

# Ensayo de Humo Caliente Limpio. El ensayo de incendio para la verificación de la seguridad de los túneles

## Clean Hot Smoke Test. Fire test to check tunnel safety

**Jesús de la Quintana Pérez.** Ingeniero Superior Industrial  
*Responsable de Ingeniería de Seguridad Ante Incendio LABEIN. ja@labelin.es*  
**José Manuel Erauso Eizaguirre.** Ingeniero de Caminos Canales y Puertos  
*Departamento de Infraestructuras Viarias. Diputación Foral de Gipuzkoa.*

**Resumen:** La creciente sensibilidad social por la seguridad está impulsando el avance tecnológico en materias tales como la Ingeniería de Seguridad Ante Incendio, para dar así respuesta al incremento de la exigencia de los reglamentos de seguridad.

En el caso de los túneles esto se plasma en los sistemas de seguridad ante incendio, y en particular en el sistema de ventilación en caso de incendio, sistema clave para garantizar la evacuación de las personas. El avance en el grado de exigencia conlleva la necesidad de verificar la prestación de estos sistemas mediante ensayos reales.

Se presenta en este artículo una innovación tecnológica inédita en España, el "Ensayo de Humo Caliente Limpio de LABEIN®", ensayo que por primera vez permite verificar la seguridad ante incendio del túnel sin dañarlo, ni ensuciarlo, y sin obstaculizar el desarrollo de los trabajos en el túnel, o el tráfico en caso de túneles en servicio, dado lo reducido del tiempo de ensayo.

Como muestra de la validez y relevancia de dicho ensayo, se presenta el ensayo llevado a cabo por LABEIN en el túnel de Lezari de la autopista A-1 (Eibar-Vitoria) impulsado por la Diputación Foral de Gipuzkoa.

**Palabras Clave:** Ensayo, Humo, Caliente, Limpio, Simulación

**Abstract:** Technological progress in Fire Safety Engineering is being propelled by increasing public awareness regarding safety factors and the need to respond to ever more stringent safety regulations.

With regards to tunnels this response may be seen in fire safety systems and, particularly, the ventilation system in the case of fire. This being a key system to ensure safe evacuation in the case of fire and, here, the more stringent codes require that these systems be verified by real testing.

The present article presents the "LABEIN Clean Hot Smoke Test®", an innovative time-saving test which verifies the fire safety of a tunnel without damaging or dirtying the same and without impeding work in the tunnel or restricting traffic in the case of operative tunnels.

By way of example of the relevant and satisfactory performance of this test, the article refers to testing carried out by LABEIN in the Lezari tunnel on the A-1 motorway (Eibar-Vitcria) at the request of the Guipuzcoa local authority.

**Keywords:** Test, Smoke, Hot, Clean, Simulation

### La seguridad ante incendio en túneles

La Sociedad se muestra especialmente sensible a los temas relacionados con la seguridad en infraestructuras públicas o semipúblicas, y éste es el caso de la seguridad de los túneles ante incendios. Agravada por las recientes catástrofes que se han producido en túneles europeos, Mont Blanc, Tauern, San Gotardo,...

### El incendio en el túnel

Ante situaciones con incendio en el interior del túnel, la primera medida consiste en facilitar la evacuación de las personas más próximas al lugar del incendio a través de los itinerarios de evacuación existentes mediante el confinamiento de la nube de humos durante un tiempo suficiente que

permita mantener condiciones ambientales compatibles con la vida, para proceder a continuación a la extracción o en su caso, al barrido del humo, y facilitar así las labores de extinción.

Para atajar los efectos del humo, siendo importante el diseño del sistema de ventilación, lo es mucho más la definición de las Pautas de Actuación de dicho sistema en caso de incendio. Recibe el nombre de Pauta de Actuación, la estrategia secuencial de operación sobre el sistema de ventilación que responde y resuelve una determinada situación de incendio.

### Ensayos en túneles

Por las múltiples variables que influyen en él, es muy difícil conocer el comportamiento real de un escenario de incendio. El objetivo del ensayo de incendio en un túnel es la verificación de la Seguridad Ante Incendio, relativa al control de humos del túnel, mediante la realización de una prueba que permita validar las Pautas de Actuación del sistema de ventilación.

El hecho de realizar ensayos de incendio en túneles, bien sean túneles ya en servicio, o túneles de obra nueva, es una necesidad ineludible, ya que es la única manera de:

- Verificar de forma real las prestaciones del sistema de "Control de incendios" del túnel en las condiciones más próximas posibles a un incendio real".
- Validar el diseño del sistema de ventilación y sus pautas de actuación en caso de incendio.
- Formar a los equipos de seguridad, extinción y rescate.
- Mostrar a la sociedad una apuesta decidida por la seguridad de una infraestructura que despierta una sensibilidad especial en los usuarios.

### Ensayos en túneles en España

La ausencia de una normativa específica en España que regule la realización de ensayos en túneles para verificar su correcto diseño en caso de incendio, hace que los túneles sean, en muchos casos, puestos en servicio sin una prueba real y tangible de su correcto funcionamiento en materia de seguridad ante incendio.

Junto a este vacío reglamentario hay que añadir que, exceptuando el ensayo de humo caliente limpio, los ensayos que se han realizado hasta la fecha conllevan unos costes en protección de instalaciones, estructura y limpieza que los hace inviables; son destructivos y por tanto llevan implícito un coste en tiempo y dinero difícil de abordar.

Como alternativa al ensayo destructivo se encuentran los ensayos de humos limpios: el ensayo de humo caliente y el ensayo de humo frío.

### Ensayo de Humo Caliente versus ensayo de Humo Frío

El ensayo de humo caliente es el único capaz de representar las condiciones de humo equivalentes a las del incendio real, ya que en este caso la temperatura de los gases hace que se estratifiquen en el túnel debido a la diferencia de densidades entre dichos gases y el aire circundante.

La diferencia de temperaturas y concentraciones entre los humos calientes producto de la combustión, el aire contenido en el túnel y el aire frío exterior determinan el movimiento de los humos. La velocidad de movimiento de los humos considerando las variables anteriormente descritas, recibe el nombre de *velocidad crítica*.

Esta característica de los humos es esencial para poder representar los fenómenos más peligrosos para la vida que se producen en los incendios en túneles.

La difusión térmica y másica de los humos producidos en el incendio en el aire contenido en el túnel, puede llegar a producir el efecto conocido como "Back Layering", que es el retroceso de los humos en sentido contrario al de la velocidad dominante en el túnel [1][3].

El humo retrocede si la velocidad del aire impulsado por el sistema de ventilación es menor que la velocidad crítica. En estas condiciones el humo puede enfriarse y caer, lo que produciría la asfixia de personas que teóricamente estarían a salvo por encontrarse en una zona segura aguas arriba del incendio.

Otro efecto crítico que se produce en un incendio real es el incremento del "tiro natural" que produce la aceleración de la velocidad de movimiento del humo en el interior del túnel [1].

El factor clave en el control de los humos es por tanto su velocidad crítica ya que una vez conocida, actuando

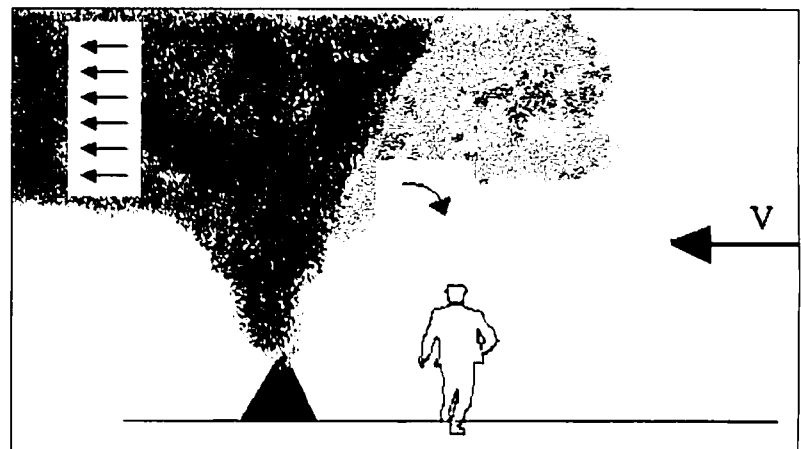


Fig. 1. Esquema del fenómeno de "Back-layering". Para una velocidad del aire inferior a la velocidad crítica, el humo caliente en el techo del túnel se difunde aguas arriba.



Foto 1. Ensayo en el Túnel P-11. Corredor del Txorierrri, Punta de incendio.

sobre el sistema de ventilación para conseguir una velocidad de aire adecuada, es posible conseguir que los humos se muevan con un sentido y velocidad determinados, o incluso que se detengan para facilitar la evacuación si la velocidad crítica es igual a la velocidad del aire limpio impulsado por el sistema de ventilación.

Por el contrario, el ensayo de humo frío, producido por botes de humo a temperatura de generación de 40°C, no podrá representar el fenómeno de "Back-Layering", o retroceso de la nube de humos por el efecto de la difusión térmica porque dicho humo no ascenderá ni se estratificará. Por ello ese ensayo no será válido en ningún caso para verificar las Pautas de Actuación ante incendio.

#### **El "Ensayo de Humo Caliente Limpio LBEIN®"**

El objetivo de este ensayo es generar un caudal de gases limpios a temperatura similar a los producidos en un incendio real, consiguiendo así su estratificación y verificando el comportamiento de dichos humos cuando se actúa sobre

el sistema de ventilación del túnel según la Pauta de Actuación prescrita.

Cumplido el objetivo principal, el ensayo persigue dos objetivos operativos diferenciadores:

- Rapidez: este ensayo se ejecuta en un tiempo muy reducido, 8 horas, permitiendo a su conclusión la inmediata continuidad del uso del túnel.
- Limpieza: no se produce deterioro ni suciedad alguna sobre la estructura e instalaciones del túnel, lo que posibilita su inmediata apertura al tráfico tras el ensayo.

El diseño del ensayo ha requerido complejas simulaciones numéricas, contrastadas con distintas pruebas reales de equipos prototipo; asimismo con el objeto de calibrar el equipo de ensayo ha sido preciso llevar a cabo una prueba real en un túnel, prueba que previamente se ha simulado mediante técnicas CFD (Computational Fluid Dynamics). Esta prueba se realizó en el falso túnel P-11 del corredor del Txorierrri en Vizcaya (ver Foto 1), a petición de la "Diputación Foral de Vizcaya".

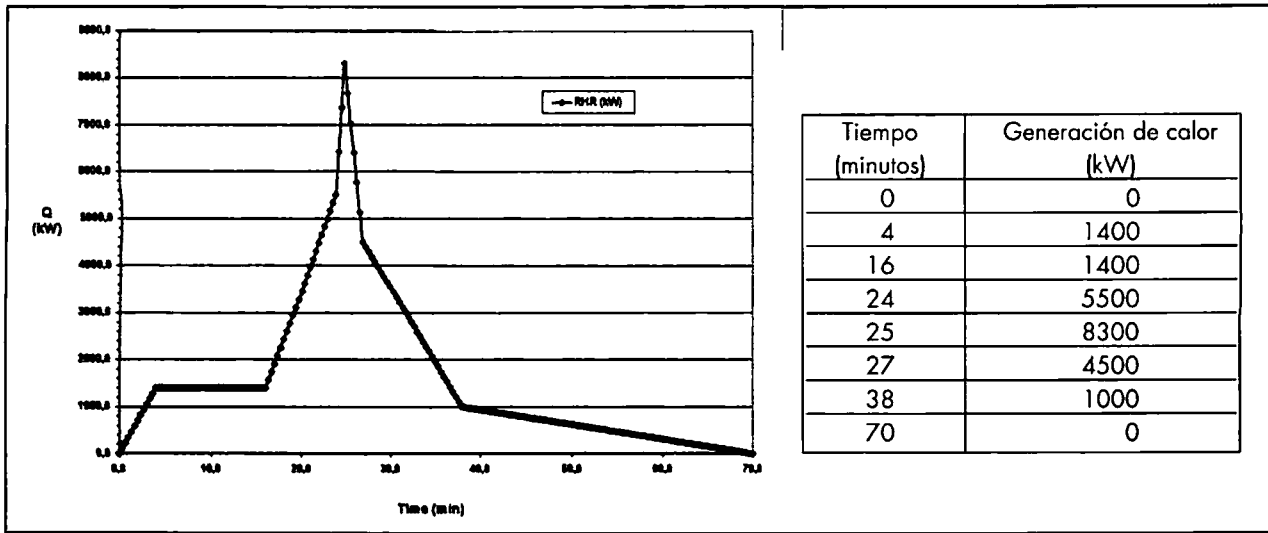


Fig. 2. Curva de generación de calor para un coche.

### Contenido del ensayo

El ensayo se basa en un equipo generador de humos calientes, y sus protocolos de desarrollo, calibración y utilización. El caudal de gases limpios e incoloros, a temperatura suficiente para provocar la estratificación, procede de la combustión de un combustible líquido. Estos gases son aumentados, controlados en temperatura y hechos visibles, mediante la utilización de humos trazadores, generando así un caudal total equivalente al incendio de un vehículo ligero.

La curva de incendio tipo de un coche según [ 4 ] es la representada en fig. 2.

Esta curva equivale al incendio de un coche con un poder calorífico de 7.000 Mj/l.

En el ensayo se genera un caudal de gases equivalente al producido en el incendio de un coche que alcanza, a 7 metros de altura, un flujo volumétrico aproximado de 20 m<sup>3</sup>/s durante 40 minutos, sobre una duración total del ensayo de 50 minutos. La potencia del incendio es de 2,2 MW (Energía equivalente a la puesta en juego en el incendio de un turismo durante 1 hora [4]).

El ensayo permitiría, si así se precisaran, potencias mayores en función de los objetivos de la verificación.

### El ensayo del túnel de Lezarri (Bergara) de la autopista A1

El día 30 de Octubre de 2003 tuvo lugar en el Túnel de Lezarri, de la autopista A1 Eibar-Vitoria, sito en Bergara (Guipúzcoa), un ensayo cuyo objetivo era la verificación de la Seguridad ante Incendio, relativa al control de humos, del citado túnel.

El presente ensayo ha sido impulsado por el Departamento de Infraestructuras Viarias de la Diputación Foral de

Gipuzkoa por su especial sensibilidad a la seguridad de los usuarios de los túneles de su adscripción, técnicos de este departamento coordinaron la definición y ejecución del mismo. Participaron también el Servicio Foral de Prevención, Extinción de Incendios y Salvamentos de la Diputación Foral de Gipuzkoa, la UTE Gallastegi, e Idom.

### Preliminares

El objetivo de las pautas de actuación es fijar las decisiones a tomar desde el centro de control para garantizar la evacuación de los usuarios durante un accidente en el interior del túnel.

La velocidad inicial de partida del ensayo es de 2,5 m/s, y se ha determinado tomando como base los estudios Intensidad Media Diaria (IMD) de tráfico, suministrados por la Diputación Foral de Gipuzkoa.

En el escenario de incendio se considera tráfico *bidireccional o congestionado*, situación excepcional en la que quedan usuarios atrapados a ambos lados del punto de incendio.

### Simulación CFD para el diseño del ensayo

El cálculo mediante CFD (Computational Fluid Dynamics) permite predecir el comportamiento y desarrollo del incendio que se quiere ensayar; para ello se estudian dos casos típicos:

- *Régimen estacionario* con el objetivo de determinar las protecciones necesarias de los elementos auxiliares instalados en el túnel (cable radiante, cable fibroláser, bandejas de cables, luminarias, altavoces, etc.). Este caso considera el desarrollo máximo del incendio y por tanto supone la situación más severa para los elementos antes citados.



Foto 2: Ensayo en el Túnel de Lezarri, Autopista A-1. "Back-layering" aguas arriba del punto de incendio.

- Régimen transitorio con el objetivo de estudiar el movimiento de los humos a lo largo del túnel (a ambos lados del punto de incendio) con diferentes velocidades del aire en el interior del mismo, permitirá verificar y ajustar tanto el ensayo como las pautas de actuación definidas.

En la simulación de CFD se han considerado las siguientes hipótesis.

- Potencia de incendio 2,5 MW, ligeramente superior a la del ensayo.
- Velocidad del aire dentro del túnel 1 m/s (velocidad mínima de acuerdo a la pauta)
- Temperatura ambiente en el interior del túnel 15 °C
- Caudal mínimo de aportación de humos trazadores. (Puede ser aumentado un 50 % permitiendo la disminución de la temperatura de los humos en 50 °C).

Estas hipótesis son conservadoras.

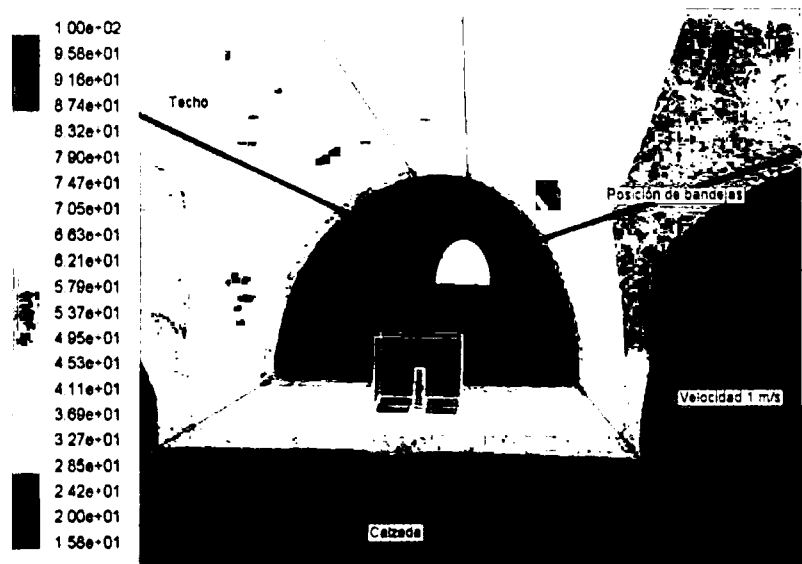
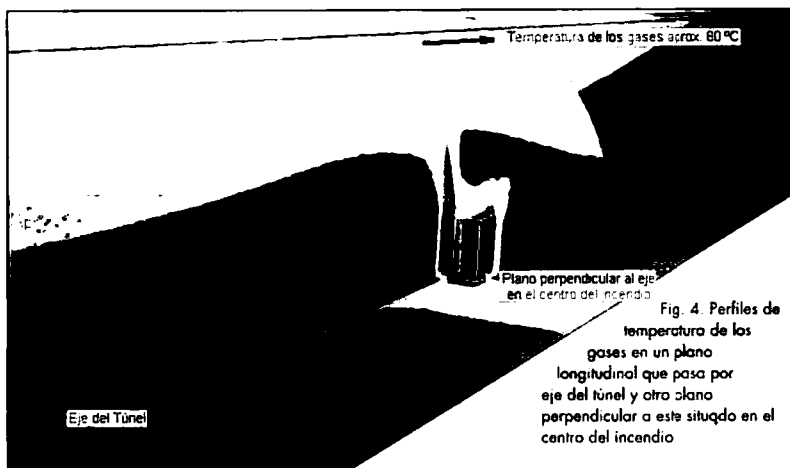


Fig. 3. Perfiles de temperatura [°C] en las paredes del túnel.



### Resultados de la simulación CFD

Temperatura máxima de gases en la proximidad del techo del túnel (punto mas crítico): 96°C.

En la zona de las bandejas de cables y luminarias la temperatura no supera los 54°C.

Longitud afectada por la temperatura límite para los cables de la clave del túnel, diferenciamos:

Cable radiante: Tª Limite 60°C = -12 m / + 5 m

Cable fibroláser: Tª Limite 45°C = -10 m / + 5 m

Considerando los resultados anteriores y las características de los materiales, y equipos presentes en el túnel se recomendó únicamente la protección del cable radiante en una longitud de -13 m y + 6 m, y del cable fibroláser en -11 m y + 6 m respecto del punto de incendio, con un material de las características siguientes:

Reacción a fuego M0

Temperatura máxima de trabajo: 200 °C

Conductividad  $\lambda = 0,042 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$

### Exposición general

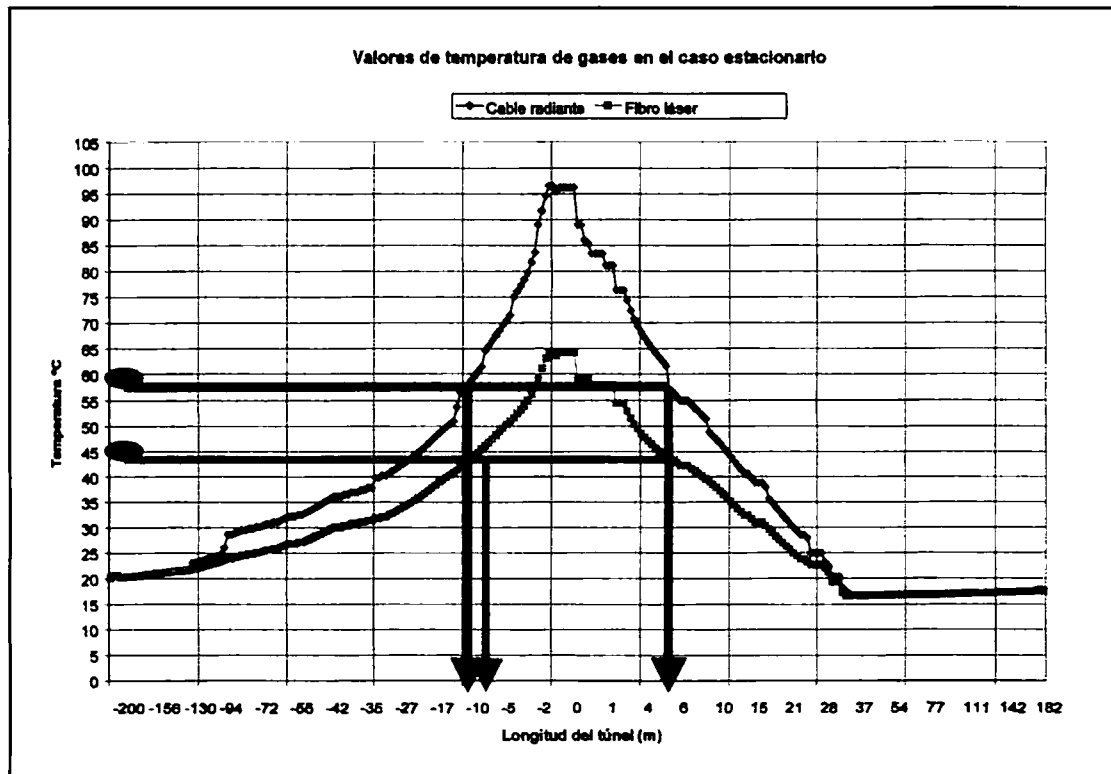
El túnel de Lezarri tiene una longitud de 1.253 m, se encuentra cercano a la localidad de Bergara en Guipúzcoa en la futura autopista A1 Eibar- Vitoria.

Consta de dos tubos gemelos unidireccionales, unidos por cinco galerías transversales de servicio (ver Fig. 6).

Dispone de un sistema de ventilación longitudinal con diez ventiladores en cada tubo, que se instalan en parejas. Los ventiladores extremos están situados a 100 m de las bocas, y hay una distancia de 85 m entre grupos adyacentes.

Al tratarse de un sistema de ventilación longitudinal, una vez detectado el incendio, la Pauta de Actuación pretende, en un primer momento, conseguir estabilizar el hu-

Fig. 5. Temperatura de los gases en las cotas correspondientes a cable radiante y fibroláser en un plano longitudinal que pasa por el eje del túnel, y contraste con las temperaturas límite.



mo estratificándolo a suficiente altura como para no poner en peligro la evacuación de las personas involucradas en el accidente, para ello se pretende lograr una velocidad aproximada a 1,5 m/s.

Posteriormente, cuando dicha evacuación ya se haya completado, se actuará sobre el sistema de ventilación para barrer el humo y favorecer así la actuación de los bomberos.

El punto de incendio se sitúa en el tubo izquierdo del túnel, sentido Eibar-Bergara, en el punto PK 1+340 (aproximadamente en la mitad del túnel).

Las secciones de control tomadas respecto al punto de incendio, son las siguientes: S1(-100m), S2 (-50m), S3 (+50m), S4 (+100m).

En cada sección de control se encuentran los necesarios equipos para las mediciones de velocidad de aire y temperatura, así como cámaras de registro de vídeo.

### Secuencia del ensayo

Los hitos más significativos de la secuencia completa del ensayo del Túnel de Lezarri son:

- Se parte de velocidad inicial según los criterios ya mencionados:
  - Tubo de incendio: 2,5 m/s en sentido del tráfico Eibar – Bergara
  - Tubo adyacente: 2,5 m/s en sentido del tráfico Bergara – Eibar
- Tiempo de detección del incendio: 1 minuto
- Velocidad del aire durante la evacuación: inferior a 1,5 m/s
- Tiempo de evacuación: 5 minutos a partir de la detección del incendio
- Velocidad de barrido: superior a 3,5 m/s

### Resultados del ensayo de humo caliente limpio del túnel de Lezarri

Al comienzo del ensayo, la velocidad del aire era de 2,3 m/s. Durante los primeros minutos el humo se desplaza con mayor velocidad en el mismo sentido del movimiento del aire en el túnel.

A partir del minuto 1, comienza la actuación sobre el sistema de ventilación y la velocidad del aire disminuye hasta alcanzar aproximadamente 0 m/s una vez transcurridos 3,5 minutos desde el comienzo del ensayo.

Se comprueba que durante los 5 minutos necesarios para la evacuación, la nube de humo se mantiene estratificada a una altura superior a 4 metros permitiendo la evacuación de los usuarios atrapados en el túnel.

Durante el tiempo previsto para la evacuación, el humo que retrocedió por efecto de Back-layering (hasta

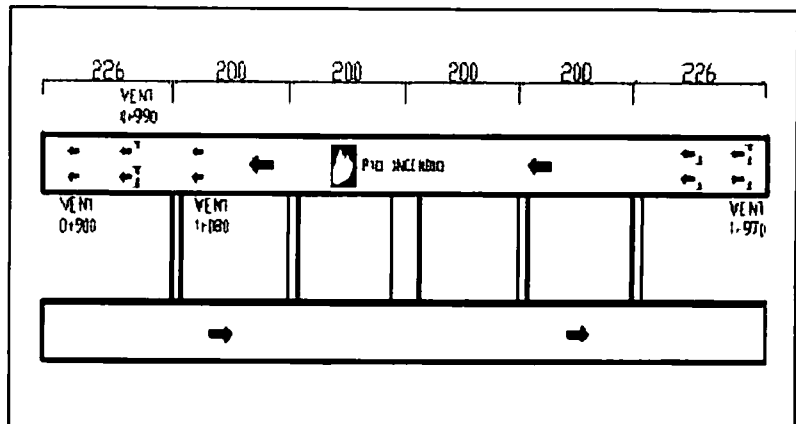


Fig. 6. Disposición esquemática del Ensayo Túnel Lezarri.

-200 metros del punto de incendio) mantuvo su estratificación, mientras que el humo que se desplazó en el sentido de la ventilación (hasta +310 metros) perdió su estratificación en los últimos 10 metros durante el último minuto de la evacuación. A pesar de ello, se considera que no existe riesgo para la evacuación pues a ambos lados del punto de incendio el humo está estratificado permitiendo el escape del túnel por las galerías de evacuación dispuestas a tal efecto.

El ensayo ha permitido correlar el modelo numérico de la simulación CFD, permitiendo a partir de aquí realizar nuevas simulaciones de incendios con mayores potencias de incendio.

### Conclusiones

Cada túnel posee características constructivas particulares como son: trazado, pendiente entre bocas y pendiente interior, acabado y rugosidad, dimensiones y posicionamiento de paneles señalizadores, instalaciones, etc....

Esta amplia gama de particularidades constructivas provoca que las características aerodinámicas varíen para cada túnel, lo que hace muy difícil su incorporación en los modelos de cálculo de los sistemas de ventilación y de sus pautas de actuación.

Fig. 7. Disposición del Ensayo.

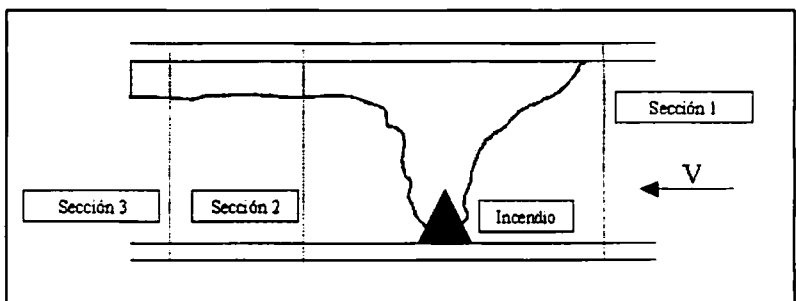
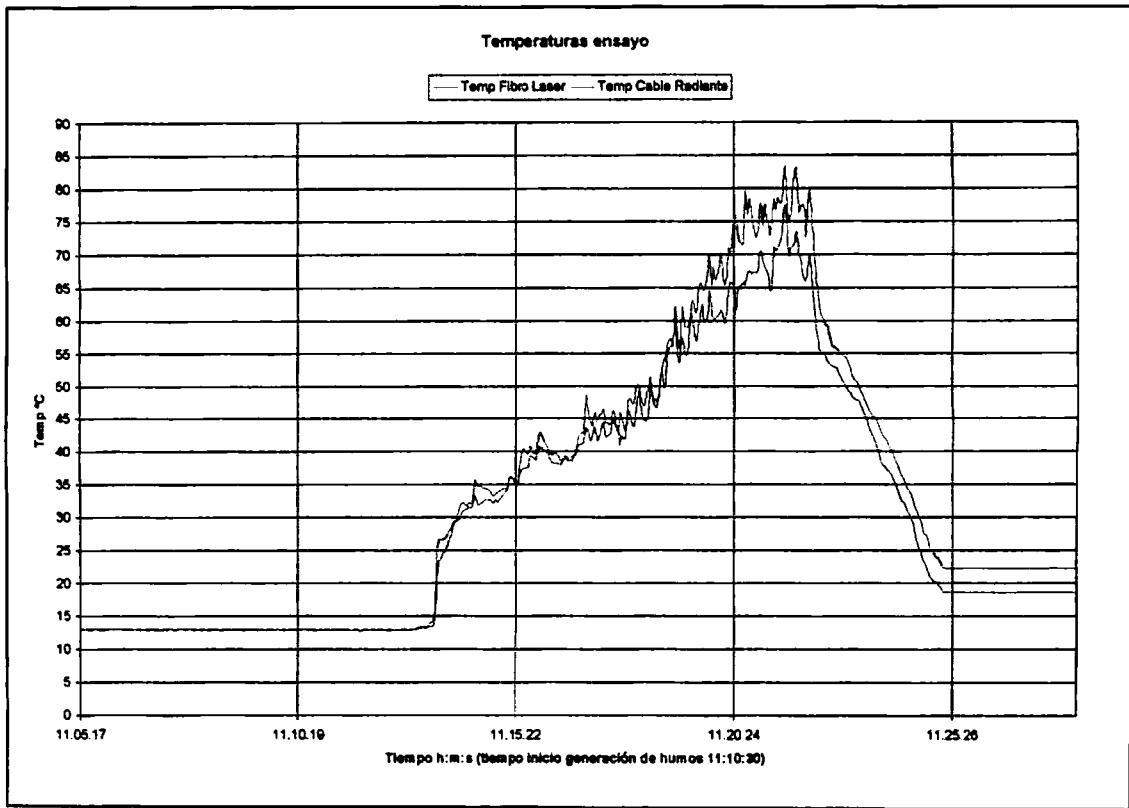


Fig.8. Variación de la temperatura con el tiempo en el cable radiante y en el fibroláser.



El método de trabajo permite realizar un análisis completo de la seguridad ante incendio del túnel correlando un modelo numérico de simulación con un ensayo de potencia suficiente para verificar el comportamiento del sistema de ventilación, para posteriormente simular con garantías potencias superiores.

El ensayo realizado es representativo de un incendio real y cumple los objetivos de limpieza y ausencia de daño en toda la zona donde ha tenido lugar el ensayo.

El ensayo ha permitido validar la seguridad ante incendio del túnel de Lezari verificando que se produce la evacuación segura de los usuarios y la intervención de los bomberos en condiciones adecuadas.

El ensayo ha permitido rediseñar la pauta de actuación modificando los siguientes aspectos:

- Desconexión de 2 ventiladores para lograr velocidad inferior a 1,5 m/s.
- Tras realizar el primer barrido de humos, situados aguas arriba del incendio debido al "back-layering", a la máxima velocidad, se recomienda reducir la velocidad de barrido al mínimo valor posible pero sin que se produzca de nuevo back-layering. Esta velocidad límite inferior depende de la potencia del incendio y de la geometría del túnel. Para un turismo en este túnel, es aproximadamente 2,5 m/s. En estas con-

diciones, el ensayo ha demostrado que la estratificación aguas abajo del incendio en proceso de barrido, mejora sensiblemente.

Confiamos en la importante aportación del "Ensayo de Humo Caliente Limpio de LABELIN®" a la cada vez más demandada comprobación de la seguridad diseñada en las infraestructuras y edificios, para poder así afirmar con garantías el cumplimiento del objetivo de la seguridad ante incendio que citábamos al comienzo de este artículo. ♦

#### Referencias

1. Atkinson Granham Wu, Y., "Smoke Control in Sloping Tunnels", Fire Safety Journal, 27, 1996.
2. Bear, Alan N., "A Model for Predicting Fire Spread in Tunnels". Fire Sciences Vol. 15 July/August 1997.
3. Del Rey, Ignacio "Control de humos y gases en caso de incendio en túneles" Escuela Nacional de protección civil. Ministerio del interior. España.
4. "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks" Report EUR 18867 European Commission 1999
5. Oka, Yasuki and Atkinson, Graham T. "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires". Fire Safety Journal 25. 305-322 (1995)
6. Wu Y., Bakar M. Z. A., "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using longitudinal Ventilation System - A Study of the Critical Velocity", Fire Safety Journal, 35, 2000.