora el sensor se inutiliza y queda tupido, perdiendo su funcionalidad. Para paliar este déficit se establecen los procedimientos de trabajo que se detallan a continuación.

### 2.3. Procedimientos de actuación establecidos en los Túneles de Pajares

Resulta obvio que una máquina de excavación integral a sección completa es de una complejidad enorme y que, por tanto, es imposible que la instalación en su conjunto sea de características antideflagrantes. Por ello, ha sido necesario optimizar los elementos que, por su funcionalidad, son absolutamente indispensables de cara a la seguridad de los trabajadores y a la integridad de la propia máquina. Con este criterio, se decidió que era necesario dotar a las tuneladoras con equipos antideflagrantes que pudiesen permanecer en funcionamiento incluso en aquellas situaciones en las que se detectase una elevada concentración de grisú en el túnel. Partiendo de la base de que la ventilación principal está ubicada en el exterior y dispone de una alimentación de emergencia con grupos electrógenos (de esta forma la ventilación del túnel queda asegurada bajo cualquier circunstan-

cia), los equipos con dispositivos antideflagrantes de la TBM son los siguientes:

- Bombas de agua ubicadas en el escudo y en los depósitos de impulsión del back-up de las máquinas (en las tuneladoras de la vertiente leonesa, que excavan con pendiente descendente, es vital mantener el funcionamiento del bombeo para evitar la inundación completa de la máquina).
- Iluminación básica en la tuneladora.
- Ventilador soplante secundario, ubicado en el back-up.
- Ventilador aspirante.
- Sistema de filtrado de la ventilación aspirante, pues a través de dicho equipo puede circular gas.
- Sistemas de detectores de gas para continuar midiendo la concentración.

A partir de los datos expuestos relativos al diseño de la ventilación, de los sistemas de detección así como de los equipamientos disponibles para las actuaciones de emergencia (equipos autorrescatadores, cabinas presurizadas autónomas con capacidad suficiente para alojar a todo el personal que se encuentre en el entorno de la tuneladora, etc...) se definen unos procedimientos de trabajo en atmósferas potencialmente explosivas. Estos procedimientos son, básicamente, secuencias de actuación en función de las concentraciones de metano registradas en los detectores, tanto fijos como portátiles. A continuación se describen los procedimientos de trabajo implantados en todas las tuneladoras de Pajares.

#### A. Procedimiento general de trabajo en presencia de gas grisú.

Una vez que la máquina se encuentra excavando en una zona con posible presencia de metano, todos los trabajadores deben ser avisados de que se activa el procedimiento de trabajo en atmósferas potencialmente explosivas. El PLC de las tuneladoras se ha programado con una secuencia de órdenes que responde a los siguientes valores de concentración que marquen los detectores fijos de la máquina (cualquiera de los sensores fijos de la TBM puede activar de manera automática los niveles de alarma que se describen):

- 10 % del Límite Inferior de Explosividad (L.I.E.). Si alguno de los metanómetros registra una lectura igual o superior a este valor, se procede de la forma que sigue:



- Saltan las alarmas luminosas y acústicas en la TBM, indicadoras de la presencia de gas en concentraciones iguales o superiores al 10 %.
  - El piloto de la TBM informa por megafonía de la situación y avisa de la detención de los trabajos de excavación o montaje de anillos que se esté realizando (en su caso).
  - Se detiene automáticamente la excavación de la máquina, parando el accionamiento de la rueda de corte y el sistema de cintas de extracción, en una secuencia de parada de 30 segundos aproximadamente, para dar tiempo a los distintos operarios a retirarse de sus puestos de trabajo.
  - El piloto informa al personal de playa de vías, a los conductores de las locomotoras que se encuentren en el túnel y al personal de oficinas de la presencia de gas y de la detención de los trabajos de producción.
  - Se procede a activar la segunda velocidad del ventilador soplante secundario, situado en el back-up.
  - Se detienen los trabajos de inyección de morteros, gravilla y lechadas de cemento, y se procede a limpiar las líneas de inyección para evitar obstrucciones.
  - El piloto y el jefe de turno permanecen en la cabina recibiendo información de la evolución de la concentración de metano. Si la concentración disminuye hasta el 0 % en todos los sensores se procede a reanudar las labores de producción; si por el contrario aumenta su valor y alcanza el 19 % se procede a dar orden de apagar los motores de combustión, desactivar los mandos de control remoto y preparar la evacuación del túnel. Además, se solicita al personal de playa de vías que se active la máxima velocidad del ventilador exterior.
- 20 % del Límite Inferior de Explosividad (L.I.E.). Si en alguno de los metanómetros continúa aumentando el valor de la concentración y alcanza este límite, se procede la forma que se detalla:
    - El responsable de equipos eléctricos de la TBM pulsa el interruptor de corte de los equipos no antideflagrantes, quedando en funcionamiento sólo los equipos citados anteriormente.
    - Se procede a iniciar la evacuación, por lo que todo el personal a excepción del piloto y el jefe de turno debe reunirse en la parte final del back-up, entorno a la composición de emergencia para evacuación de la TBM. El encargado revisa la presencia de todo el personal y recorre la tuneladora para garantizar que no queda nadie en la máquina.
  - El piloto y el jefe de turno permanecen en cabina recibiendo la información de la evolución de las lecturas de los sensores. Si la concentración en todos ellos disminuye a 0 % se procede a reanudar los trabajos de producción; en caso contrario, si la concentración alcanza el 29 % del L.I.E., se procede a informar al personal de playa de vías de la evacuación del túnel.
- 30 % del Límite Inferior de Explosividad (L.I.E.). Si en alguno de los metanómetros continúa aumentando el valor de la concentración y alcanza este límite de manera persistente, es decir, no como una medida puntual elevada, se procede la forma que se detalla:
    - Se corta la alimentación eléctrica de la tuneladora. Se quedan funcionando los elementos de iluminación con baterías autónomas así como los sistemas antideflagrantes conectados con un grupo electrógeno ubicado en el back-up de la máquina. Los sistemas de bombeo intermedio y la iluminación a lo largo del túnel permanecen operativos.
    - Se evacua el túnel a pie. El regreso a la máquina está condicionado a la verificación de ausencia de metano por parte de una brigada de operarios equipada con medidores portátiles que recorrerán el túnel desde el emboquille hasta el escudo de la TBM registrando la concentración de gas. Este trabajo de verificación no podrá iniciarse al menos hasta pasados 30 minutos de la evacuación del túnel, para dar tiempo a una renovación del aire en el mismo.
  - 45 % del Límite Inferior de Explosividad (L.I.E.). Si en alguno de los metanómetros el valor de la concentración alcanza rápidamente este límite, se procede a evacuar el túnel de manera inmediata y urgente sin esperar a comprobar la tendencia de evolución de la concentración.

*B. Procedimiento de detección en zonas catalogadas como potencialmente susceptibles de aparición de gas.*

En aquellas zonas que se han considerado zonas de posible presencia de gas metano se realiza una



medición suplementaria de las medidas generales mediante el uso de detectores portátiles manuales. De esta forma se refuerza el control sistemático de los niveles de concentración, realizando mediciones en la rueda de corte, que, como se ha dicho anteriormente, es la zona donde se pueden producir concentraciones puntuales de gas desprendido del terreno excavado y donde no se dispone de ningún detector fijo asociado a la TBM.

Se establecen las siguientes medidas adicionales:

- En cada avance de excavación, una vez finalizado el mismo, se realiza una medición de gas con detector portátil en el interior de la rueda de corte, a través de la tolva de desescombro.
- Si en esas mediciones adicionales en la rueda de corte se detecta una concentración superior al 10 % se procede a ventilar el interior de la rueda de corte con los difusores de aire comprimido, a través de la tolva.
- Si en esas mediciones adicionales en la rueda de corte se detecta una concentración superior al 20 % se refuerza la ventilación en la zona y se activa el procedimiento general, esto es, se desactivan todos los elementos no antideflagrantes y se realizan mediciones cada 5 minutos para comprobar la evolución de la concentración.
- Si en dichas mediciones adicionales en la rueda de corte se detecta una concentración superior al 45 % se procede a forzar la ventilación en dicha zona y el piloto informa para preparar la evacuación del túnel, además de desconectar todos los equipos no antideflagrantes como en el caso anterior. Si en una medida posterior, realizada a los 5 minutos, no se disminuye la concentración en la rueda de corte, se procede a la evacuación del túnel.
- En estas zonas se debe realizar la excavación humedeciendo el material del frente con agua o algún tipo de agente espumante, de forma que se evite la generación de chispas por rozamiento del material entre sí o contra la rueda de corte.
- En estas zonas, se establece la prohibición de que durante la fase de excavación ningún operario puede permanecer en la zona del escudo, todo el personal deberá estar ubicado por detrás del erector, en la zona del back-up.

*C. Procedimiento de trabajo en caso de avería en alguno de los detectores fijos asociados a la TBM.*

En el caso de que alguno de los sensores fijos estuviese averiado por algún motivo, se debe reforzar la vigilancia con los medidores portátiles mientras el dispositivo no esté reparado y correctamente calibrado (proceso que debe durar el menor tiempo posible). Para ello se establecen las siguientes medidas adicionales respecto al procedimiento general de trabajo:

- Se dispondrá de un medidor portátil en la posición del sensor averiado y otro medidor portátil en la zona de la rueda de corte, para medir la concentración de gases a través de la tolva de desescombro.
- Si alguno de estos detectores portátiles registra una concentración igual o superior al 4 % del L.I.E. se detienen las labores de producción y se procede a tomar lecturas cada 5 minutos para evaluar la tendencia de la concentración. En caso de que el nivel baje al 0 % se reanudan los trabajos; de lo contrario, si se alcanza el valor del 10 % se procede a activar de forma manual el procedimiento general, ya descrito en los puntos anteriores.
- Todas estas mediciones deben quedar registradas por escrito en las planillas diseñadas al efecto.

### **3. Presencia de gas en la ejecución de los túneles de Pajares**

#### **3.1. Valores de presencia de gas alcanzados**

La ejecución de los túneles de Pajares, dos tubos de 25 kilómetros de longitud con obras subterráneas complementarias, se ha dividido en 4 contratos. El lector interesado podrá encontrar una descripción de las obras en el número 3.460 de la Revista de Obras Públicas. En las cinco máquinas tuneladoras que realizan la excavación del macizo cantábrico se han detectado concentraciones de gases en el frente al atravesar formaciones del carbonífero y, sobre todo, en zonas de contacto entre formaciones pizarrosas y formaciones carbonatadas, donde se ha producido un atrapamiento o embolsamiento de gas migrado de las zonas productivas.

En todo caso, se relacionan a continuación (Tabla 2) aquellas formaciones donde se han registrado niveles de concentración de metano en cada uno de los tramos que componen las obras de los túneles de Pajares así como el valor máximo de dicha concentración.

Tabla 2.

Ubicación	Formación Geológica	Concentración Máxima (% L.I.E. GRISÚ)
<b>LOTE 1: La Pola de Gordón – Folledo (León)</b>		
Túnel Este	Grupo La Vid (Pizarras)	3,5 %
	San Emiliano (Pizarras)	15,0 %
	Ermita (Areniscas)	5,0 %
	Huergas (Pizarras)	10,0 %
Túnel Oeste	San Emiliano (Pizarras)	44,0 %
	Pastora (Conglomerados)	5,0 %
	Huergas (Pizarras)	27,0 %
<b>LOTE 2: Folledo – Viadangos (León)</b>		
Galería de acceso de Buiza	Grupo La Vid (Calizas)	28,0 %
	Grupo La Vid (Pizarras)	30,0 %
	San Emiliano (Pizarras)	29,0 %
Túnel Este	San Emiliano (Pizarras)	38,0 %
Túnel Oeste	San Emiliano (Pizarras)	20,0 %
<b>LOTE 3: Viadangos (León) – Telleo (Asturias)</b>		
Túnel Este	San Emiliano (Pizarras)	47,0 %
<b>LOTE 4: Viadangos (León) – Telleo (Asturias)</b>		
Túnel Oeste	San Emiliano (Pizarras)	29,0 %

### 3.2. Rendimientos en las formaciones con presencia de gas.

Las formaciones en las que se han detectado la presencia de gases deflagrantes han sido fundamentalmente formaciones pizarrosas del Carbonífero. A pesar de que las previsiones contempladas en los proyectos constructivos indicaban que dichas formaciones iban a plantear serios problemas de deformación plástica (squeezing) con graves riesgos de atrapamiento de las tuneladoras, lo cierto es que los rendimientos alcanzados en estos terrenos han sido generalmente muy buenos. De hecho, hay que señalar que los principales problemas para el avance en este tipo de material han venido originados por los propios sistemas de seguridad de las máquinas, pues la aparición de gas ha motivado continuas paradas de la producción de acuerdo a los procedimientos de trabajo descritos anteriormente. De esta manera, los rendimientos productivos han estado condicionados a la seguridad operativa de la excavación, garantizando en todo momento que las concentraciones de gas alcanzadas en los túneles no superasen los valores límite prefijados.

### 3.3. Conclusiones

Las elevadas prestaciones que se requieren a las nuevas infraestructuras de transporte terrestre, así como los avances tecnológicos existentes en el campo de la ingeniería civil, han propiciado la posibilidad de abordar la ejecución de túneles de base en los principales macizos montañosos europeos. Estas obras suponen un complejo reto técnico, logístico y financiero.

Uno de los aspectos menos conocidos en la ejecución de túneles de infraestructuras de transporte terrestre es la presencia de gases deflagrantes en el macizo a excavar. Los túneles de base, al atravesar los núcleos de los principales macizos montañosos con coberturas de hasta 1.000 metros (casos de Guadarrama y Pajares en España), tienen mayores posibilidades de encontrar formaciones susceptibles de alojar gases deflagrantes en el interior del macizo que en los casos más conocidos de túneles urbanos o periurbanos.

Las instalaciones y los elementos de seguridad descritos, así como los procedimientos de trabajo establecidos en los túneles han permitido la ejecución de los trabajos de excavación y revestimiento con anillos en atmósferas grisúas, con unas instalaciones muy complejas que no pueden ser dimensionadas en su totalidad con características antideflagrantes. Se ha primado la seguridad de los trabajadores frente a la producción, adoptando unos valores de referencia en las concentraciones de metano inferiores a los existentes en la normativa de referencia disponible en la actualidad en nuestro país.

No obstante, dada la problemática que genera la aparición de gases de naturaleza orgánica en las obras subterráneas, sería muy interesante desarrollar una normativa técnica y de seguridad específicamente aplicable en la ejecución de obras civiles subterráneas del transporte terrestre, ya que los medios y las instalaciones, así como la propia concepción de la excavación a realizar, difiere de manera notable en relación a las explotaciones mineras, actividades que contienen en su reglamentación básica la única normativa de referencia disponible en la actualidad en relación a este asunto. ♦

#### Referencias.

- Ministerio Fomento (2003). "Proyecto Básico de los Túneles de Pajares."
- Ministerio Fomento (2003). "Proyecto y obra de plataforma de la Línea de Alta Velocidad León-Asturias. Tramo: Túneles de Pajares. Lotes 1, 2, 3 y 4"