

Sesión sobre Seguridad: TÚNELES URBANOS CON VENTILACIÓN LONGITUDINAL Y TRAMPILLAS DE EXTRACCIÓN DE HUMOS.

Por D. M. P. Retana¹; D. I. Del Rey¹; D. A. Frailes²; D. G. Vivero¹; D. P. Museros¹; D. E. Alarcón²

¹Centro de Modelado en Ingeniería Mecánica (CEMIM). Madrid
²ETS Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN: La ventilación de túneles urbanos presenta algunos problemas singulares especialmente en lo relativo a la evacuación de humos provocados por un incendio. Generalmente la solución adoptada es semi-transversal con trampillas de extracción. Sin embargo en ciertas circunstancias puede ser preciso combinar éstas con un sistema longitudinal basado en aceleradores. En este artículo se presenta la primera realización de este tipo proyectada en España y se describe el sistema de cálculo y algunas conclusiones relativas a la filosofía de actuación en caso de incendio.

El cálculo de la ventilación de túneles urbanos tiene diversas particularidades que lo hacen especialmente complicado y en cierto modo semejante a la de los túneles mineros o de ferrocarriles metropolitanos. Entre ellas cabe destacar los problemas introducidos por la existencia de vías de incorporación y salida de tráfico, las comunicaciones con otros túneles para evacuación de los usuarios en casos de accidente, etc., que introducen una velocidad variable del aire de ventilación y complican enormemente el control de la misma.

Por si fuera poco es posible la existencia de situaciones de tráfico saturado, a velocidad muy baja o nula, pero con emisión de contaminantes debido al funcionamiento de los motores. En líneas generales puede decirse que éste es el escenario dimensionante en el proyecto tanto en lo que se refiere a régimen de servicio como en situación de accidente con fuego. En efecto, en el primer caso las emisiones son máximas, no

existe el efecto émbolo y la resistencia a la ventilación forzada que presentan los vehículos parados es máxima también.

En el caso de accidente con fuego el humo emitido afecta tanto a los vehículos parados aguas arriba como aguas abajo del foco lo que impide el recurso típico de extracción en el sentido del tráfico.

La solución que tradicionalmente se ha adoptado en estos casos es el sistema transversal y recientemente (una vez que se ha comprobado tanto en modelos como en experimentos en túneles reales su efectividad), el sistema semi-transversal con grandes trampillas telecomandadas de extracción de humos.

Incluso en túneles de carretera con circulación en ambos sentidos se considera que este sistema es adecuado en los casos de incendio y en nuestro país se ha llevado a cabo, por ejemplo, en el nuevo túnel de Somport¹.

En ocasiones, sin embargo, el espacio necesario para los conductos de suministro o extracción no existe. Ello sucede en la mayoría de los túneles construidos en ciudades, con alturas y anchuras muy estrictas, que hasta ahora se han resuelto con ventilación longitudinal mediante aceleradores y la idea de extracción de humos en el sentido del tráfico. Puesto que, como se ha indicado más arriba, en vías potencialmente saturables ello implica un grave riesgo en el proceso de evacuación, en este artículo se plantea la posibilidad de combinar el método longitudinal con un sistema de trampillas de extracción telecomandadas que permita alternativas complementarias de actuación.

Cabe citar que en Francia acaba de construirse por primera vez un túnel con este sistema² y que esta comunicación se refiere a los estudios realizados para el primer túnel proyectado en España siguiendo las ideas expuestas en los párrafos anteriores.

1. EL TUNEL DE LA RONDA DEL MIG

La Ronda del Mig es una vía rápida en Barcelona que corre en dirección N-S (figura 1). El túnel que nos ocupa comunica la Plaza Cerdá con la Avenida Diagonal y está comprendido entre la calle Constitució y la Travesera de las Corts. Actualmente existe un túnel inicial, llamado de Badal, entre las calles Pavía y De Sants, que fue ampliado hasta la Avenida de Madrid cuando se construyó un aparcamiento cubriendo la Ronda y aprovechando el desnivel con las calles adyacentes. El primer tramo tiene una altura de unos 6 m., mientras que en el segundo se fue a un gálibo estricto de 4'60 m. La cobertura ha permitido acondicionar la superficie con jardines y reducir el ruido, lo que ha impulsado a plantear una actuación más general para mejorar la estética de la zona y reducir la contaminación acústica. Como se ha dicho más arriba ello implica el cubrimien-

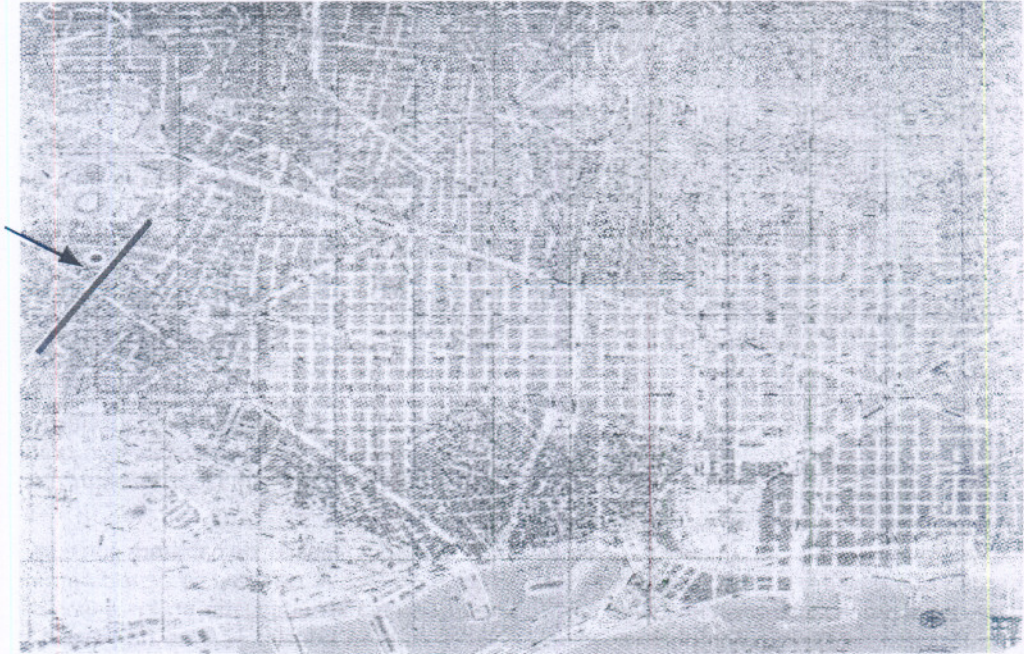


Figura 1^a. Plano de situación

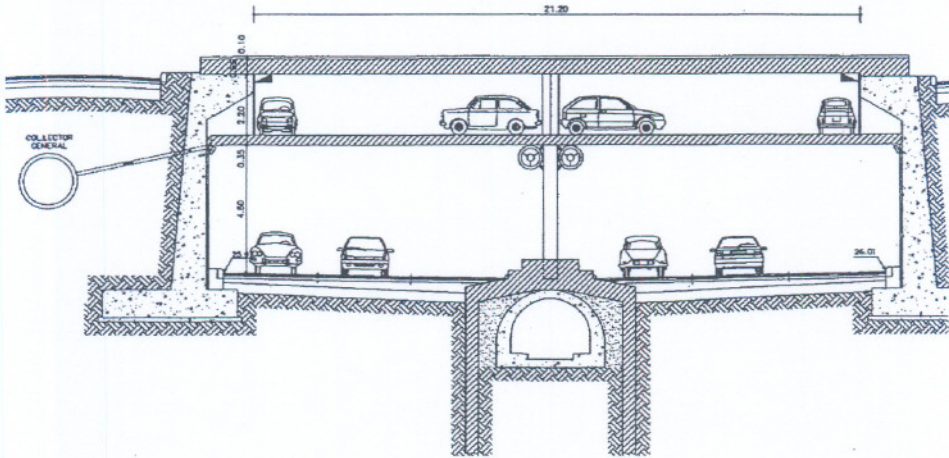


Figura 1b. Sección por la zona del aparcamiento.

to desde Constitució a Corts lo que provoca un túnel con circulación en doble sentido, y unos 1550 m. de longitud.

Debido al intenso tráfico de usuarios este túnel reúne todas las características especiales a que se ha hecho referencia en el apartado anterior: posibilidad de atascos de tráfico, peligrosidad del incendio, dimensiones estrictas que impiden un sistema transversal, etc. Además la repercusión en el tráfico global de la ciudad es enorme y por ello se ha planteado una actuación cuidadosa de todos los aspectos relacionados con la seguridad. En particular el accidente con incendio ha sido considerado como el factor dimensionante de la ventilación y ha motivado la solución proyectada que se describe a grandes rasgos a continuación.

Tras ponderar diferentes alternativas se ha proyectado una cámara central que separa los dos sentidos de circulación simplificando de esta forma tanto la ventilación en servicio como la creación de un conducto de extracción de humos. En las zonas de nueva construcción las paredes de la cámara tienen también función de soporte de las losas de cobertura por lo que se han dimensionado en hormigón armado (figura 2) con capacidad suficiente para resistir los impactos de tráfico. En los túneles existentes la cámara se

forma con placas verticales de hormigón celular armado colocadas sobre pantallas tipo New-Jersey para los precipitados impactos. En ambos casos, cada 50 m., y en la parte superior de las paredes, se colocan trampillas con apertura y cierre telecomandados de dimensiones 1'20 x 0'70, por las que se pretende aspirar los humos en caso de incendio. Existen dos cantones de unos 800 m., cada uno con sendos ventiladores de

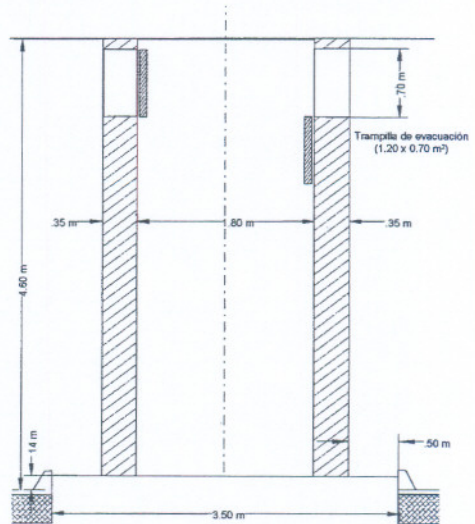


Figura 2. Cámara de extracción con trampillas.

aspiración en el extremo de columnas que evacuarían los humos al exterior a unos 400 m., de cada boca. Estas columnas de extracción quedan incluidas en la ordenación de jardines exteriores.

La ventilación de cada uno de los túneles se encomienda a aceleradores reversibles capaces de crear una ventilación longitudinal en servicio y de controlar la velocidad dentro del túnel en caso de incendio. Puesto que en estas circunstancias los ventiladores situados en las proximidades del foco pueden quedar fuera de servicio debido a las altas temperaturas, se ha preferido un reparto uniforme a lo largo del túnel. Ello es del mayor interés también para controlar la velocidad afectando lo menos posible la estratificación de los humos. En efecto, las turbulencias creadas por los aceleradores próximos al fuego pueden desestratificar la capa caliente distorsionando la aspiración por las trampillas. Por ello interesa controlar la nube de humos desde los ventiladores más alejados, lo que implica que se pueda disponer de ventiladores distribuidos a lo largo del túnel. En este caso se han colocado sensiblemente a 100 m. de distancia.

En caso de incendio se procede inmediatamente a la apertura de las cinco trampillas más próximas al foco y se dispara la actuación de los ventiladores de extracción.

Simultáneamente se actúa sobre los aceleradores longitudinales apagando los que estuviesen encendidos y actuando sobre otros más lejanos para contener la nube de humo en los 250 m. que tienen trampillas abiertas.

La seguridad se complementa con los medios habituales: cordones detectores de incendios, cámaras de televisión, postes SOS, corte de tráfico, etc.

Además existen tres puertas antipánico situadas a distancias de 400 m., que permiten el paso de usuarios al túnel vecino donde se actúa sobre los ventiladores para aumentar la presión en las proximidades de las puertas de comunicación y evitar de esa forma la salida de humos de aquél. En la divi-

soria entre los dos cantones, a unos 800 m., de cada boca, se sitúa una puerta que, actuada por los bomberos, permitiría el paso de vehículos ligeros al tubo no afectado por el accidente.

2. MÉTODO DE CALCULO

Se han preparado programas de cálculo que permiten el estudio del acoplamiento de la acción de los ventiladores y el tráfico.

El modelo de tráfico utilizado es macroscópico y corresponde (figura 3) a las curvas clásicas que relacionan la intensidad, densidad y velocidad.

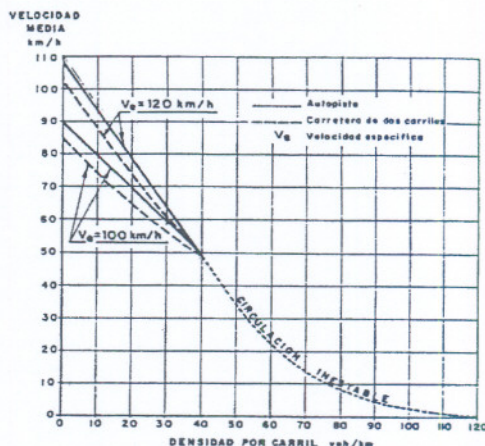


Figura 3a. Curva densidad-velocidad.

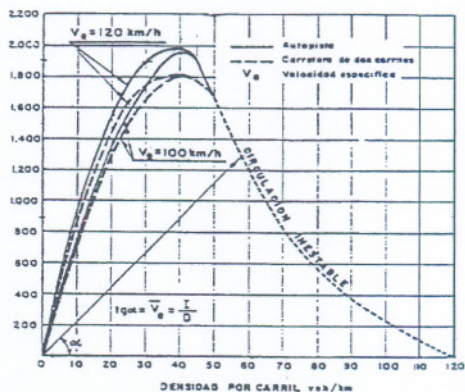


Figura 3b. Curva intensidad-densidad.

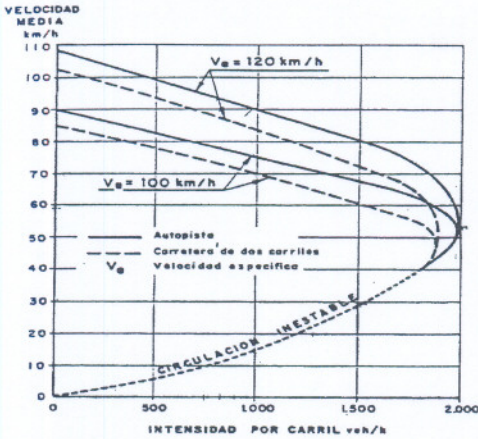


Figura 3c. Curva intensidad-velocidad.

Dentro de los vehículos se distinguen ligeros, pesados, diesel y gasolina y los criterios de emisión se ajustan a las normas PIARC que, como es sabido, recogen la influencia de diferentes factores como la altitud, las pendientes, la edad del parque móvil, etc.

Ello permite simular múltiples situaciones que combinan los diferentes escenarios de cálculo con actuaciones sobre los ventiladores, tiempos de escape, etc.

El modelo del sistema se indica en la figura 4 que corresponde al túnel dirección

Sur-Norte. Puede verse que se trata de una red de tuberías en la que se observa el túnel principal y las incorporaciones y salida del mismo. Además se han modelado las trampillas y tuberías de extracción de los dos cantones. En situación normal de **servicio** estas trampillas están cerradas, por lo que sólo es preciso estudiar el acoplamiento del tráfico, en régimen permanente, con la actuación de ventiladores y las pérdidas y empujes en los ramales de tráfico laterales.

El método de cálculo es el clásico de Hardy-Cross donde se procede mediante un método iterativo con los siguientes pasos⁵:

- Se estructura una malla con circuitos a cada uno de los cuales se hace corresponder una cuerda
- Se estiman valores iniciales q_j de los caudales en cada cuerda, lo que permite calcular los correspondientes a cada rama de la malla
- La ecuación de cada cuerda conduce a un residuo

$$f_k(q_k) = \sum_{j=1}^{n_c} b_{kj} (r_j | q_j | q_j - h_{Nj} - h_{Ej} - h_{TRAFj}) \neq 0$$

$$k = 1, 2, \dots, m$$

donde los b_{kj} son valores ($\pm 1, 0$) según la orientación de la cuerda respecto a la malla

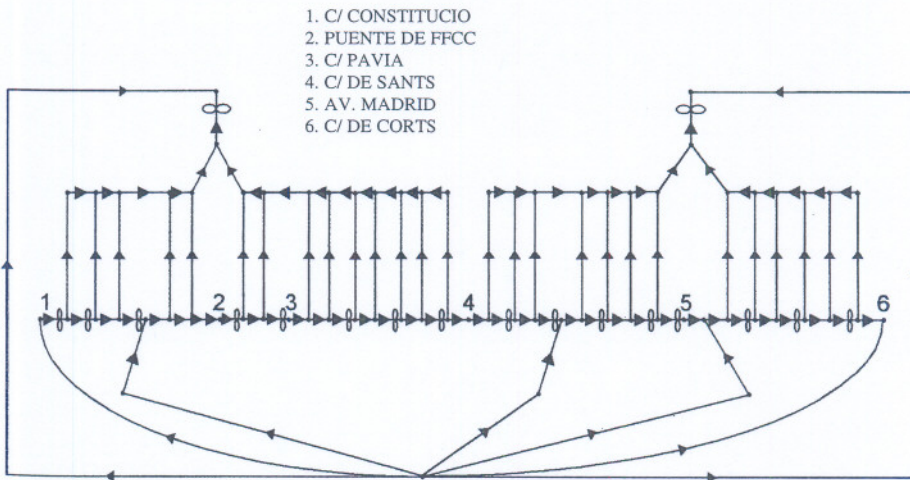


Figura 4. Red de tuberías empleada en el modelo de cálculo.

d) Se corrigen los caudales mediante un método de Newton-Raphson

$$\Delta q_k = -\frac{f_k(q_k)}{f'_k(q_k)}$$

con

$$f'_k(q_k) = \sum_{j=1}^{n_b} b_{kj}^2 \left[2(\tau_j + \delta_2) |q_j| - \beta_j + 2\gamma_j q_j + 2\delta_{1j} \left| \frac{q_j}{A_j} - v_{VEH} \right| \right]$$

donde se ha supuesto que la pérdida de carga en los ventiladores F_j viene dada por la curva del ventilador

$$h_{Fj} = \alpha + \beta_j q_j + \gamma q_j^2$$

en la que h_{Nj} representa las contrapresiones actuando en los bocas. La variación de presión debido al efecto del tráfico será de la forma:

$$h_{TRAFFI} = \delta_1 (veh) \cdot \left(\frac{q_j}{A_j} - v_{VEH} \right) \left| \frac{q_j}{A_j} - v_{VEH} \right| + \delta_2 (veh) \cdot (q_j) |q_j|$$

con δ_1 y δ_2 funciones dependientes de las características del tráfico y de los vehículos que circulan por el túnel.

e) Se corrigen los valores de q_j y se repite el proceso hasta que se consiguen errores inferiores a una tolerancia prefijada.

En el caso de incendio el proceso es el mismo, incorporando a la formulación los términos de inercia y llevando a cabo el proceso iterativo para cada paso en el tiempo. En este caso existe la posibilidad de abrir las trampillas en el momento que se estime oportuno y hacer actuar los ventiladores de extracción.

Al respecto se han supuesto los siguientes intervalos de tiempo desde que se declara el incendio:

- Tiempo de apertura de trampillas: 5s.
- Tiempo de apagado de motores: 5 min
- Tiempo de cierre de semáforos: 3 min
- Tiempo actuación sobre aceleradores: 2 min
- Tiempo de arranque de aceleradores: 40 s
- Tiempo de inversión de aceleradores: 2 min
- Tiempo arranque ventiladores de aspiración de humos: 20 s.

El modelo de cálculo sigue siendo mono-dimensional en que las ecuaciones de transferencia (velocidad, entalpía, concentración, etc) están condicionadas por los términos fuente y por las condiciones de contorno. En general se tiene⁶

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

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 a lo largo de cada rama obligando a la condición de conservación cuando se llega a un nudo con varias ramas.

3. ALGUNOS RESULTADOS

En las figuras 5 y 6 se indican las distribuciones de presiones obtenidas en el tramo Sur-Norte con tráfico saturado y con tráfico rápido respectivamente.

En línea continua se indica la presión total, mientras que en trazos discontinuos se

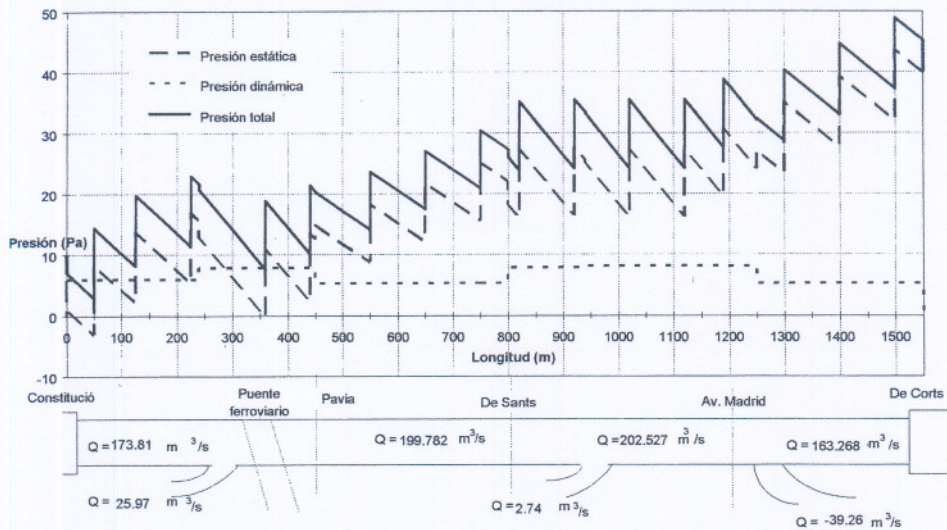


Figura 5. Distribución de presiones en régimen de servicio (tráfico saturado)

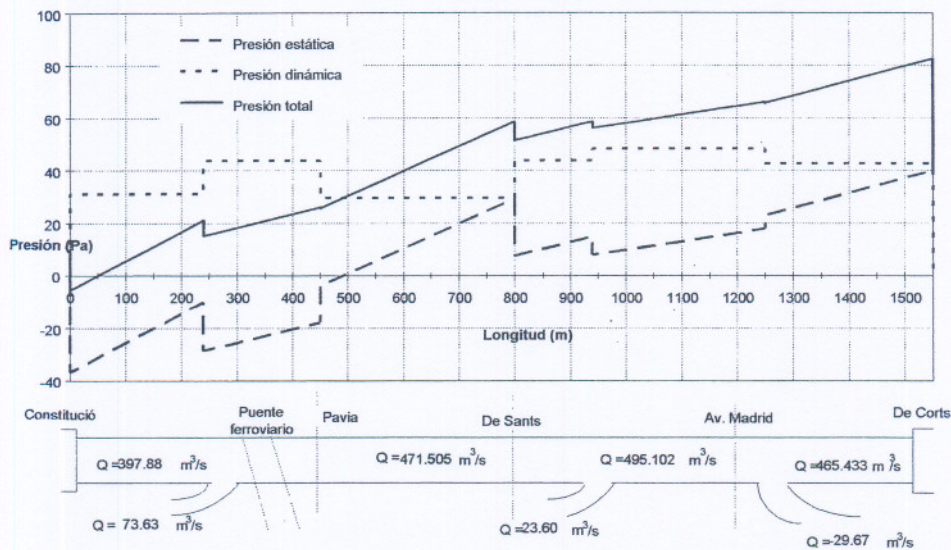


Figura 6 Distribución de presiones en régimen de servicio (tráfico rápido)

dibuja la presión estática y con puntos la presión debida a la velocidad. Se incluye también un diagrama en planta del túnel donde se indican los caudales circulantes por el túnel principal y por los accesos. El caso

corresponde a la presencia de una contra-presión debida a la velocidad. Se incluye también un diagrama en planta del túnel donde se indican los caudales circulantes por el túnel principal y por los accesos. El caso

En el primer caso es precisa la actuación de 16 aceleradores para vencer tanto la

resistencia de rozamiento en el túnel, como los coeficientes de arrastre de los vehículos retenidos.

Las discontinuidades observadas en la presión estática corresponden a la actuación de los aceleradores que, como se dijo más arriba, han sido colocados regularmente espaciados a lo largo del túnel. En el gráfico de presión dinámica se observan también escalonamientos que reflejan las distintas dimensiones de las secciones del túnel, con los correspondientes cambios de velocidad, así como las variaciones de caudal que se producen en los ramales de incorporación y salida. Se observan también las pérdidas ocasionadas en las bocas de entrada y salida.

En la figura 6 la situación se simplifica pues el efecto émbolo hace innecesaria la actuación de los aceleradores y tan sólo aparecen las discontinuidades originadas por los cambios de sección o las incorporaciones precipitadas.

Por lo que se refiere al régimen transitorio, en el cual se estudia la interrupción de tráfico con incendio, se presentan dos tipos de gráficas. La primera (figura 7) representa la evolución del aire en el interior del túnel mostrando el caudal de aire que pasa por un



Figura 7. Evolución de caudales

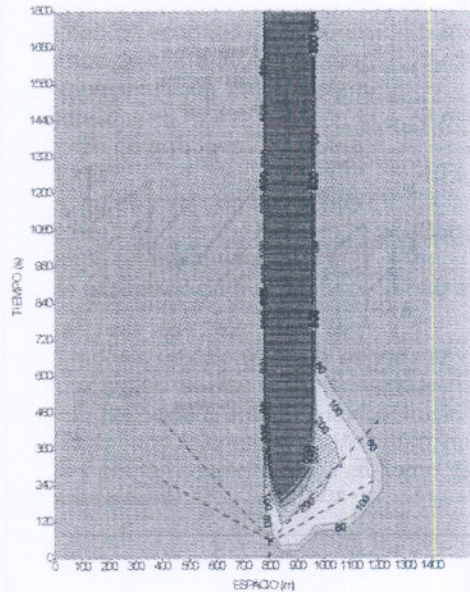


Figura 8. Confinamiento de la nube de humos.

punto al Sur de la extracción, al Norte de la extracción y por el propio conducto de extracción. En ellas se aprecia el efecto de la inversión aguas abajo del incendio (caudal negativo en Norte extracción), en el esfuerzo por confinar la nube de contaminantes.

La segunda gráfica representa la peligrosidad de la situación para un pasajero, mediante gráficos de isóneas de niveles de concentración de CO (análogamente se obtendrían las de concentraciones de humos) en una gráfica espacio-tiempo representativa del túnel principal (figuras 8). Una isónea más gruesa muestra el nivel admisible. También se pueden apreciar en estos gráficos las trayectorias de escape de los pasajeros, contenidas entre las líneas correspondientes a velocidades de 1 y 2 m/s, que consiguen escapar si la trayectoria se mantiene en niveles de concentración de contaminantes inferiores a los admisibles. En este caso la actuación sobre los ventiladores de chorro permite confinar la masa de contaminantes en los 250 metros correspondientes a las trampillas de extracción evitando su

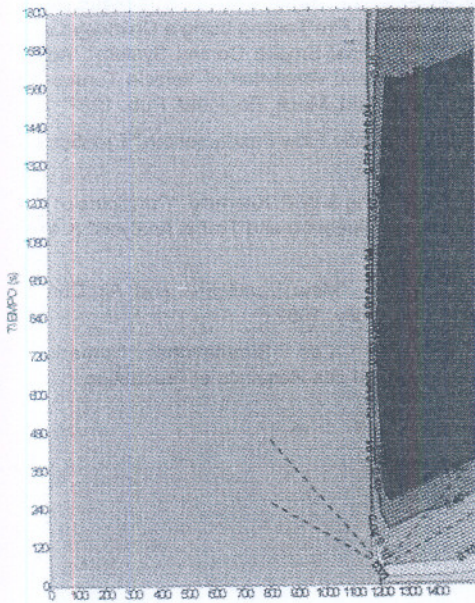


Figura 9. Evacuación por la boca.

disipación por todo el túnel. Puede apreciar-

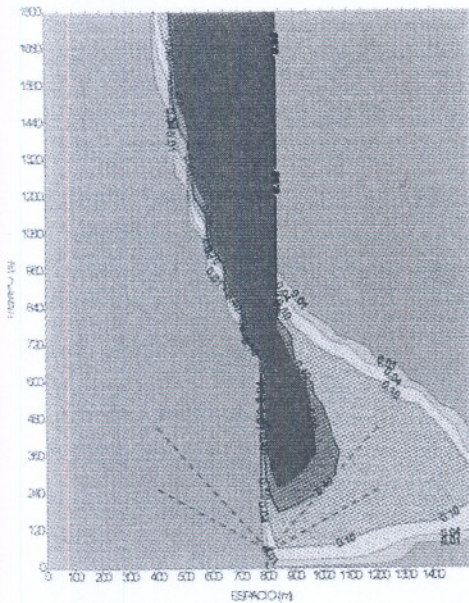


Figura 10. Coeficiente de extinción.

se la inversión de la nube sin que el viajero, en su huida, llegue a verse afectado por concentraciones superiores a los valores máximos admisibles.

La forma de actuación sobre los ventiladores de chorro puede ser modificada en función de la situación. Así, aunque la situación más desfavorable habitualmente sea de tráfico saturado en el interior del túnel, en caso de darse tráfico fluido puede ser conveniente expulsar la nube de contaminantes por una de las bocas del túnel (figura 9).

La versatilidad del sistema de control permite, en casos extremos, invertir rápidamente la nube de contaminantes. Como se puede ver en la figura 10, la inversión se logra, no sólo en la zona aguas abajo, sino que afecta también a la zona aguas arriba, ahora bien, transcurrido un tiempo suficiente para que los pasajeros ya no se encuentren en ese lugar. En caso de necesidad la actuación podría completarse, transcurrido un tiempo, de forma que con una nueva inversión la nube volviera a retroceder sobre el camino recorrido, permitiendo la actuación de los equipos de emergencia de la zona y la disminución de la intensidad del incendio.

4. CONCLUSIONES

En caso de incendio, la combinación de los sistemas de extracción mediante trampillas y la actuación mediante ventiladores de chorro facilita el control de la mancha de contaminantes. Esto resulta beneficioso, no sólo a la hora de garantizar la seguridad de los usuarios de los túneles urbanos, sino a efectos de facilitar la tarea de los equipos de salvamento o extinción del incendio. Este tipo de ventilación se muestra especialmente interesante en vías urbanas con problemas típicos de congestión, donde una estrategia adecuada de control es fundamental para el salvamento de los pasajeros. En este sentido se destaca la conveniencia de confinar la nube de humos actuando con los ventiladores longitudinales a la vez que se extrae por las trampillas.

5. AGRADECIMIENTOS

Se desea expresar explícitamente el agradecimiento de los autores a los ingenieros de **Barcelona Regional**, D. Juan Balta, D. Gaspar García y D. José Luis Esquerdo gracias a cuyo interés y confianza ha sido posible desarrollar este trabajo.

6. REFERENCIAS

1. R. López Guarga. "Proyecto de instalaciones del túnel de Somport" MOPTMA 1996
- 2.. Brouse & C. Moret. "ID-Computer Simulations and Field Fire Testing using a Chimney Limited Longitudinal Smoke Control System". Aerodynamics and ventilation of Vehicle Tunnels, de. J.R. Gillard, Mech. Engineer. Pub. 1997
3. May. "Traffic Flow Fundamentals" Prentice Hall, 1990
4. Mannering & W.P. Kilareski. "Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis" J. Wiley, 19990
5. Hartman. "Mine Ventilation and Air Conditioning". Wiley, 1982
6. Casalé. "Les Simulations Numeriques-Validation des Résultats et Précaution