

Sesión sobre Seguridad: **MODELOS NUMÉRICOS PARA ESTUDIOS DE INCENDIO EN TÚNELES CON VENTILACIÓN LONGITUDINAL.**

Por D. B. Martín¹; D. M.P. Retana²; D. A. Frailes³; D. I. del Rey²; D. E. Alarcón³

¹Demarcación de Carreteras del Estado de Castilla-La Mancha. Ministerio de Fomento

²Centro de Modelado en Ingeniería Mecánica (CEMIM). Madrid.

³ETS Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.

RESUMEN: En caso de accidentes severos en túneles se requiere una adecuada estrategia para evitar pérdidas humanas. En túneles con ventilación longitudinal el recurso fundamental es la actuación sobre los ventiladores de chorro para dirigir o concentrar la nube de humo. Las situaciones más comprometidas se presentan en túneles con doble sentido de circulación. En este artículo se presentan varios modelos numéricos de distinta complejidad y coste que permiten el análisis e interpretación de accidentes con fuego. Finalmente se muestran ejemplos de aplicación a casos reales, en particular los realizados para los túneles de El Negrón II y Los Yébenes.

La tendencia actual en sistemas de ventilación está encaminada a la implantación de sistemas longitudinales incluso para grandes longitudes. Esto es debido fundamentalmente al menor coste de construcción al no tener que disponer conductos auxiliares y la facilidad de ampliación si es necesario aumentar el empuje instalado. Sin embargo en caso de incendio, el humo no tiene posibilidad de ser evacuado como ocurriría en un sistema de extracción mediante trampillas u otros elementos análogos. La actuación de salvamento se basa entonces en el control de la masa de contaminantes mediante actuación sobre los ventiladores de chorro que la dirigirán conforme a la estrategia de salvamento planeada. Desde este punto de vista es de fundamental importancia la flexibilidad de

actuación sobre ventiladores puesto que los situados en las proximidades del foco pueden quedar fuera de servicio debido a las altas temperaturas. En virtud de ello es aconsejable un reparto de los equipos uniforme según la longitud del túnel. Por otra parte el papel clave que juegan los ventiladores requiere que estos sean reversibles aun cuando el sentido de circulación sea único.

En estas circunstancias la situación de túnel con doble sentido de circulación se presenta como especialmente dramática al no poder impulsar el humo aguas abajo del incendio. En estos casos la actuación se centra en mantener el humo confinado el tiempo suficiente para que los usuarios escapen, para lo cual se opera desde los ventiladores más alejados al incendio. En efecto, la

actuación desde aceleradores próximos crearía turbulencias capaces de romper la estratificación de la capa caliente dando una situación más desfavorable para el escape de las personas.

En túneles largos estas actuaciones se complementan con vías de escape laterales además de las medidas de seguridad comunes: cordones detectores de incendio, cámaras de televisión, postes SOS, corte de tráfico, anuncios por megafonía, etc.

Sin embargo en una situación real donde hay vehículos circulando, ventiladores conectados, unas determinadas condiciones atmosféricas exteriores, etc., no es fácil saber cómo actuar para lograr confinar o dirigir los humos; a esto se une que el equipo de control aun siendo personal especializado tiene que actuar en condiciones de emergencia por lo que las decisiones han de estar claramente predeterminadas en función de variables que aporta la instrumentación instalada en el túnel (velocidad del aire en el interior, número de vehículos circulando,...). Es interesante contar con un sistema de control informatizado que evite los errores humanos. Estas decisiones sólo pueden ser fijadas después de estudiar multitud de escenarios de accidente para lo que es necesario establecer modelos numéricos que permitan la interpretación.

1. MODELOS

Modelo unidimensional

Este modelo mantiene un nivel de simplicidad que permite su uso para el análisis general del fenómeno así como una interpretación de éste en términos de variables macroscópicas controlables y utilizables incluso en términos de dimensionamiento. El bajo coste operacional de este modelo permite realizar multitud de estudios. Además sus resultados pueden ser utilizados para imponer condiciones de contorno en modelizaciones más complejas.

Este método supone que toda la sección transversal se encuentra en las mismas condiciones, lo que es claramente irreal en las proximidades del foco donde los gases calientes por flotación tienden a situarse bajo la bóveda o el falso techo del túnel permitiendo una zona con aire respirable a la altura de las personas si se consigue mantener la estratificación. En este sentido cabe considerar que los resultados serán conservadores. Por otra parte, al perder los detalles en la sección transversal no se observan ciertos fenómenos como por ejemplo las recirculaciones de la capa caliente.

Una de las ventajas de este modelo es que permite acoplarlo fácilmente con el comportamiento del tráfico. En la figura 1 se muestran las curvas características de un proceso de frenado y las densidades de vehículos resultante. Para simplificar se considera que existen sólo dos regímenes: vehículos con densidad ρ_0 moviéndose a la velocidad definida por la curva fundamental de tráfico y vehículos parados con una densidad máxima. La cola de vehículos parados crece a velocidad distinta de la llegada de coches por lo que aparece una discontinuidad u onda de choque.

En el modelo se supone que los efectos de la compresibilidad del aire pueden despreciarse y se combinan las ecuaciones del movimiento para cada sección suponiendo la continuidad de la presión y el caudal. Así el movimiento de la columna de aire se describe mediante la ecuación de equilibrio:

$$M \frac{dW(t)}{dt} = F(t)$$

donde M es la masa de aire en el túnel $W(t)$ su velocidad en cada instante de tiempo y $F(t)$ la fuerza total en cada instante que incluye el efecto émbolo (variable con el tiempo según van parando los coches), el empuje de los ventiladores, las fuerzas meteorológicas y la resistencia del tubo (variable con la velocidad W).

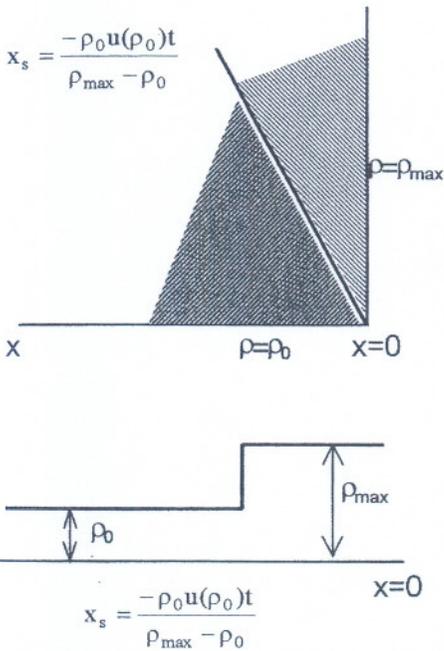


Figura 1 Modelo de tráfico

En el método de cálculo las ecuaciones de transferencia (velocidad, entalpía, concentración, etc) están condicionadas por los términos fuente y por las condiciones de contorno. En general se tiene

$$\frac{\partial q}{\partial t}(\rho, \phi) + \text{div} [\rho \vec{W} \phi + \vec{J}(\phi)] = q(\phi)$$

donde:

- ϕ : propiedad genérica del fluido (magnitudes escalares transportadas)
- ρ : densidad
- \vec{W} : vector velocidad
- $\vec{J}(\phi)$: vector densidad de flujo
- $q(\phi)$: caudal de la fuente por unidad de volumen

Para la resolución del sistema se recurre a un método de diferencias regresivas en el tiempo.

El modelo descrito contempla la propia evolución de contaminantes del incendio, el tipo de ventilación y las distintas actuaciones llevadas desde control.

Modelos tridimensionales

El modelo unidimensional es apropiado para realizar estudios a nivel global donde se acepta que la temperatura, composición de los gases y otras magnitudes son lo suficientemente uniformes en secciones transversales al túnel. Obviamente esto no ocurre cerca de un incendio. Un esquema del flujo en esa región está esbozado en la figura 2.

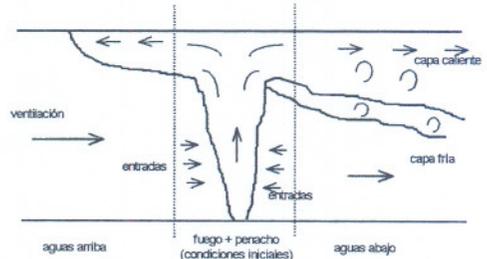


Figura 2. Región del incendio

En el suelo hay un vehículo u otro objeto que arde y del que se eleva una llama seguida de un penacho de gases calientes. La llama y posteriormente el penacho arrastran el aire necesario para la combustión. Los gases calientes formados por el aire arrastrado y los productos de la combustión, que generalmente será incompleta, se instalan en la parte superior del túnel, formando una capa caliente con sustancias posiblemente tóxicas y con partículas de hollín que son repartidas a los ventiladores, a las paredes o a otros vehículos o personas que se encuentren en el suelo. El aire caliente que se extiende por debajo del techo se encuentra aguas arriba con el aire de la ventilación natural o forzada, formándose un punto de remanso y una zona de recirculación, que impide que dichos

gases calientes penetren a una distancia significativa aguas arriba siempre que la velocidad de ventilación sea suficiente.

La capa caliente prosigue su movimiento fundamentalmente hacia aguas abajo, formando un chorro parietal, cuyo espesor crece por arrastre de aire limpio de la parte inferior del túnel, hasta que, a una distancia suficientemente grande, el aire caliente ocupa toda la sección del túnel. Aguas abajo de esta distancia y aguas arriba de la posición del punto de remanso, podría suponerse que el modelo unidimensional es válido. En la región intermedia restante, que es esencialmente tridimensional, ocurren fenómenos muy complejos y difíciles de modelar. Hay intercambios de masa, cantidad de movimiento y energía, tanto por convección como radiación entre el aire, el objeto, los gases emitidos por éste y las paredes del túnel; las ecuaciones que rigen el fenómeno son las 5 ecuaciones de conservación de la Mecánica de Fluidos: masa, 3 de cantidad de movimiento y de la energía, además de las necesarias para modelar la combustión, la producción de hollín y la radiación.

Al ser las ecuaciones de conservación en derivadas parciales, (siendo las variables independientes las coordenadas de cada punto y el tiempo) es necesario fijar, además de condiciones iniciales, condiciones de contorno apropiadas en la pared del túnel, en las paredes del objeto que arde (o alternatively una simulación de cómo se consume el material combustible de dicho objeto o vehículo), y en la zona de entrada aguas arriba y de salida aguas abajo. La resolución del anterior sistema de ecuaciones en derivadas parciales, junto con las condiciones iniciales y de contorno se realiza numéricamente, mediante discretización apropiada del campo de fluido y del intervalo temporal de interés.

Este tipo de modelización tridimensional, que trata de dar distribuciones de las distintas magnitudes (temperatura, presión, velocidad, composición, etc) en todo instante y **en todo el campo del incendio, es complejo y difícil de implementar con carácter general, y**

requiere una capacidad de cálculo y tiempo de ordenador descomunal; por ello se tiende a desarrollar modelos más simples del denominado tipo compartimental o zonal, que ha sido aplicado a la simulación de fuegos en habitaciones o edificios, aunque muy escasamente en túneles.

Modelo zonal o de compartimentación

Los modelos zonales en lugar de dar el detalle de lo que ocurre en cada punto, dividen el dominio en diferentes zonas o compartimentos, y dan propiedades medias de las magnitudes en cada una de ellas, o presuponen variaciones de acuerdo con reglas fijadas a priori, basadas en la experimentación o en argumentos físicos.

Cada uno de los elementos antes mencionados: objeto que arde, llama, penacho, capa caliente, paredes del túnel, capa fría inferior, zona de recirculación y regiones de entrada y salida, se supone que son las zonas o módulos en que se divide el fuego, la variación de cuyas propiedades está relacionada con los intercambios de masa, cantidad de movimiento y energía con las zonas circundantes. Las propiedades de cada zona, por ejemplo la temperatura de la capa caliente, se suponen uniformes o que varían con arreglo a una ley sencilla. Los intercambios entre zonas se describen mediante leyes fenomenológicas directas. Las ecuaciones de conservación de masa y energía pueden plantearse reteniendo el término de variación temporal para algunas de las zonas, con lo que resulta un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas para describir la evolución temporal del fuego, lo que es útil para simular los procesos inicial y de extinción del fuego; en etapas intermedias es suficiente una suposición de tipo cuasiestacionario, que requiere únicamente la resolución de un sistema de ecuaciones de tipo algebraico.

Aunque el modelo zonal es mucho más sencillo que el tridimensional, el número de ecuaciones a resolver puede ser muy elevado, dependiendo del número de zonas y de

magnitudes que describen cada una de ellas. Como ejemplo, la capa espacial aguas abajo, estaría descrita por las siguientes magnitudes que determinan las condiciones en su zona de entrada desde el penacho: espesor, temperatura, velocidad y composición de los gases.

Otra complicación adicional es que existen regiones, como la pared del túnel, en las que el cálculo de la distribución de temperaturas requiere la resolución de una ecuación adicional, aunque ésta puede simplificarse tomando como única variable espacial la distancia a su superficie interna.

Estos dos últimos métodos trabajan con un gran número de variables, lo que genera un volumen inmenso de resultados y dificulta la realización de estudios paramétricos, por lo que sólo se utiliza en regiones locales de especial interés. Así mismo, los detalles pueden resultar irreales debido a la incertidumbre de las variables que participan en el fenómeno.

2. EJEMPLOS

A continuación se presentan distintos ejemplos desarrollados en los que se emplean los modelos expuestos anteriormente.

Para los modelos unidimensionales se muestran distintos tipos de resultados obtenidos (gráficas de velocidades y concentración de humos) pero se hace especial hincapié en los beneficios de este tipo de estudios a la hora de establecer las **pautas de actuación** que regirán el comportamiento del equipo de control en las situaciones de interrupción de calzada con fuego. Los análisis realizados para los modelos tridimensionales permiten comprender mejor el comportamiento local del incendio mostrando las limitaciones del modelo unidimensional y haciendo posible un uso más eficiente del mismo.

Ya se ha comentado la dificultad existente para confinar la nube de contaminantes en los túneles de doble sentido de circulación.

Los modelos presentados corresponden a los túneles de **LOS YÉBENES y EL NEGRON II**.

Ambos son túneles carreteros localizados en Toledo y León respectivamente. El primero es un túnel de dos carriles con doble sentido de circulación con una longitud de 882 m. El segundo también de dos carriles está proyectado para un único sentido de circulación aunque se ha previsto una situación de emergencia en la que los vehículos circulan en los dos sentidos por cierre del túnel paralelo (accidente, mantenimiento, etc). Su longitud aproximada es de 4200 m.

Para los dos ejemplos se muestran dos tipos de gráficas. Las primeras presentan la evolución de la velocidad del aire de ventilación en el interior del túnel una vez realizada la actuación correspondiente. Las segundas recogen la peligrosidad de la situación para un pasajero en gráficos de isolíneas de niveles de concentración de CO y humos. En ellas, el eje horizontal es la variable espacial a lo largo de la longitud del túnel y el vertical es la escala de tiempo. Las isolíneas dibujadas permiten establecer para cualquier instante la concentración de humos o CO a lo largo del túnel. Es posible apreciar también las trayectorias de escape de los pasajeros bien hacia las bocas o hacia las salidas de comunicación laterales en el caso de El Negrón.

Las figuras 3 y 4 corresponden al túnel de Los Yébenes. La contrapresión es en este caso de 50 Pa, el tráfico se reparte equilibradamente en los dos sentidos y el incendio se produce a 1/3 de la boca norte. Inicialmente se tienen dos ventiladores soplando de Norte a Sur favoreciendo el tiro natural. La actuación ha consistido en conectar seis ventiladores en sentido Sur-Norte a la vez que se desconectan los iniciales.

Como se puede ver en la Figura 3 la velocidad (positiva en el sentido Norte-Sur) comienza a aumentar debido a la parada de los vehículos que inicialmente se oponen a la ventilación, para después caer al conectar los equipos de ventilación longitudinal, hasta

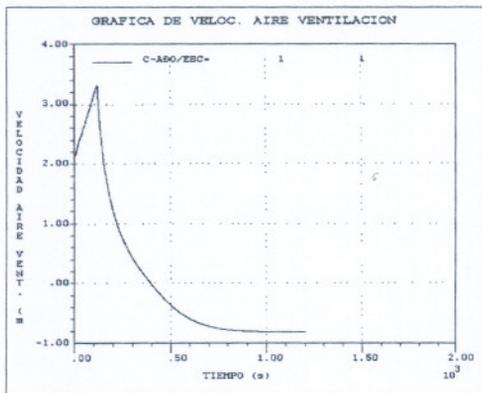


Figura 3. Velocidad aire de ventilación.

estabilizarse en un valor de 0.8 m/s. El cambio de signo en la figura representa la inversión en el sentido de la masa de aire en el interior del túnel.

En la Figura 4 se pueden apreciar los niveles de concentración de humos y CO sufridos en la trayectoria hasta el escape. La trayectoria representa una velocidad 1.4 m/s lo que en el tramo más largo supone que una persona situada en el punto donde se produce el incendio tardaría en salir del túnel 3.5 minutos. Durante este tiempo la trayectoria no corta la isolínea de coeficiente de extinción admisible de valor 0.4 m^{-1} (línea engrosada en la figura) por lo que se considera que la actuación es suficiente.

Paralelamente pueden ser representadas isolíneas de concentración de contaminante CO en el interior del túnel, introduciendo también las mismas trayectorias de escape. En este caso el valor admisible es de una concentración de CO de 400 ppm.

Es posible apreciar en la misma figura el proceso de inversión del sentido del aire, al tener en cuenta que en el plano x-t la pendiente de las isolíneas en las zonas donde no existe generación de contaminante coincide con la velocidad del aire y, por tanto los cambios de signo de la pendiente coinciden con cambios de signo de la velocidad.

La experiencia acumulada al escoger un conjunto de escenarios de cálculo y particu-

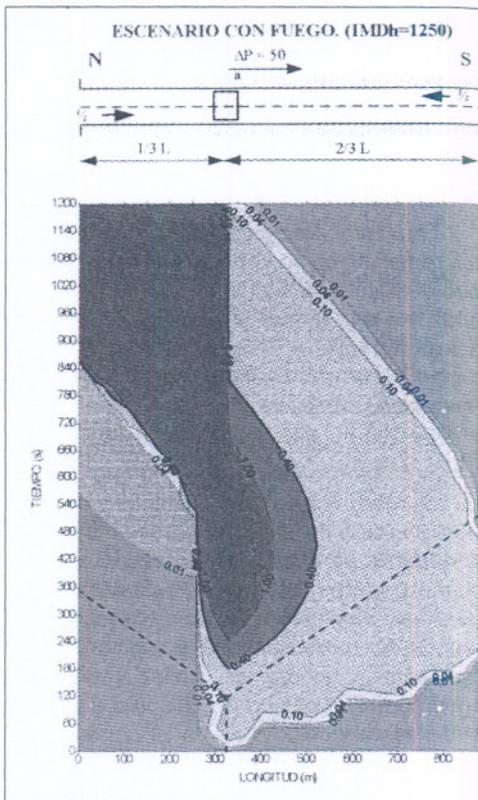


Figura 4 Coeficiente de extinción.

larizar para cada uno de ellos una actuación sobre los equipos que asegure el salvamento de los usuarios del túnel, ha permitido desarrollar una línea de actuación genérica, recogida para el estudio del túnel de los Yébenes en la tabla 1.

En la tabla se aprecia la forma de actuación ante diferentes situaciones del tráfico (equilibrado o con sentido preferente) que puede ser medido mediante la colocación de espiras, de ventiladores (inicialmente conectados o túnel autoventilado) y, de velocidad inicial del aire dentro del túnel obtenida mediante la instalación de un anemómetro bidireccional. La actuación consiste en una vez detectado un incendio, automáticamente desconectar todos los ventiladores en funcionamiento, para posteriormente encender los indicados. Será importante conectar ventiladores distintos de los que inicialmente fun-

TRÁFICO	SITUACIÓN PREVIA	VELOCIDAD AIRE VENTILACIÓN	ACTUACIÓN (VENTILADORES)
N → S	Con ventiladores	N → S	Desconectar
		N ← S	6 N → S
	Sin ventiladores	N → S	$V_a < 2.5$ 2 N ← S
			$V_a > 2.5$ 6 N ← S
		N ← S	6 N → S
N ↔ S	Con ventiladores	N → S	Desconectar
		N → S	Desconectar
	Sin ventiladores	N → S	$V_a < 2$ 2 N ← S
			$V_a > 2$ 6 N ← S
	Sin ventiladores	N ← S	$V_a < 2$ 2 N → S
			$V_a > 2$ 6 N → S
N ← S	Con ventiladores	N → S	6 N ← S
		N ← S	Desconectar
	Sin ventiladores	N → S	6 N ← S
		N ← S	$V_a < 2.5$ 2 N → S
			$V_a > 2.5$ 6 N → S

Tabla 1. Pautas de actuación.

cionaban con el fin de ahorrar tiempo de respuesta.

Un segundo ejemplo se presenta con las figuras 5 y 6, se trata en este caso del túnel del Negrón II, previsto para desdoblarse el tráfico que la autopista León - Oviedo que inicialmente se mantenía a través del túnel paralelo Negrón 1, es por tanto un túnel proyectado para un único sentido de circulación, aunque se admite la posibilidad de que exista doble circulación en situaciones extraordinarias.

La elevada longitud del túnel (4200 m) y la existencia del anterior paralelo aconsejan la utilización de galerías de comunicación que puedan ser utilizadas como vías de escape ante situaciones de riesgo.

En este caso se representa un escenario pésimo de accidente con fuego, en el que existe una situación extraordinaria con tráfico bidireccional y además la posición del incendio bloquea una de las vías de escape con el

túnel adyacente. Los usuarios, por tanto, tendrán que recorrer mayores distancias para huir de la zona. Inicialmente existen dos ventiladores actuando en el sentido Sur-Norte mientras que el tiro natural tiene sentido contrario. Como medida urgente de actuación se interrumpe la acción de los dos ventiladores permitiendo que el propio tiro natural invierta el sentido en el del aire interior.

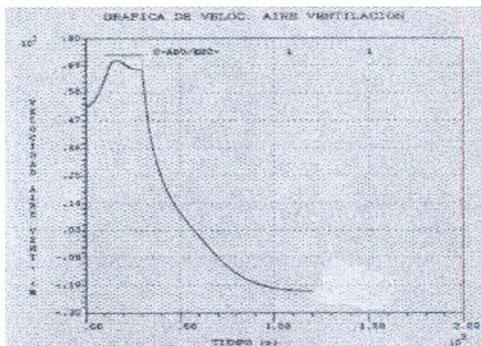


Figura 5. Ventilación aire de ventilación

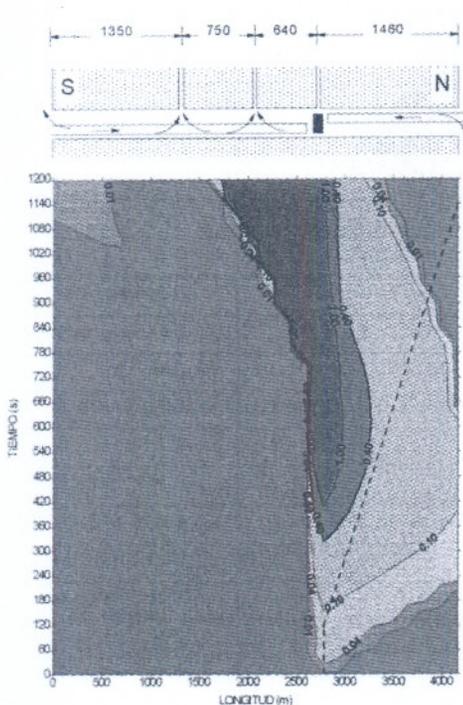


Figura 6. Coeficiente de extinción

La figura presenta la trayectoria de escape pésimo donde se observa que no se alcanzan valores de coeficiente de extinción superiores a los admisibles.

Utilizando el programa FIRE de AVL de acuerdo con el modelo tridimensional indicado anteriormente se ha realizado el estudio transitorio de los primeros minutos de un incendio.

El ejemplo reproduce la geometría del **túnel del Negrón** del que se han discretizado una longitud de 1400 m mediante 67452 celdas. El fuego se produce en el carril derecho y tiene un área de 4X12 m.

La figura 7 muestra una perspectiva y la Figura 8 una sección longitudinal de la evolución de las temperaturas en la zona próxima a un fuego situado en uno de los carriles al cabo de 7 minutos del inicio. En ellas se observa el efecto de arrastre longitudinal debido a la velocidad de 4 m/s y la rápida

ascensión a la bóveda de las zonas más calientes. La combinación de estos movimientos junto con la posición del incendio y forma curva de la bóveda provoca una curiosa asimetría del movimiento hacia el lado contrario de aquél en el que se produce el incendio.

La asimetría muestra la existencia de temperaturas elevadas en zonas bajas de la sección transversal del túnel lo que es perjudicial para la seguridad en caso de incendio. Sin embargo se corrige al alejarse de la fuente consiguiéndose la estratificación del aire.

La gran sección del túnel (88.5 m²) favorece la citada estratificación, encontrándose a 50 m de la fuente zonas bajas con incremento de temperatura de 21°C a 1 minuto del comienzo del incendio y 47°C, 6 minutos más tarde.

3. CONCLUSIONES

En túneles con ventilación longitudinal la actuación sobre los ventiladores es fundamental para evitar una catástrofe en caso de accidente con fuego. Se han presentado tres modelos de cálculo que permiten el estudio de estas situaciones.

El modelo unidimensional aparece como el de mayor simplicidad, las variables son introducidas de forma macroscópica permitiendo un análisis global del problema. Entre sus ventajas se cuentan el bajo coste operacional lo que posibilita el análisis de multitud de casos y el acoplamiento con la acción del tráfico. La realización de análisis locales requiere el uso de otros métodos de elevado coste como son los modelos zonales y tridimensionales. Estos manejan un gran número de variables, se genera gran volumen de resultados y la interpretación de los casos resulta difícil, por lo que la elección de las hipótesis ha de ser especialmente cuidadosa. En general su uso es adecuado para contrastar ensayos in-situ en secciones de especial interés. La principal limitación de estos modelos radica en la dificultad de definir el modelo, en particular pueden presentar pro-

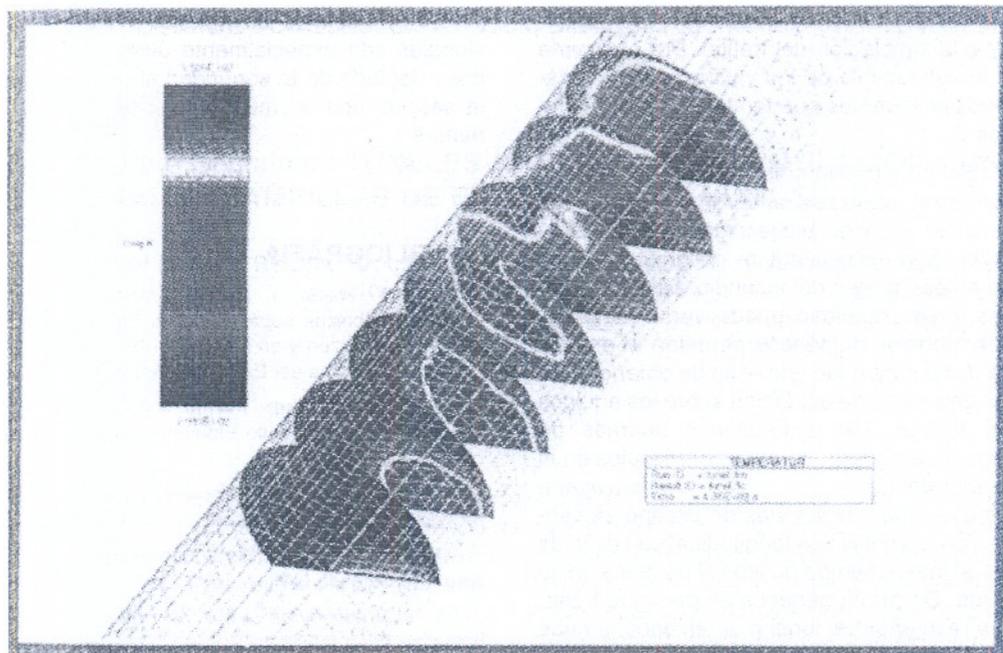


Figura 7. Perspectiva de las temperaturas en la zona del incendio 7 minutos tras su comienzo.

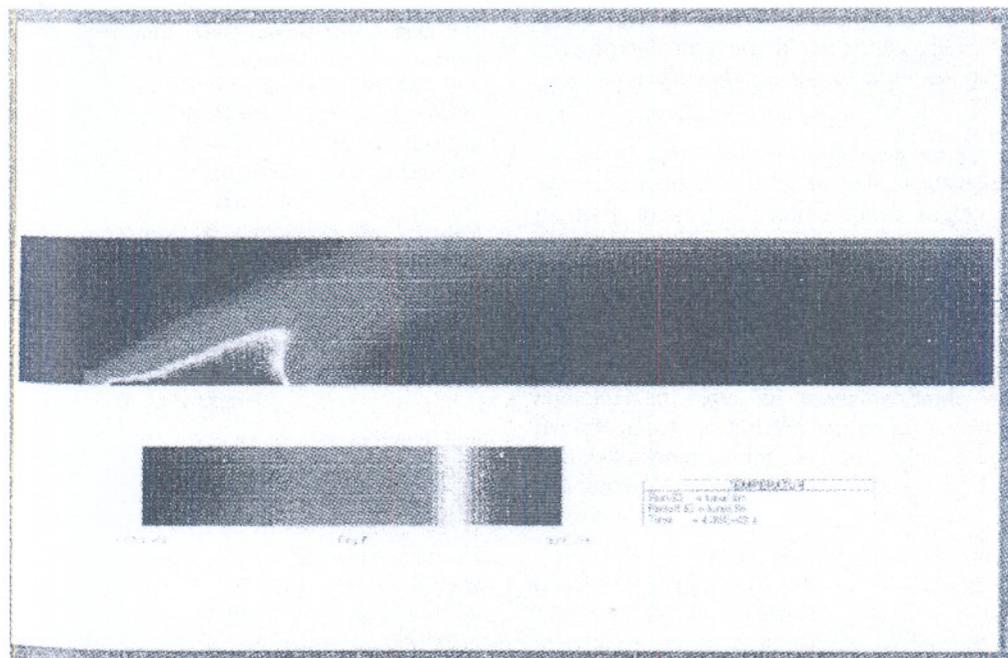


Figura 8. Sección longitudinal de las temperaturas en la zona del incendio 7 minutos tras el comienzo.

blemas la fijación de condiciones de contorno o la simulación del tráfico. Por otra parte la incertidumbre de los valores de las variables participantes pueden falsear los resultados.

Se han presentado en los ejemplos la actuación realizada ante una situación de incendio y tráfico bidireccional. Estos escenarios son especialmente peligrosos puesto en ambas partes del incendio existen personas cuya seguridad puede verse afectada. Los modelos numéricos permiten el estudio de dicha seguridad con el fin de obtener pautas genéricas de actuación sobre los equipos de control. Las actuaciones además de impedir la entrada de nuevos vehículos en el interior del túnel al mismo tiempo de avisar a los atrapados de las vías de escape se centran en la ventilación longitudinal con el fin de dar el mayor tiempo posible al usuarios en su huida. De forma genérica se persigue frenar el aire interior del túnel manteniendo la nube de contaminantes concentrada en la zona del incendio. La forma más inmediata de conseguirlo es provocar la inversión en el sentido del avance de la masa de aire, lo que se ve dificultado por la gran cantidad de condiciones iniciales que pueden presentarse.

En este sentido los modelos monodimensionales son especialmente útiles mostrándose del lado de la seguridad al representar la sección con un mismo nivel de contaminantes.

4. BIBLIOGRAFIA

1. F. Hacar, I. García Arango y otros. Jomadas Técnicas sobre Túneles. La Seguridad en la Construcción y en Servicio. 1994. Demarcación de Carreteras del Estado en Asturias.
2. J.R. Brauer. "What every engineer should know about Finite Element Analysis". Marcel Dekker, 1988
3. F. Thomasset. "Implementation of FEM for Navier-Stokes". SDRinaer N.Y.. 1981
4. J. Patterson. "SimDlified Desian for Building Fire Safety". J.Wiley, 1993
5. Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels. Boras. Swedish National Testing and Research Institute. 1994
6. J.R.Gillard. Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Developments for the 21st centur, bHr Group. Mech. Eng. Publication, 1997