

INTERACCIÓN DEL AGUA NEBULIZADA EN MODELOS INTEGRALES DE EVACUACIÓN DE PERSONAS EN TÚNELES CARRETEROS

Jesús de la Quintana

Seguridad Ante Incendio

Labein-Tecnalia Construcción

José Manuel Erauso

Departamento de Infraestructuras Viarias

Diputación Foral de Gipuzkoa

Resumen

Los accidentes de tráfico y subsiguientes incendios ocurridos en la última década en los túneles carreteros han incrementado la sensibilidad social por la seguridad y han impulsado el avance tecnológico, los sistemas de protección contra incendio, y el desarrollo del conocimiento sobre el control de sistemas de ventilación, para poder garantizar una evacuación segura de los usuarios del túnel.

La tecnología del agua nebulizada es un sistema efectivo para la supresión del incendio, de reciente aplicación en túneles. No obstante, ensayos realizados en proyectos europeos, han mostrado ciertas incertidumbres, debido a las carencias en el diseño de escenarios para la caracterización del sistema de agua nebulizada en túneles y en el ajuste de los sistemas de detección.

Por ello, resulta imprescindible construir modelos matemáticos que caractericen el comportamiento del sistema de agua nebulizada, basados en información procedente de ensayos a escala real realizados en túneles por los fabricantes.

Para poder acometer el diseño basado en prestaciones de los modelos, será necesario hacer uso de herramientas CFD (fluido-dinámica computacional), con el fin de poder integrar el sistema de agua nebulizada.

La activación de un sistema de supresión de incendios, como resulta ser el sistema de agua nebulizada o el sistema de ventilación e incluso la combinación de ambos, modificará las condiciones ambientales en el interior del túnel. Por ello, resulta totalmente necesario verificar que la evacuación de las personas se produce de manera segura, calculando los efectos térmicos y no-térmicos del incendio durante todo el desarrollo del mismo.

Como resultado, se podrá optimizar el sistema de agua nebulizada, sin la necesidad de realizar un ensayo a escala real para cada túnel, y se calculará la evacuación de los usuarios del túnel, introduciendo en el modelo virtual, tanto los efectos del incendio como la distribución de personas basado en los datos del tráfico del túnel.

2. Antecedentes

Ante una incidencia con incendio en un túnel, la forma de abordar la emergencia ha ido evolucionando conforme han aparecido y se han incorporado sistemas capaces de aminorar los daños sobre las personas y sobre la infraestructura.

En la actualidad, uno de los medios más comunes es el uso de un sistema combinado de detección y ventilación. Este sistema permite actuar garantizando unas determinadas condiciones para asegurar la evacuación segura de las personas y unas mínimas condiciones de operación de los equipos de extinción y rescate.

A ellos se les esta añadiendo recientemente otro sistema novedoso que actualmente se encuentra en pleno desarrollo: es el sistema de agua nebulizada, un sistema de supresión del fuego mediante el uso de gotas micrométricas de agua generadas a alta presión. Este sistema presenta grandes ventajas.

La seguridad, en caso de incendio, en los túneles carreteros, se encuentra genéricamente fundamentada en el establecimiento y garantía de una correcta sistemática preventiva de los hechos, sus probabilidades y sus consecuencias.

Se deben considerar técnicamente los riesgos a los que se exponen las personas que transitan por un túnel en su recorrido por las vías de comunicación para el tráfico rodado en los diferentes escenarios y casos posibles, de manera que, cuantificando esos riesgos, se pueda llevar a cabo un diseño eficaz de las medidas mas apropiadas para limitar y paliar los efectos del incendio, y garantizar la supervivencia de las personas afectadas.

Esto se debe complementar adecuadamente con la atención a otras personas relacionadas con la infraestructura que se ven asimismo afectadas por la emergencia antes citada; estos son los operadores de los túneles y los servicios de extinción y rescate.

En todos los casos, el objetivo clave es el mantenimiento de unas condiciones ambientales compatibles con la vida de dichas personas, al menos durante el tiempo en que se encuentran dentro del túnel, facilitando el que este tiempo sea el menor posible a través de medios y vías que les permitan alcanzar el espacio exterior seguro.

Dichas condiciones compatibles con la vida abarcan aspectos tales como el mantenimiento de unos valores aceptables de temperatura y radiación en el recinto estudiado, valores límites aceptables de toxicidad de gases producto de la combustión, y valores de la visibilidad para el escape.

Los servicios de extinción y rescate contribuyen a la seguridad de los usuarios, si se cumple otro objetivo, que se convierte así en complementario del primero, que es el facilitar a dichos equipos las mejores condiciones operativas posibles y el máximo acceso al área siniestrada.

Considerados los objetivos antes citados, se puede encuadrar la evacuación como la característica esencial para la seguridad en caso de incendio. Diremos que la evacuación precisa del adecuado dimensionamiento de sistemas y medios de seguridad que respondan ante este caso.

Entre ellas, las más significativas son:

- Sistemas de control, para conocer la evolución a lo largo del incendio de los parámetros de control de la emergencia y realimentar así las pautas de actuación (anemómetros, controles de aforo, detectores de gases...).
- Sistemas de detección (equipos puntuales como los detectores de gases, de opacidad, o continuos como los cables detectores de incendio).
- Sistemas de ventilación, que se diseñan con el fin de responder a las anteriores demandas (ventilación natural, o los múltiples tipos de ventilación forzada).
- Sistemas de supresión activos.

Todos ellos precisan de criterios e hipótesis de diseño firmemente sustentados en el conocimiento de la situación de incendio y sus características; de este modo, se puede asegurar el correcto dimensionamiento de los equipos y sistemas de forma que sus prestaciones garanticen la seguridad de los usuarios.

Tan importante como el diseño del sistema físico es el diseño de los algoritmos y pautas de actuación que tengan en cuenta las características propias del túnel en estudio. Para ello la metodología de diseño basado en prestaciones mediante métodos avanzados fluidodinámicos es básica para poder hacerlo y determinar pautas de actuación que puedan implementar con garantía la operativa de emergencia.

Actuando de este modo, sin embargo, se recorre tan solo una parte del camino; pues, además de asegurar un correcto proceso de diseño, es preciso contar con un proceso de validación real que permita reducir el nivel de incertidumbre en el que en ocasiones se encuentra el proyecto y ejecución de los sistemas de seguridad en el caso de incendio.

3. Necesidad de un sistema de supresión en túneles

Una emergencia de incendio en un túnel implica la ignición de una carga combustible por los medios o causas que sean: fallo eléctrico o mecánico, colisión,...; la evolución del incendio y su propagación a cargas de fuego vecinas, y la detección del incendio por los medios dispuestos en el túnel. Esta detección provoca el inicio del protocolo de emergencia, y entre sus acciones es seguro que se pondrá en marcha la estrategia de ventilación adecuada prevista.

A partir de aquí, en caso de no disponer de un sistema de supresión, el fuego evolucionaría sin medios que impidan o aminoren su desarrollo, propagándose y generando humos y gases, y efectos térmicos sobre la infraestructura y las personas. Dependiendo de la disposición de cargas de fuego, el incendio puede llegar a una magnitud incontrolable en un tiempo reducido; casos referenciados hablan del orden de los 18 minutos para, por ejemplo, el túnel de San Gotardo.



Figura 1: Incendio catastrófico en un túnel carretero

Es en este instante cuando, por el contrario, si se dispusiera de un sistema de supresión, se limitaría drásticamente la evolución del incendio eliminando su propa-

gación, reduciendo los efectos térmicos, y cortando la fuente de los efluentes. Asimismo, algunos efectos deben ser tenidos en cuenta, tales como la desestratificación de los humos, y la afección a la visibilidad de la propia niebla del agua nebulizada. Con todo, se logra mantener la emergencia bajo control y se dispone de un escenario de operación segura para los bomberos.

Parece pues recomendable disponer de un sistema que permita controlar el incendio y favorecer las condiciones de seguridad para las personas afectadas. Sin embargo, es preciso conocer en detalle las características, propiedades y modos de funcionamiento de este novedoso sistema con el fin de que su empleo se mantenga dentro de una estrategia integrada con el resto de los medios y sistemas de seguridad del túnel, ya que de no hacerlo así, puede incluso resultar contraproducente.

Actualmente, no se dispone de modelos fluidodinámicos robustos y fiables capaces de integrar de forma adecuada el agua nebulizada en el conjunto de los sistemas ya existentes, por lo que esos modelos deben generarse y calibrarse a través de datos experimentales provenientes de ensayos.

Los fabricantes de agua nebulizada disponen de ensayos de los cuales han extrapolado criterios básicos no suficientes para diseñar un sistema que integre adecuadamente el agua nebulizada con el resto de los sistemas. Para que un modelo de ecuaciones de agua nebulizada sea válido, éste debe proporcionar información del tipo de distribución estadística de tamaños de gota (diámetro medio, desviaciones...) y velocidades de salida de las gotas de agua. De esta manera, se podrán conocer la capacidad de enfriamiento, acceso a la base de las llamas, etc. Y finalmente conseguir la simulación del comportamiento final del sistema de la manera más realista posible.

4. Sistemas de supresión basados en agua

Las propiedades de estos sistemas son tales que a través de la limitación de la propagación, la reducción de la generación de calor, y la limpieza de los humos, pretenden mejorar las condiciones de evacuación de las personas y la operación segura de los bomberos.

Mecanismos físicos, químicos y termodinámicos:

Revisando punto por punto los ámbitos de actuación anteriores diremos que la limitación de la propagación se plantea desde tres frentes:

- la reducción de la temperatura de los gases, fenómeno convectivo dependiente de la superficie expuesta al intercambio gas-agua, y de la velocidad de las gotas.
- la reducción del flujo radiante de las llamas, fenómeno radiante dependiente de la posición y geometría de las gotas y de la superficie expuesta.
- la reducción de la inflamabilidad del elemento combustible a través de la generación de una densa niebla que envuelve el punto de incendio enfriando y empapando las superficies.

Por otro lado la reducción de la generación de calor se aborda bien reduciendo la temperatura de los reactivos, o reduciendo su masa, o ambos; en este último caso por desplazamiento del oxígeno al evaporarse el agua.

Los criterios de efectividad que se persiguen son el lograr penetrar en la base de las llamas a través del incremento de la cantidad de movimiento, fundamentalmente a través de la alta velocidad con la que se impele a las gotas, y asimismo del incremento de la tasa de evaporación mediante la reducción del diámetro de gota, que se logra por el diseño de la boquilla y por la elevación de la presión.

Finalmente, la limpieza de los efluentes se aborda diferenciando la limpieza de partículas, que se logra al mojar dichas partículas, se incrementa su peso y resultan arrastradas al suelo, y por otro lado la limpieza de gases tóxicos, para lo que se estima la solubilidad del gas en agua, aspecto este dependiente del tipo de gas, de la presión, de la temperatura, y de la superficie de contacto gas-agua.

Parámetros del sistema:

Los parámetros clave que intervienen en el diseño del sistema son:

- Tamaño de gota, considerando que para el mismo volumen de agua, si el radio de las gotas es “n” veces menor, la superficie total de contacto resulta “n” veces mayor, pretendemos que dicho tamaño de gota sea lo menor posible.
- Velocidad de gota, con objeto de incrementar la cantidad de movimiento de las moléculas de agua y poder penetrar en el interior de la llama y favorecer la reducción de la temperatura de los gases.

5. Descripción del sistema global contra incendio incluyendo supresión

Se trata de una red de boquillas, habitualmente abiertas, distribuidas en zonas longitudinalmente al túnel, y se prevé la activación de un número adecuado de zonas dependiendo de la localización y características del incendio.



Figura 2: Boquilla de agua nebulizada en descarga

Es fundamental disponer de un sistema de detección rápido y preciso que sea capaz de localizar inequívocamente el punto de incendio, y que lo haga con celeridad, con el fin de que la generación de calor sea pequeña, y el incendio sea cogido a tiempo y suprimido.

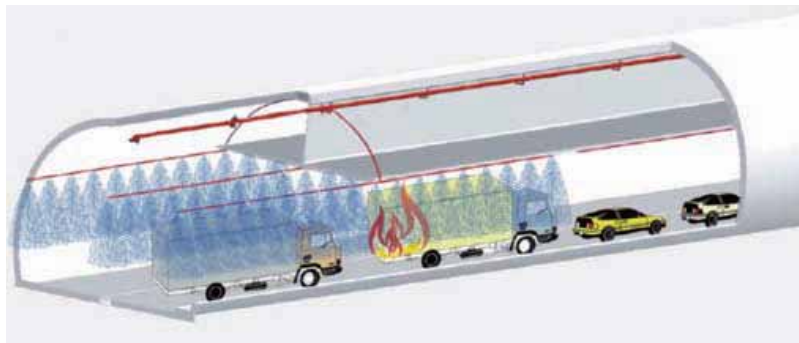


Figura 3: Esquema de zona de agua nebulizada activa en túnel

Asimismo, es clave establecer las adecuadas estrategias de ventilación, por un lado para asegurar unas condiciones adecuadas de autoevacuación, y por otro para mantener las condiciones óptimas de actuación del agua nebulizada e incrementar así su rendimiento.



Figura 4: Sistema de ventilación longitudinal en un túnel

6. Objetivo del planteamiento

Sea cual sea el sistema de supresión considerado, su adecuada integración en las estrategias de emergencia del túnel, que tienen en cuenta el resto de sistemas y medidas, es una cuestión clave para garantizar la evacuación de las personas y condiciones operativas seguras para los equipos de extinción y rescate.

Hoy en día esas estrategias, implicando a los sistemas habituales de detección y ventilación, se definen a través del análisis de riesgo, el diseño de escenarios de incendio, y finalmente el cálculo de la evolución del incendio y sus efectos por análisis fluidodinámico; esto se hace de este modo, dado que se dispone de modelos calibrados del comportamiento de los efectos del incendio, y de la interacción de los sistemas de ventilación.



Figura 5: Simulación CFD en túneles. Distribución del humo.

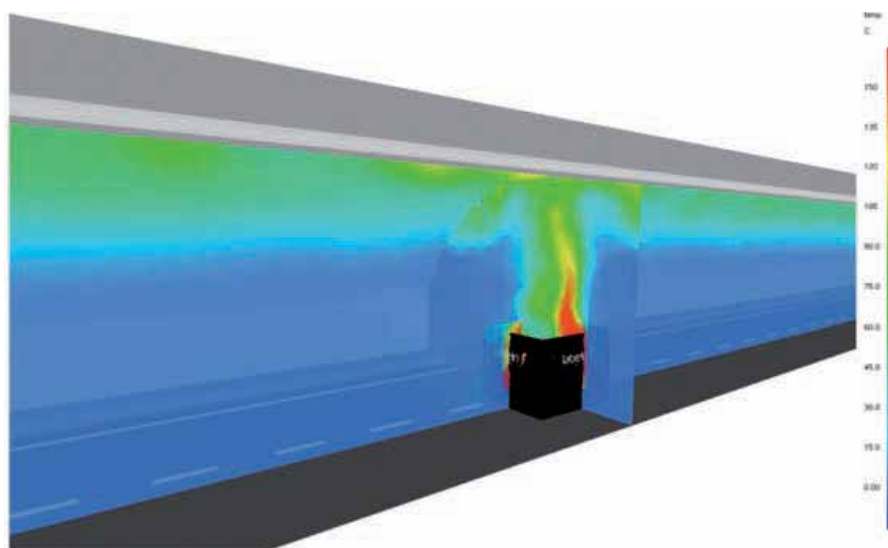


Figura 6: Simulación CFD en túneles. Perfil de temperaturas

Por tanto, es preciso disponer de modelos matemáticos robustos y fiables que representen el sistema de supresión con el objeto de llevar a cabo un verdadero análisis integral fluidodinámico de todos los sistemas que permitan diseñar estrategias seguras, combinando y sincronizando dichos sistemas de manera adecuada, calculando los efectos de su función sobre los objetivos de seguridad.

7. Metodología de trabajo

Pretendemos abordar un diseño y validación de la seguridad basados en prestaciones; para ello consideramos las características del túnel (geometría, tráfico, condiciones atmosféricas, sistemas y equipos,...), las del fuego (clase, potencia, curva de generación de calor,...), y las de las personas (usuarios, operadores, bomberos). De aquí se determinan a través de un análisis basado en prestaciones las estrategias de emergencia.

Se emplean distintos tipos de modelos para resolver la interacción de los sistemas en cada escenario: modelos de zona, y modelos fluidodinámicos. Estos últimos por permitir todo tipo de geometrías, poder usar variables locales específicas, incluso definidas por el usuario, y obtener resultados con una mayor precisión, son los más adecuados.

En el caso concreto del sistema de agua nebulizada tratamos de modelizar los parámetros clave: geometría de la boquilla, factor K, presión, distribución estadística del tamaño de gota, y las velocidades de gota. Para ello debemos apoyarnos en ensayos reales en los que se hayan monitorizado algunas variables de contraste.

Finalmente, es preciso que el modelo represente de manera realista la evolución del incendio y sus efectos antes, durante y tras la activación del sistema de agua nebulizada. Los parámetros clave del modelo matemático serán: la calidad de mallado, la precisión en el modelo de interacción fuego-agua, y los modelos de turbulencia.

Para la validación del modelo consideraremos como entradas las condiciones de ventilación, y el fuego de cálculo, y como salidas obtendremos y ajustaremos el flujo volumétrico de agua, las concentraciones de gases, las temperaturas y el comportamiento de los humos. Será preciso, dentro de lo posible, calibrar los modelos con los valores obtenidos en las mediciones de los ensayos reales.

8. Resultados obtenidos

A pesar de los escasos datos disponibles de los ensayos reales de estos sistemas ha sido posible extraer algunas conclusiones de los análisis realizados:

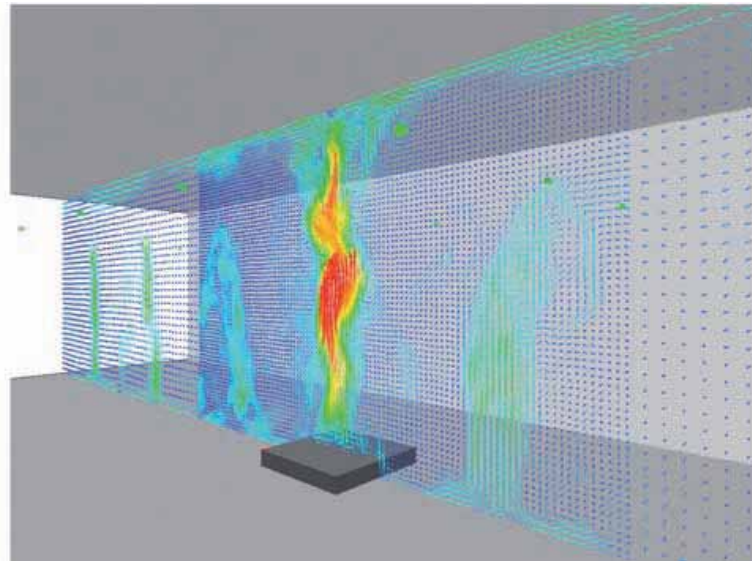


Figura 7: Velocidad del flujo de aire en las cercanías del punto de incendio

El sistema de supresión debe ser diseñado correctamente para posibilitar que las gotas de agua lleguen a la base de las llamas remontando el efecto cinético de la pluma del incendio. Asimismo, las condiciones de ventilación deben ser estrictamente controladas para optimizar las prestaciones del sistema.

Tras la activación del sistema de A.N., las temperaturas alrededor del punto de incendio decrecen drásticamente y la capa de humo se desestratifica en las zonas activadas.

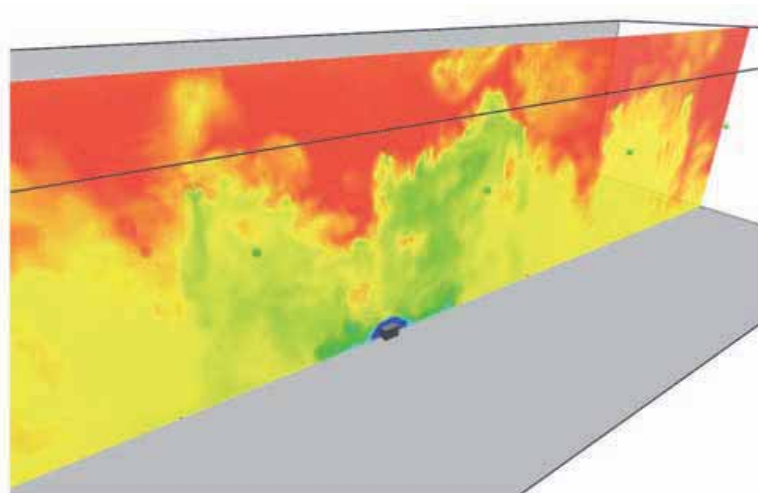


Figura 8: Concentraciones de oxígeno con el sistema de a.n. activado

Debido a las condiciones generadas por el agua nebulizada, y a la ventilación, las temperaturas y las concentraciones de gas aguas arriba son muy pequeñas.

9. Análisis de las condiciones de evacuación en túneles

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.

Cuando en un túnel concurre un sistema de extinción, se debe considerar el efecto de dicho sistema sobre el desarrollo del incendio y evaluar las consecuencias que la interacción de uno sobre otro tienen en las condiciones ambientales.

Un sistema tan particular como el agua nebulizada representa una alta incidencia sobre las condiciones ambientales, en términos de efectos térmicos y no térmicos, como visibilidad y toxicidad, lo que supone la necesidad de estudiar modelos integrados de evacuación en los que se consideren aspectos de comportamiento humano en situación de emergencia, junto con configuración geométrica, y sobre todo condiciones físicas transitorias.

Estas condiciones físicas provienen del calculo fluidodinámico que hayamos realizado al integrar el sistema de agua nebulizada en los modelos numéricos del incendio, como hemos visto anteriormente, De ahí provienen las condiciones ambientales en que se desenvolverán las personas en la evacuación.

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.

Por las múltiples variables que influyen en él, es muy difícil conocer el comportamiento real de un escenario de incendio, por lo que el adecuado balance entre simulaciones y ensayos es deseable, tal y como propone el real decreto.

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.

9.1. El “Ensayo de Humo Caliente Limpio LABEIN TECNALIA®”

El objetivo de este ensayo es generar un caudal de gases limpios a temperatura similar al producido 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 de LABEIN logra 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.



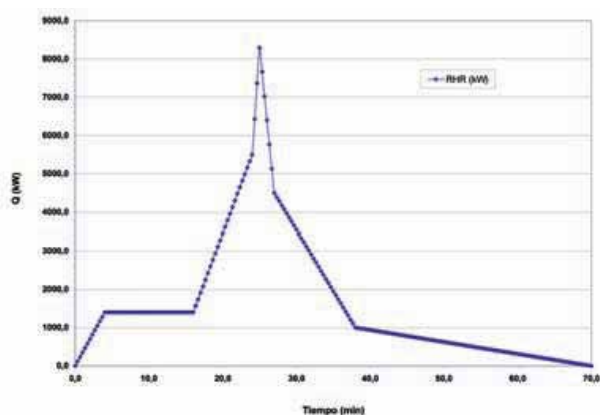
Figura 9: EHCL LABEIN TECNALIA®

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 tem-

peratura 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 es:



Tiempo (minutos)	Generación de calor (kW)
0	0
4	1400
16	1400
24	5500
25	8300
27	4500
38	1000
70	0

Figura 10: Curva de generación de calor para un coche

Esta curva equivale al incendio de un coche con un poder calorífico de 7000 MJ.

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 40 m³/s durante 18 minutos, sobre una duración total del ensayo de 40 minutos. La potencia del incendio es de 6 MW (Energía equivalente a la puesta en juego en el incendio de un turismo durante 1 hora).

10. Conclusiones

- Con el fin de proporcionar las adecuadas y precisas pautas de actuación para un sistema integrado de agua nebulizada, es preciso analizar técnicamente con modelos fluidodinámicos la interacción entre el agua nebulizada, el resto de sistemas y el fuego.
- Dichos modelos numéricos son perfectamente adecuados para el diseño de las estrategias de seguridad en emergencia.
- Y lo más importante, es preciso disponer de datos experimentales provenientes de ensayos reales de incendio para poder correlar dichos modelos, demostrar la eficacia del agua nebulizada y consiguientemente incrementar la confianza en su utilización.
- El análisis integrado de evacuación debe considerar los efectos del incendio provenientes de los modelos de cálculo fluidodinámico, en estos modelos

es en lo que se pretende contener también los efectos del agua nebulizada dada la importancia de esta en la supresión del incendio y en las condiciones ambientales que son parte del entorno para la evacuación.

11. Agradecimientos

Labein - Tecnalía, desea agradecer la confianza y el apoyo proporcionados por:

- El Departamento de Infraestructuras Viarias de la Diputación Foral de Gipuzkoa.
- SVS
- Aquasys

12. Referencias bibliográficas

- A REVIEW OF WATER MIST FIRE SUPPRESSION SYSTEMS, B. YAO, W.K. CHOW, J. APPLIED FIRE SCIENCE, Vol. 10 (3) 277-294, 2000-2001
- FIRE SAFETY CONCEPT FOR TUNNEL, Dublín, May 2004
- FIRE PROTECTION SYSTEMS FOR TRAFFIC TUNNELS UNDER TEST, R. MAEGERLE, 12th INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATIC FIRE DETECTION, March 2001
- ENSAYOS DE AGUA NEBULIZADA PARA EL TÚNEL DE LA A86 ESTE, X. GUIGAS, A. WEATHERILL, C. BOUTELOUP, V. WETZIG, CRITERIOS E INNOVACIONES EN SEGURIDAD DE TÚNELES, Junio 2005
- CHARACTERIZATION OF A HIGH-PRESSURE MULTI-JET WATER MIST NOZZLE FOR THE PURPOSES OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODELING, J. TRELLES, J.R. MAWHINNEY, P.J. DINENNO, LOS MODELOS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL EN LA INGENIERÍA Y LA INVESTIGACIÓN DE INCENDIOS, Santander, España, octubre 2004
- ESTUDIOS AVANZADOS EN LA PROPAGACIÓN DE FUEGO EN UN TÚNEL DE AUTOPISTA. HISTORIA DEL CASO EN EL CENTRO DE PRUEBAS, S. J. SEIRER, V. WETZIG, CRITERIOS E INNOVACIONES EN SEGURIDAD DE TÚNELES, Junio 2005
- SISTEMAS DE EXTINCIÓN DE AGUA NEBULIZADA – AUMENTANDO LA SEGURIDAD DEL TÚNEL, S. KRATZMEIR, CRITERIOS E INNOVACIONES EN SEGURIDAD DE TÚNELES, Junio 2005