

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE INCENDIOS Y EVACUACIÓN PARA TÚNELES. TÚNEL DE BOUZAS: UNA SOLUCIÓN ORIENTADA A PRESTACIONES

D. José Manuel Piris.

*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Demarcación de Carreteras del Estado en Pontevedra.*

D. Luis Héctor Gómez Carrión.

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Tecpro S.L.

D. Fernando Portugués Salgado.

Ingeniero Industrial. Geocontrol, S.A.

El RD 635/2006 establece para los túneles de la red nacional de carreteras del Estado la obligatoriedad de cumplir determinadas condiciones en materia de seguridad.

Entre los túneles del territorio español que se deben adecuar, está el Túnel de Bouzas., en Vigo, de marcado carácter urbano, que está constituido por una sucesión de túneles de calzadas bidireccionales independientes separados entre sí por tramos a cielo abierto, siendo la longitud total del tramo de 608 metros.

Dada su tipología, el Túnel de Bouzas se trata como túnel bidireccional urbano de longitud menor de 1.000 metros y mayor de 500 metros con IMD por carril superior a 2.000 veh/día, enclavado en el epígrafe 2.21.1.2.1 del RD 635/2006, lo que implica que debería contar con salidas de emergencia cada 150m; pero debido a su carácter urbano, la realización de salidas de emergencia sin ocupar dominios privados es prácticamente imposible.

Esta circunstancia, junto con el elevado coste de ejecución y mantenimiento que supondría realizar dos salidas de emergencia, motivaron la realización de un estudio combinado de incendio y evacuación, con la premisa de que los propios tramos a cielo abierto generan zonas seguras a continuación de ellos.

Mediante tecnología CFD y simuladores computacionales de evacuación de personas se verifica que es viable para este túnel no ejecutar salidas de emergencia, sin perder prestaciones en materia de seguridad. Una solución orientada a prestaciones.

1. Introducción

El Túnel de Bouzas está compuesto por una sucesión de tramos cubiertos y tramos a cielo abierto, con una longitud total de 749 metros. Es un túnel con tráfico bidireccional con separación entre las dos calzadas por una mediana que de manera puntual presenta columnas hasta el techo.

La longitud de los tramos cubiertos es de 65, 70, 185 y 101 metros respectivamente, separados por tramos abiertos de 91, 67 y 29 metros respectivamente.

De acuerdo con la clasificación que se establece en el RD 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en túneles de carreteras del Estado queda clasificado según el apartado 2.21.2.2, lo que implica que, entre otros medios de seguridad, debe disponer de sistema de ventilación así como salidas de emergencia cada 150 metros.

Debido a la tipología del túnel, con numerosos tramos a cielo abierto, se puede considerar que la ventilación de cada tramo cubierto es independiente de los otros, siendo la longitud del tramo más largo inferior a los 200 metros, distancia a partir de la que sería necesario un sistema de ventilación.

Dado que el túnel en la actualidad dispone de un sistema de ventilación mediante 6 jets en cada sentido, esto es, 12 ventiladores en total, se ha previsto la sustitución de los ventiladores actuales, que presentan un estado bastante deteriorado, con golpes de vehículos con exceso de galibo, por otros jets con las mismas características de empuje, pero con resistencia al fuego 2 horas a 400°C.

Este sistema de ventilación sería insuficiente para el control de la ventilación en un túnel de 749 metros cubierto en su totalidad, pero la tipología del Túnel de Bouzas con aberturas continuas, hace que la propia ventilación natural sea suficiente para asegurar unas condiciones ambientales adecuadas, si bien el sistema de ventilación puede favorecer el control de ventilación.

Respecto a las salidas de emergencia, se podría hacer una consideración análoga a la de la ventilación: dado que el principal objetivo de éstas es permitir a los usuarios alcanzar un lugar seguro en caso de incendio y las zonas bajo las aberturas propor-

cionan unas condiciones de atmósfera adecuadas en esta situación, pueden considerarse como zonas seguras, siendo la máxima distancia entre éstas 185 metros.

En el mismo Real Decreto 635/2006 se indica que las salidas de emergencia pueden ser de tres tipos:

- ⑦ Salidas directas del túnel al exterior
- ⑦ Conexiones directas entre tubos del túnel
- ⑦ Salidas a galería de emergencia

Así pues, el Túnel de Bouzas dispone como salidas de emergencia de las propias bocas del túnel (2), las aberturas entre tramos cubiertos (3), y dos salidas que conectan con el exterior del túnel.

El tramo cubierto de mayor longitud, de 185 metros, dispone en el hastial de la calzada sentido Norte de una salida de emergencia a 25 metros de una zona abierta, por lo que en esa calzada la distancia máxima entre salidas de emergencia sería de 160 metros. En el sentido opuesto no se dispone de salidas intermedias, de manera que se sobrepasan por 35 metros los 150 metros máximos según la clasificación realizada.

Debido al elevado coste de ejecución de una salida de emergencia y la escasa repercusión en el incremento de la seguridad que esta representaría, se considera que no es justificable su realización por su bajo ratio coste-efectividad, existiendo soluciones alternativas.

En los siguientes apartados se muestra el análisis llevado a cabo para evaluar las condiciones de seguridad del Túnel de Bouzas ante el evento de un incendio en su interior, y comprobar si la evacuación del túnel se realiza de manera satisfactoria o son necesarios medios adicionales, por lo que se ha seguido una metodología consistente en considerar que el incendio se produce en el escenario más desfavorable.

Mediante el análisis conjunto de los datos procedentes del proceso de evacuación y de la generación de humos y calor por el incendio se ha analizado hasta que punto se ven afectados los usuarios del túnel.

2. Simulacro de incendio

La longitud de los tramos cubiertos es de 65, 70, 185 y 101 metros respectivamente con separaciones de 91, 67 y 29 metros, por lo que el tramo que desde el punto de vista de la ventilación y evacuación presenta mayor complejidad es el de 185 metros.



Figura 2.a.- Vista aérea del Túnel de Bouzas

Según se muestra en la Fotografía 2.a, el tramo se encuentra situado entre una abertura completa de 29 metros y otra con estampidores de 67 metros. Debido a la estructura que ésta última presenta, se ha simulado el tramo cubierto de 185 metros, la abertura de 67 metros, con estampidores, y el siguiente tramo de 70 metros.

Se ha supuesto que se produce un accidente con incendio en el sentido Sur, a 60 metros de la abertura de 29 metros, según se muestra en la Figura 2.b.

Esta ubicación del foco del incendio permite analizar conjuntamente la propagación de humos a lo largo de 125 metros y considerar que quedarán usuarios bloqueados detrás del foco.

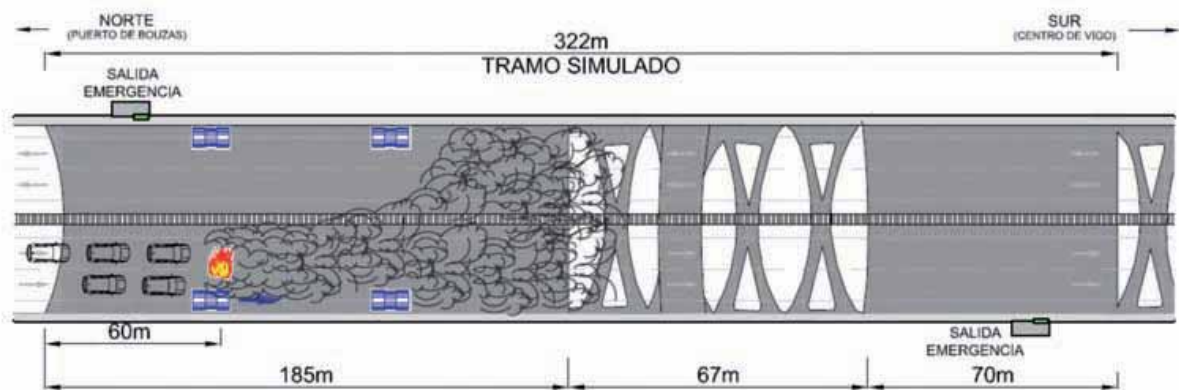


Figura 2.b.- Hipótesis de accidente en Túnel de Bouzas

Las condiciones iniciales de la simulación son las que se producen con tráfico fluido de manera que la ventilación tiene en cada sentido de circulación la misma dirección que los vehículos.

Inicialmente el sistema de ventilación se encuentra apagado, y no es hasta los 60 segundos (tiempo medio para detección del incendio, bien mediante cable sensor, CCTV o llamada desde un poste SOS) cuando se pone en marcha el ventilador más próximo al foco del incendio en el hastial derecho en sentido Sur.

Se ha supuesto que los vehículos que circulen en sentido Sur quedarán bloqueados por el foco del incendio y que los vehículos en sentido Norte podrán salir del túnel sin problemas.

2.1. Programa de cálculo

Actualmente, para realizar cálculos con la precisión adecuada, resulta prácticamente imprescindible la resolución de modelos tridimensionales, de volúmenes finitos, mediante programas de cálculo que utilizan los conceptos CFD (Computational Fluid Dynamics).

Sólo con estas técnicas se pueden calcular las distribuciones, en el tiempo y a lo largo de todo el túnel, de la temperatura y gases generados por el incendio. Estos datos son imprescindibles para, combinados con los resultados de la simulación de la evacuación, conocer si los humos o el incremento de temperatura pueden afectar negativamente a los usuarios del túnel.

Se ha utilizado el programa de CFD Solvent, desarrollado específicamente para incendios en túneles y validado mediante los ensayos experimentales del “Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program”; realizados entre 1993 y 1995 en Estados Unidos.

El procedimiento de cálculo que utiliza el Solvent, basado en el método de los volúmenes finitos, sigue los pasos siguientes:

1. Discretización del dominio computacional, el túnel es dividido en un número finito de volúmenes de control o celdas. En cada volumen de control los valores de las variables asociados al nodo interno prevalecen en el volumen y los asociados a los extremos de la malla prevalecen sobre las caras.
2. Discretización de las ecuaciones diferenciales. Las ecuaciones diferenciales de la dinámica de fluidos son transformadas en ecuaciones algebraicas mediante su integración en cada volumen de control.

Estas ecuaciones son:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \nabla \left(\vec{v} \right) = 0$$

Cantidad de movimiento:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + (\rho + \mu) \nabla \left(\nabla \cdot \vec{v} \right)$$

Ecuación de la energía:

$$\frac{du}{dt} = \nabla (k \nabla T) - \nabla \cdot \vec{v} + \Phi_v$$

Conservación de los productos existentes en la atmósfera del túnel:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla c_i = - \frac{1}{V} \nabla \cdot (c_i \vec{v}) + \frac{w_i}{V}$$

3. **Solución de las ecuaciones discretizadas.** Los valores de las variables dependientes son obtenidos resolviendo el sistema global de ecuaciones algebraicas mediante métodos iterativos.
4. **Solución no estacionaria.** En el caso de una simulación no estacionaria, como es el caso, una vez resuelto el sistema algebraico se incrementa el paso temporal y el cálculo se empieza de nuevo.

2.2. Descripción del modelo confeccionado

La confección del modelo de cálculo comprende los siguientes pasos:

- Definición de la geometría. Se genera el dominio de cálculo especificando el volumen fluido y los elementos sólidos.
- Mallado. Se genera la malla acorde con las características particulares de cada geometría.
- Condiciones de contorno. Se establecen las condiciones de contorno adecuadas que determinan las superficies sólidas, entradas y salidas de flujo, condiciones de presión en las bocas, etc.
- Diseño del incendio. Se parametriza el incendio que se desea simular.
- Condiciones iniciales y transitorias. Se imponen las condiciones iniciales y transitorias, las cuales determinan el valor de las variables en el inicio de

la simulación y la transición de ciertos parámetros a estados distintos (por ejemplo, el crecimiento del incendio).

2.2.1. Geometría

El modelo se ha generado a partir de la sección tipo del túnel. Dado que las zonas que se pretende analizar son los tramos cerrados de 185 y 70 metros así como la zona abierta de 67 metros intermedia, se han modelizado exclusivamente estos 322 metros.

La zona a cielo abierto se ha simulado mediante tres aberturas de 15 metros, separadas 7,5 metros entre ellas. Asimismo, se ha representado la separación entre los dos sentidos del túnel, consistente en una New Jersey corrida con columnas a una interdistancia de 10 metros.

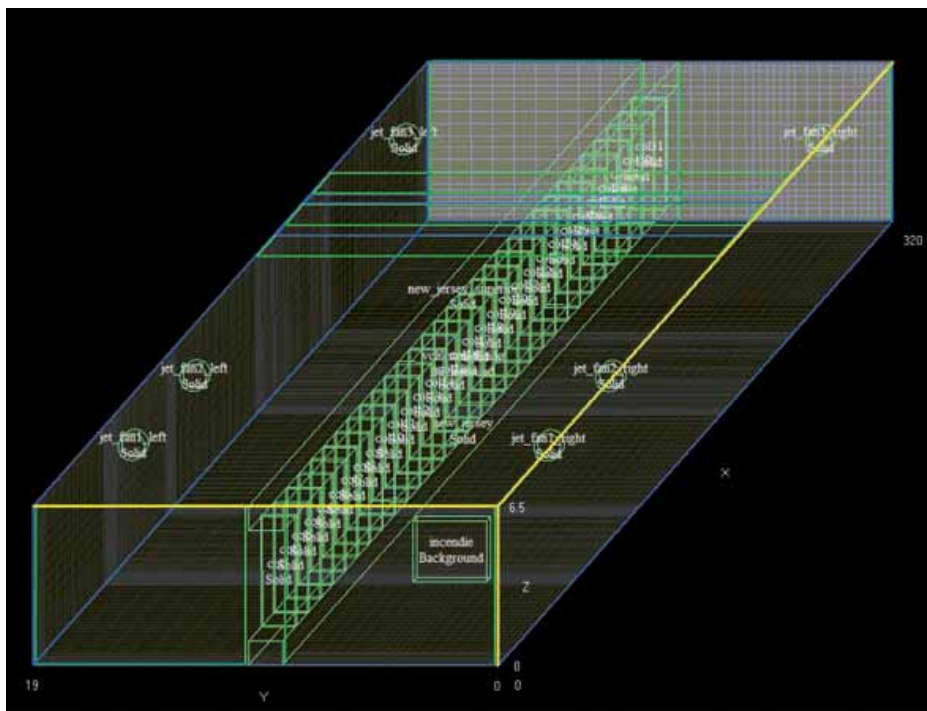


Figura 2.2.1.a.- Mallado del modelo.

2.2.2. Mallado

El modelo confeccionado consta de 167.040 volúmenes; dispuesto de tal forma que es posible refinar el mallado en las zonas donde los gradientes de temperaturas, velocidades y presiones sean más acusados. Esto sucede habitualmente en la propia zona del incendio y en las bocas del túnel.

2.2.3. Características del incendio

De acuerdo con el consenso internacional actualmente en vigencia, se considera que las instalaciones de seguridad de un túnel deben ser capaces de garantizar la evacuación de los usuarios si se produce un incendio con una potencia calorífica máxima de 30 MW.

Dado que por el Túnel de Bouzas también circulan vehículos de transporte de Mercancías Peligrosas, la potencia de incendio puede ser mayor de 30 MW, por lo que la simulación se ha llevado a cabo con un foco de incendio de una potencia de 100 MW.

Dimensiones (m)	Coefficiente estequiométrico del fuel	Poder calorífico del fuel	Flujo másico del fuel	Rendimiento de la combustión
3x3x2,5	14,5	$4,26 \times 10^7$ J/Kg	2,1 Kg/s	0,9

Cuadro 2.2.3.1.- Características del incendio de 100 MW.

La potencia máxima del incendio, 100MW, se alcanza a los 10 minutos de su inicio de acuerdo con los criterios adoptados habitualmente sobre curvas de crecimiento de fuegos.

2.2.4. Condiciones de contorno

Como condiciones ambientales iniciales se ha supuesto que la temperatura ambiente es de 13 °C y que la presión atmosférica es de 101.325 Pa.

Para tener en cuenta el efecto pistón de los vehículos al circular por el túnel se han impuesto en los extremos del modelo condiciones de sobrepresión de 5 Pa por las zonas correspondientes a los carriles de entrada, así como depresión en la zona de los carriles de salida del mismo valor pero con signo negativo.

De esta manera, se ha simulado el comportamiento habitual de la ventilación natural en el túnel, que no muestra un sentido predominante debido a que los dos sentido de tráfico están separados tan solo por una barrera New Jersey con columnas,

En la zona correspondiente a la abertura con estampidores, se han impuesto condiciones de presión atmosférica, de manera que el aire/humos pueda entrar o salir según sean las condiciones de ventilación.

3. Simulación del proceso de evacuación

Para simular el proceso de simulación se ha definido en primer lugar la carga ocupacional existente en el mismo tramo considerado en la simulación de incendio.

Posteriormente, se han calculado los tiempos de evacuación mediante un programa informático, que, partiendo de una secuencia pre-establecida de abandono de los vehículos por parte de los usuarios, calcula la distribución de personas a lo largo del túnel y en función del tiempo.

En los apartados siguientes se presentan las hipótesis admitidas sobre la carga ocupacional, la secuencia de evacuación, las características del programa, el modelo establecido y los resultados obtenidos.

3.1. Carga ocupacional

Aunque está prevista la instalación de dispositivos para cortar el tráfico de entrada al túnel evitando la retención del tráfico en su interior, como situación más desfavorable se ha supuesto que estos dispositivos no funcionan o no son activados.

De esta manera, se ha considerado que ante el inicio del incendio, quedan bloqueados todos los vehículos que se encuentren aguas arriba de este, pudiendo tan solo salir aquellos que se encuentren entre el incendio y la boca de salida.

En estas condiciones, la longitud del tramo bloqueado es de 60 metros en el interior del túnel, y según la previsión de distribución de vehículos en los 2 carriles, existirán 18 vehículos, con una carga ocupacional de 36 personas.

3.2. Parámetros de la evacuación

De acuerdo con lo establecido en la norma NFPA 130, editada por la Nacional Fire Protection Agency de Estados Unidos, la velocidad de los usuarios al abandonar el túnel se ha establecido en 1 m/s.

Por lo que se refiere a los tiempos de reacción de los usuarios, se ha supuesto el fallo en los sistemas de detección del incendio, por lo que la evacuación se ha realizado de manera progresiva y no de manera puntual, como sucedería en caso de alertar mediante megafonía a los usuarios.

Bajo este supuesto, se ha previsto la evacuación progresiva, comenzando por los usuarios más próximos al foco del incendio, de manera que un primer grupo comienza la evacuación a los 60 s, el segundo grupo a los 80 s, y el tercero, el más próximo a zona a cielo abierto, a los 90 s.

3.3. Características del programa

Para calcular los tiempos de evacuación se ha utilizado el programa STEPS (Simulation of Transient Evacuation and Pedestrian movementS).

STEPS ha sido diseñado para simular los patrones de movimiento de las personas tanto en condiciones normales como durante una evacuación en edificios, centros comerciales, estaciones soterradas y túneles.

La base de cálculo del programa utiliza las disposiciones de la NFPA 130 como valores por defecto; permitiendo además introducir modificaciones. El programa ha sido validado a partir de los ejemplos de cálculo de evacuación contenidos en la NFPA 130.

Además de definir la carga ocupacional y los parámetros de evacuación, la utilización del programa STEPS exige confeccionar un modelo preciso del lugar en que se pretende simular la evacuación.

En la confección de este modelo deben tenerse en cuenta los conceptos que se indican a continuación:

- Planos y caminos: son los elementos sobre los que se desplazan las personas del modelo.
- Bloqueos: representan cualquier elemento que no puede ser atravesado por las personas.
- Formas: son geometrías que representan rampas y escaleras.
- Zonas: representan áreas en las que se pueden medir parámetros de evacuación.
- Ítems: elementos bidimensionales o tridimensionales que no afectan a la simulación. Son incorporados al modelo a posteriori para obtener una visualización más realista.
- Salidas de evacuación: cada elemento singular del modelo (puertas, escaleras, rampas, etc.) es definido como una “salida plana” que adopta por defecto la capacidad y velocidad de paso definidas en la NFPA 130.

3.4. Modelo utilizado en la simulación

El modelo utilizado en la simulación refleja el tramo de 322 metros túnel en el que se ha llevado a cabo la simulación de incendio, de acuerdo con las especificaciones de la sección tipo.

Los hastiales del túnel se han considerado como elementos de bloqueo, que se oponen al tránsito de los usuarios; mientras que se ha supuesto que éstos pueden circular por las aceras, carriles de circulación y arcenes del túnel. Asimismo, los vehículos suponen también bloqueos al paso de las personas.

En la Figura 3.4.a se muestra parte del modelo de la simulación y en la Figura 3.4.b la vista de las aberturas intermedias que permiten la evacuación de humos en caso de incendio.

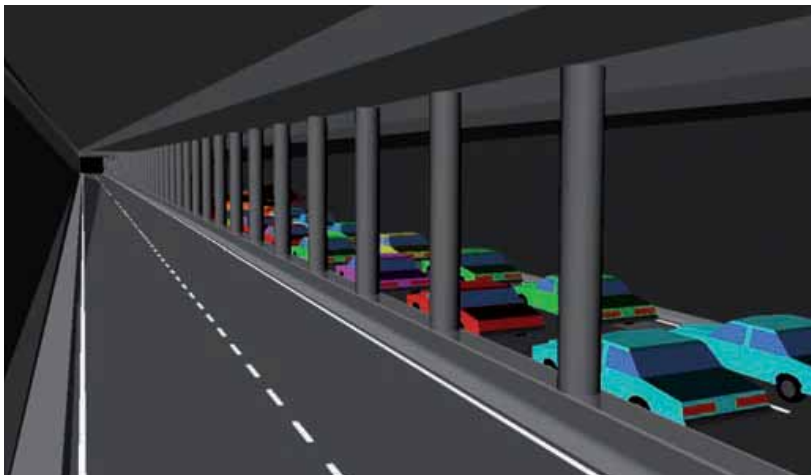


Figura 3.4.a Modelo del Túnel de Bouzas.

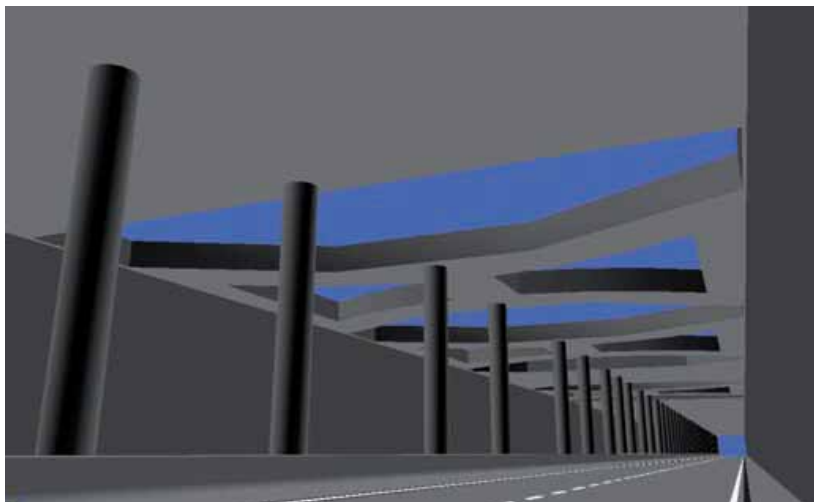


Figura 3.4.b Aberturas intermedias del Túnel de Bouzas.

El accidente se ubica a los 60 metros de la entrada en el sentido sur, y se representa por un paralelepípedo. Los vehículos que se encuentren aguas abajo del incendio podrán salir del túnel sin problemas; los que se encuentren aguas arriba quedarán bloqueados.

Se considera que los usuarios completan la evacuación al llegar al tramo a cielo abierto bajo las aberturas, ya que se consideran zonas seguras.

4. Análisis de las simulaciones de incendio y evacuación

Los cálculos realizados con los programas Solvent y Steps han permitido calcular la distribución de temperatura de los humos así como las velocidades en función del tiempo transcurrido tras el incendio junto con las ubicaciones de los usuarios en cada instante.

La **Figura 4.a** muestra las temperaturas y la velocidad longitudinal a los 60 segundos del inicio de la simulación de incendio, y muestra claramente como los humos se propagan de manera estratificada en el sentido del tráfico debido tanto a la velocidad longitudinal inicial como a la pendiente del túnel, que es positiva hacia la zona de estampidores.

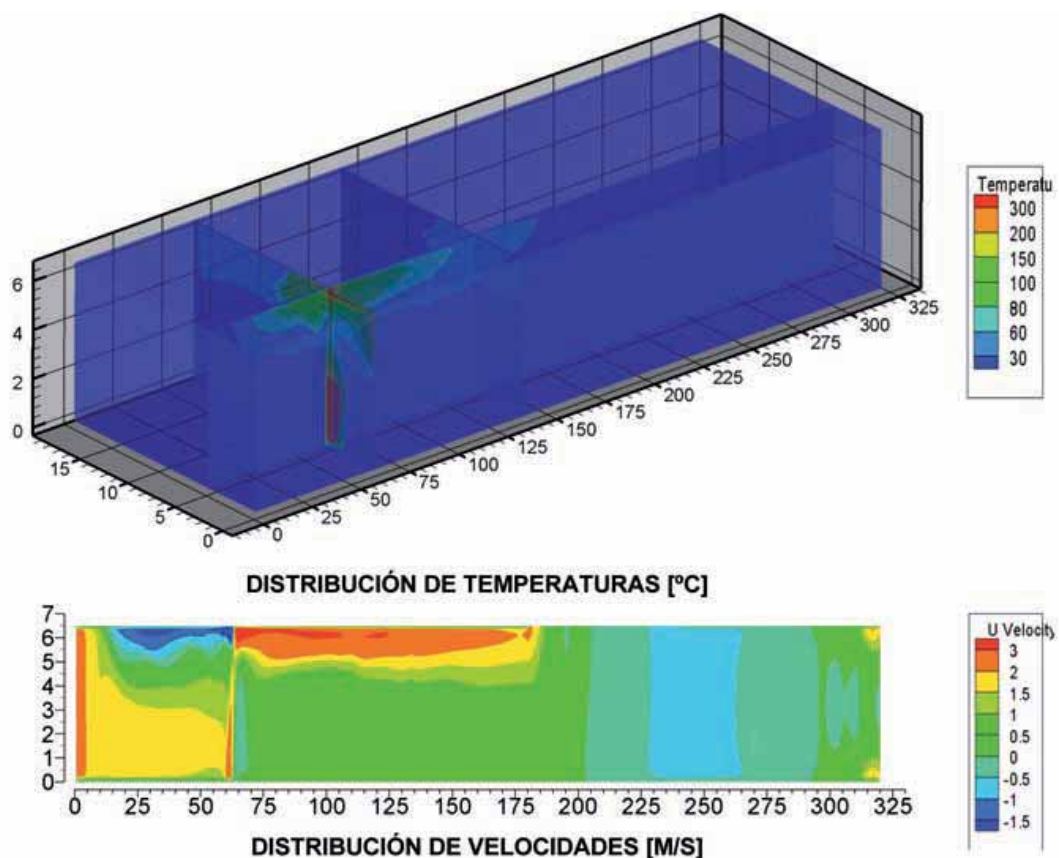


Figura 4.a.- Distribución de temperaturas y velocidades en $t = 60$ s

En ese instante, según las hipótesis de cálculo se inicia la evacuación de los usuarios que se encuentren en el túnel. Las **Figuras 4.b** se muestran varias vistas de la secuencia de abandono de los vehículos próximos al accidente.

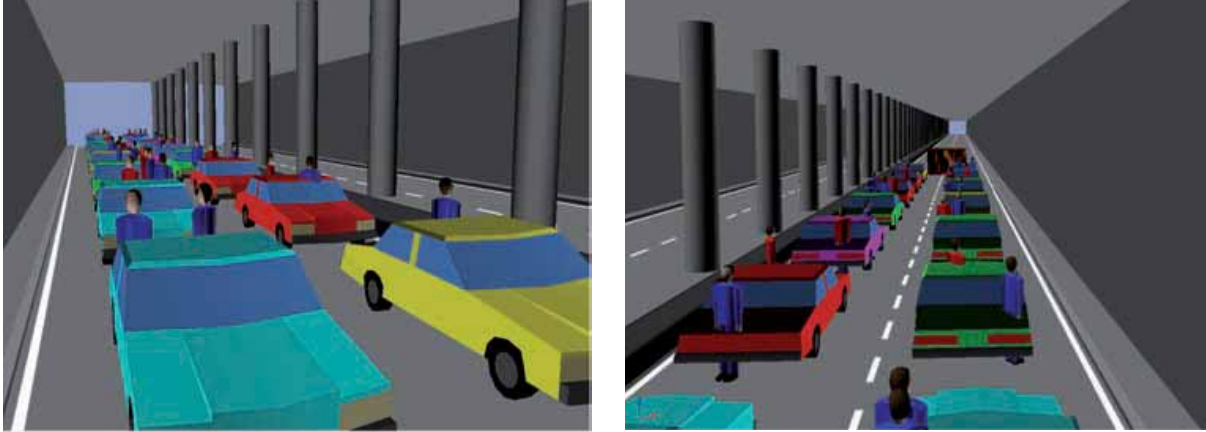


Figura 4.b Vistas de la simulación de evacuación t=60s

La evacuación completa de los usuarios se llevaría a cabo en un periodo inferior a los 2 minutos, según se muestra en la **Figura 4.c**, en la que se muestra la evolución temporal de la carga ocupacional.

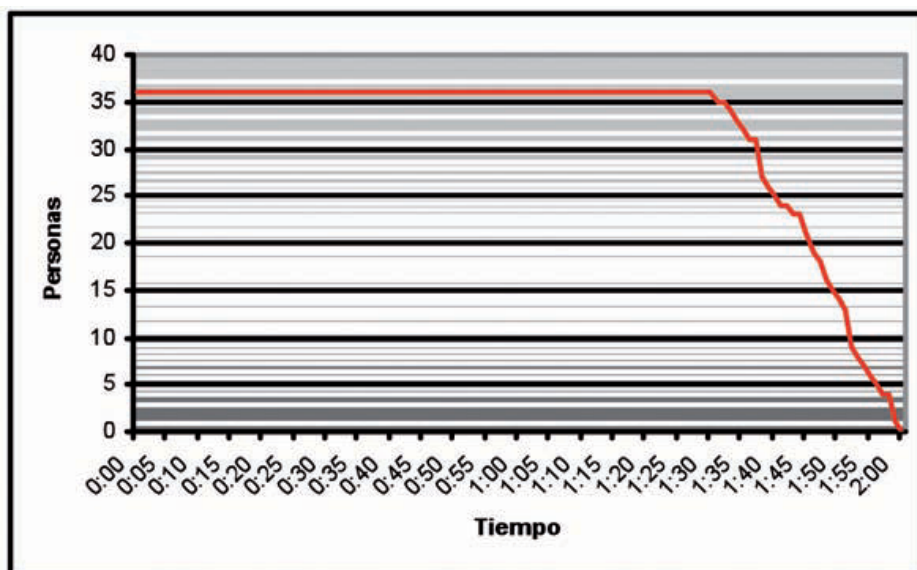


Figura 4.c Evolución temporal de la carga ocupacional

En la **Figura 4.d** se muestra la distribución de usuarios a lo largo del tramo del túnel simulado con STEPS en distintos instantes. A los 90 segundos del inicio del incendio el usuario más próximo al foco se encontraría a 30 metros del foco, y a 40 metros diez segundos más tarde. En todo instante, los usuarios se encontrarían en zonas libres de humos, por lo que podrían llegar a la zona a cielo abierto en condiciones óptimas.

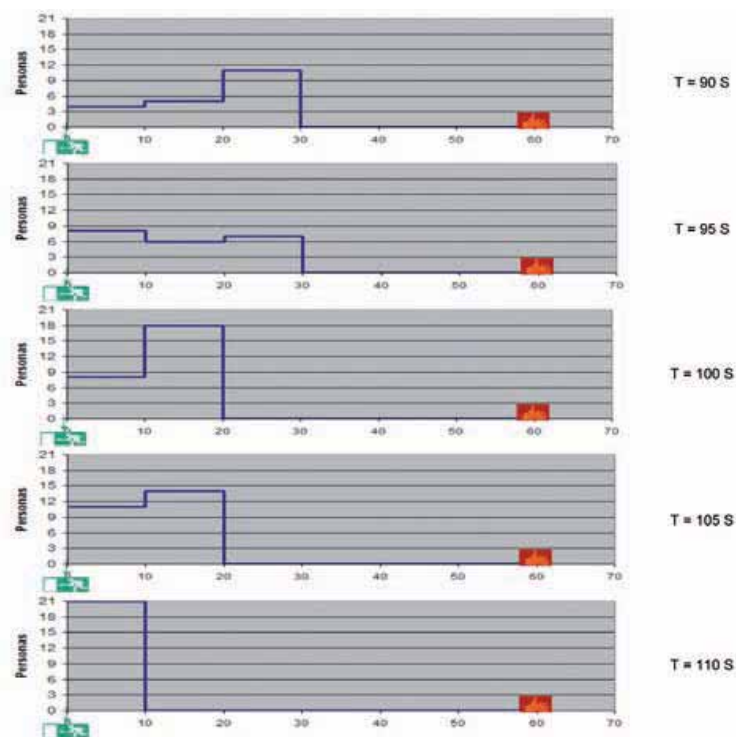


Figura 4.d. Distribución de los usuarios en el interior del túnel

En la **Figura 4.e.** se muestra la ubicación de los usuarios a los 90 segundos del inicio del incendio.

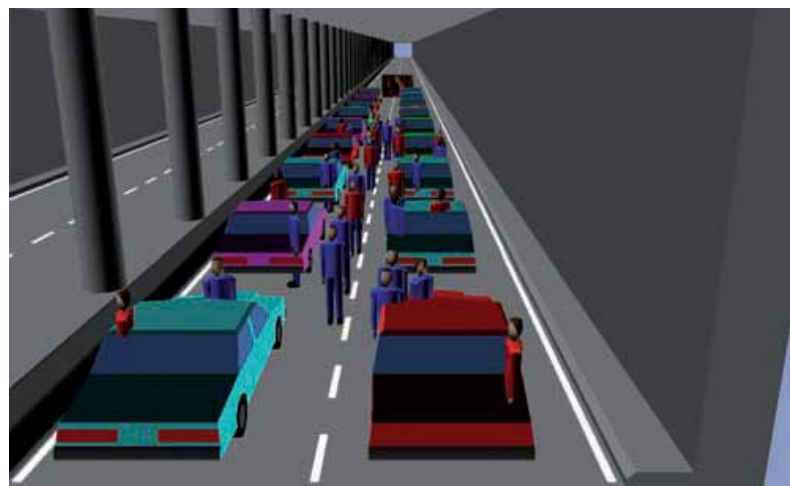


Figura 4.e. Distribución de los usuarios en el interior del túnel a los 90 segundos

A los 120 segundos la evacuación de los usuarios ha finalizado y, según se muestra en la Figura 4.f, las temperaturas de los humos no presentan valores críticos aguas arriba del foco. Se puede apreciar como los humos comienzan a invadir los carriles sentido Norte.

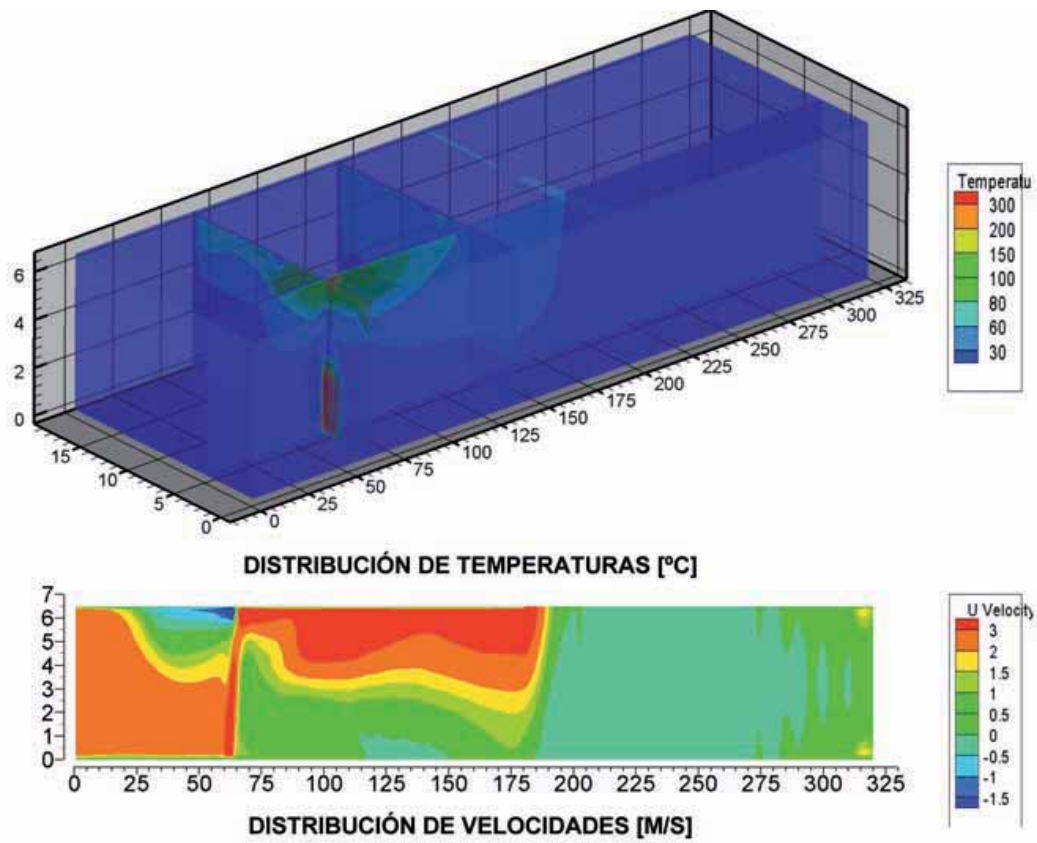


Figura 4.f.- Distribución de temperaturas y velocidades del aire en $t = 120$ s.

En este instante, el ventilador situado en la sección del incendio lleva encendido un minuto, lo que sumando a la mayor producción de humo provoca que las velocidades longitudinales en la sección del carril en el que se encuentra el foco del incendio sean mayoritariamente positivas, superando en algunos sectores los 3 m/s, hasta los 180 metros, sección en la que se encuentra el inicio de la abertura, lo que provoca que la velocidad longitudinal se reduzca a valores próximos a cero.

En el sentido norte los vehículos podrían salir libremente, y, dado que desde el centro de control se habría detectado la existencia de un incendio, se cortarían los accesos para evitar la entrada de nuevos vehículos, de manera que no existirían usuarios en situación de riesgo en el túnel sentido norte.

Complementariamente, los usuarios ya habrían completado el proceso de evacuación, recorriendo los 60 metros de distancia hasta la zona abierta. En ninguna fase del proceso de evacuación los usuarios habrían estado en zonas con humos, minimizando así los riesgos en caso de incendio.

La Figura 4.g, de temperaturas y velocidad a los 180 segundos muestra claramente como los humos generados por el incendio, cada vez a mayor temperatura se propagan hasta la sección abierta, pero una vez alcanzada ésta no continúan propagándose hasta la siguiente zona, quedando el túnel sectorizado. Así pues, inmediatamente antes de la abertura se alcanza una temperatura de 45°C, siendo a una distancia de 15 metros de tan solo 13°C.

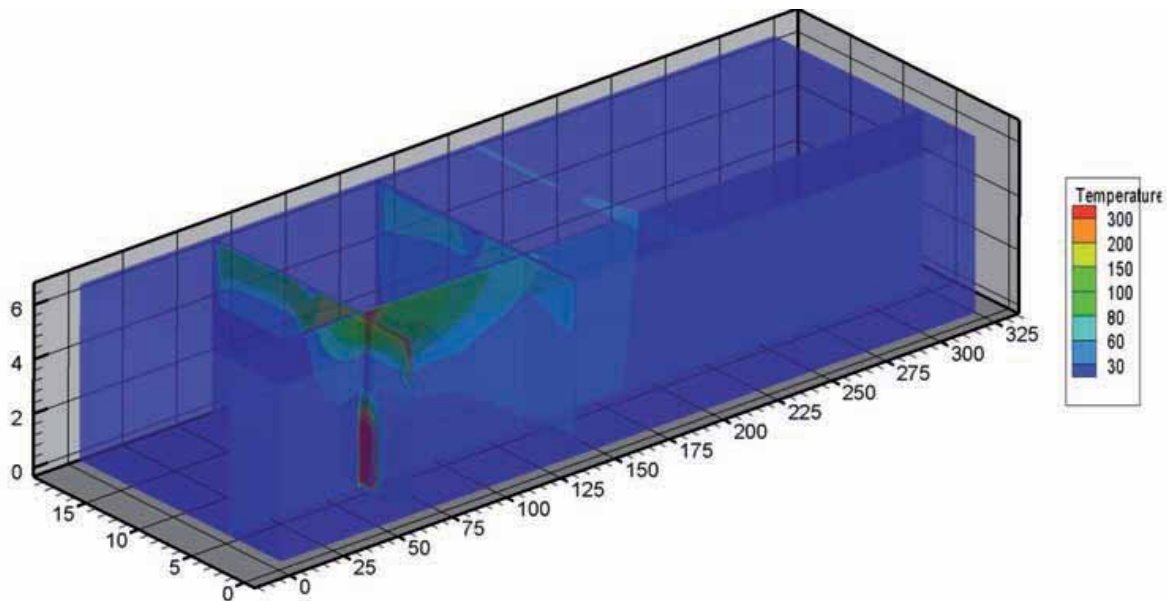


Figura 4.g.- Distribución de temperaturas en $t = 180$ s.

Desde los 240 segundos en adelante, la simulación no presenta variaciones significativas, si bien las temperaturas siguen incrementándose debido a la mayor potencia que va adquiriendo el foco del incendio, que hasta los 600 segundos no alcanza los 100 MW.

En la Figura 4.h, en el instante $t = 600$ s, con el incendio plenamente desarrollado se aprecia como entre el foco del incendio y la abertura la temperatura está en la sección longitudinal por encima de 80 °C, pero como una vez rebasada la abertura las temperaturas siguen siendo las ambientales.

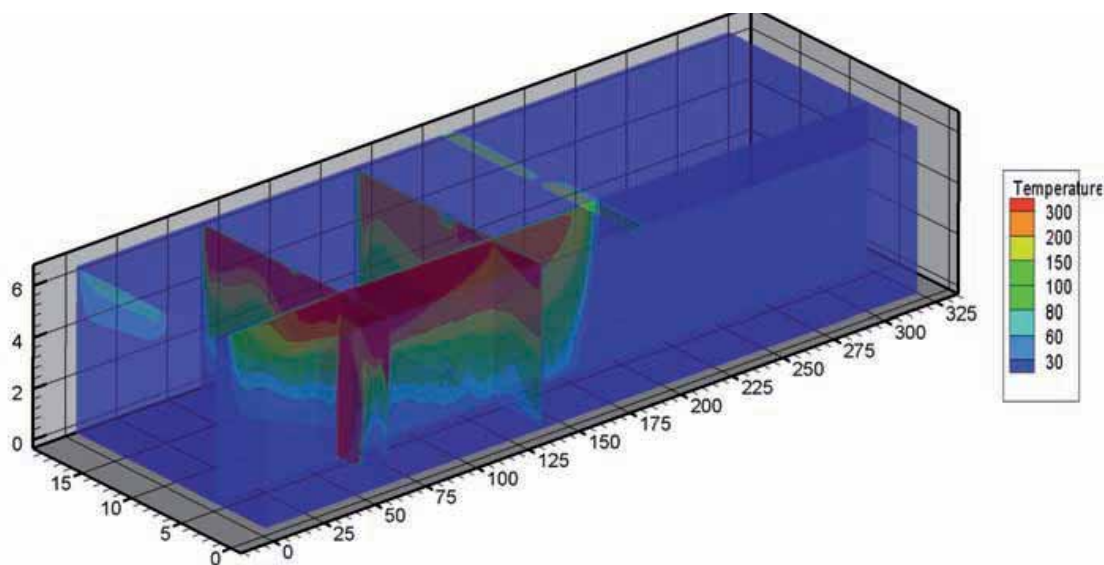


Figura 4.h.- Distribución de temperaturas en $t = 600$ s.

5. Conclusiones

El tramo analizado es el más desfavorable en caso de incendio desde el punto de vista de la ventilación, debido a una abertura con estampidores, como desde el de la evacuación de los usuarios, debido a que es el tramo cubierto de mayor longitud.

En la simulación realizada se ha considerado un incendio de 100 MW, potencia superior a la utilizada habitualmente, debido a la posibilidad de que se produzca un accidente en el que se vean involucrados vehículos de transporte de Mercancías Peligrosas.

Los resultados muestran como los humos avanzan hacia la abertura, llegando a ésta a partir de los 120 segundos, debido tanto a las condiciones de presión impuestas para simular el efecto de circulación de vehículos, como a la pendiente positiva.

Una vez se alcanza la zona de estampidores, los humos calientes salen al exterior sin alcanzar la siguiente zona cubierta. Esto deja claro cómo cada tramo puede ser analizado, en términos de ventilación, como independiente.

Bajo este punto de vista, de sectores de ventilación de hasta 200 metros, la aplicación de la especificación del R.D. 635/2006 respecto a la distancia de 150 metros entre salidas de emergencia, no parece justificada, menos aun cuando el análisis de

propagación de humos en caso de incendio muestra como el túnel presenta, en aspectos de ventilación, una ventaja estructural frente a túneles de misma longitud cubiertos completamente, que hace que sea mucho más seguro.

De acuerdo con la simulación de evacuación, esta se realizaría en un tiempo reducido, inferior a 2 minutos, sin que los humos afectasen a los usuarios, por lo que no es necesario realizar salidas de emergencia adicionales.

Por otra parte, aunque este túnel queda clasificado como bidireccional, dada su tipología con mediana con columnas, en caso de accidente tan solo quedaría bloqueado, bajo una hipótesis muy desfavorable, un sentido de circulación, de manera que los vehículos que estuviesen en el otro sentido podrían evacuar el túnel en condiciones de seguridad en su propio vehículo.