SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FENÓMENO DEL BACKLAYERING EN EL TÚNEL MEMORIAL

Eduardo Blanco, Raúl Barrio

Universidad de Oviedo. Departamento de Energía. Asturias, España. Joaquín Fernández, Alfonso Marcos

Universidad de Extremadura. Departamento de IMEM. Escuela de Ingenierías Industriales, Badajoz, Extremadura, España.

Abstract

Road tunnels constitute key elements in the traffic net, especially for the long distance road transportation. In the case of fires, the control of the smoke propagation becomes crucial because the major risk for people is smoke inhalation rather than the direct exposure to the fire. However, research in this field has been limited by the inherent difficulties of the problem, and so there are few experimental data available. This paper presents a study on the control of the smoke propagation in road tunnels with a longitudinal air stream. The methodology is based on the numerical simulation of the time evolution of the air and smoke flows induced after the onset of localized fires of different magnitude. The general purpose of the paper is the refinement and contrast of a numerical procedure for the simulation of fire in tunnels with natural ventilation, as the particular case with the most complex and restrictive conditions, and the use of such procedure to study the backlayering phenomenon. The obtained results were compared with the natural and forced longitudinal ventilation tests of the Memorial Tunnel program as well as with available studies.

Keywords: road tunnels; smoke propagation; natural ventilation; backlayering; MTFVTP

Resumen

Los túneles son estructuras muy importantes para el transporte por carretera a grandes distancias. En el caso de producirse un accidente que provoque un incendio, el control de la propagación de humo es crucial, ya que el mayor riesgo para las personas es la inhalación de humo más que la exposición directa al propio fuego. Sin embargo, la investigación en este campo se encuentra limitada por las dificultades inherentes al problema, lo que origina una escasez de datos experimentales. En este artículo se presenta un estudio sobre la propagación de humo en un túnel de carretera con ventilación longitudinal. La metodología se basa en la simulación numérica de la evolución temporal de los flujos de aire y de humo originados tras el inicio de un incendio de una determinada potencia. El propósito general es contrastar y refinar dicha metodología para simular incendios en túneles con ventilación natural, ya que éste es el caso más complejo y con condiciones más restrictivas, y aprovechar este procedimiento para estudiar el fenómeno del *backlayering*. Los resultados obtenidos se compararon con los ensayos de ventilación longitudinal natural y forzada en el túnel Memorial, así como con estudios previos de otros autores.

Palabras clave: túneles de carretera; propagación de humo; ventilación natural; backlayering; MTFVTP

1. Introducción

Los túneles son estructuras muy importantes que facilitan el transporte por carretera a grandes distancias. Sin embargo, los incendios en los túneles de Mont Blanc (entre Francia e Italia) y Tauernes (Austria) en 1999, Gothard (Suiza) en 2001 y Fréus (entre Francia e Italia) en 2005 mostraron las consecuencias tan dramáticas que pueden causar los accidentes en túneles en términos de vidas humanas y daños materiales. Estadísticamente, el número de accidentes en los tramos de carretera que pasan por el interior de túneles es menor que en los tramos de carretera al aire libre. Sin embargo, en el caso de producirse un accidente que genere un incendio dentro de un túnel, las consecuencias son mucho más graves, y éstas se incrementan exponencialmente con la longitud del mismo. La escasez de vías de salida, la reducida visibilidad, la alta concentración de humo y gases tóxicos, así como las altas temperaturas alcanzadas, son algunas de las razones que producen estas situaciones tan dramáticas. La presencia de gases y partículas tóxicas en el humo es precisamente uno de los factores de mayor riesgo para la vida humana. Esta es la razón que obliga a utilizar buenos sistemas de ventilación en el interior de los túneles de carretera. Un sistema de ventilación adecuado mantiene libre de humo una región del túnel, lo cual asegura una buena visibilidad y permite la circulación de aire fresco; por otro lado, se debe expulsar el humo del túnel de la forma más rápida posible.

Una posibilidad para contener y expulsar el humo consiste en utilizar sistemas de extracción longitudinal con ventiladores de chorro. Este método dirige el humo exclusivamente hacia un lado a partir del punto de generación del incendio, lo que asegura la salud de las personas que se encuentran en el lado opuesto. El sistema, por tanto, es interesante para carreteras de un solo sentido, pero presenta limitaciones en carreteras de doble sentido. Además, una corriente de aire en sentido longitudinal mantiene el humo confinado sólo si se puede evitar el fenómeno del *backlayering*, esto es, la aparición de una capa de humo en la parte superior del túnel que invierte su sentido de circulación. Para evitar este fenómeno se debe asegurar una velocidad mínima de la corriente de aire, la cual es impuesta por el sistema de ventilación. Esta velocidad mínima se conoce como velocidad crítica, y su valor depende de varios factores: potencia y temperatura del incendio, geometría del túnel, pendiente, etc. Es importante conocer la magnitud de la velocidad crítica para así diseñar un sistema de ventilación adecuado, ya que velocidades excesivas pueden intensificar el fuego (al introducir más aire fresco) o romper la estratificación.

La velocidad crítica se suele determinar habitualmente mediante modelos empíricos (Lea, Bettis & Jagger, 1994; Kennedy, Gonzales & Sánchez, 1996; Wu et al., 1997; Lee & Ryou, 2005). Sin embargo, no existen aún datos experimentales suficientes para garantizar la generalización de estas correlaciones. En cuanto a los modelos numéricos, éstos van desde los más simples de una única ecuación hasta los que utilizan simulaciones CFD de doble capa pasando por modelos híbridos, que se presentan como una alternativa intermedia (Kunikane et al., 2002; Rigter, 2003; Hwang & Edwards, 2005). A pesar de que estos modelos han ayudado notablemente en el diseño, análisis y comprensión del fenómeno, todavía existe un conocimiento inadecuado de la interacción entre los productos de combustión, afectados principalmente por las fuerzas de flotabilidad, y la ventilación forzada, así como de la extrapolación de resultados a pequeña escala a otros de escala mayor, de la influencia de la pendiente en el movimiento del humo, y de la geometría del propio túnel, tal y como fue indicado hace ya más de una década por Grant et al. (1998).

Esta ausencia de una comprensión profunda de todos los fenómenos implicados ocasiona que las simulaciones CFD tengan un comportamiento aceptable cuando existe una ventilación forzada significativa. Sin embargo, las predicciones no son tan buenas cuando la ventilación es débil o no existe ventilación forzada. Esta última situación se conoce como ventilación natural, y constituye una de las pruebas más difíciles para cualquier modelo. El objetivo de este artículo es presentar un modelo numérico que fue desarrollado para simular la propagación de humo con ventilación natural en los ensayos llevados a cabo en el túnel

Memorial. El modelo se utiliza posteriormente para predecir la velocidad crítica con ventilación forzada.

2. Ensayos en el túnel Memorial y metodología

El Memorial es un túnel de carretera de 853 metros de largo y que presenta una pendiente del 3.2% desde la entrada sur a la norte. La sección del túnel es de 60.4 m² (ver Figura 1). Entre los años 1993 y 1995 se llevaron a cabo cerca de un centenar de pruebas que incluían ventilación natural y forzada, en lo que se conoce como *Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program*: MTFVTP. Para provocar los incendios se utilizó una fuente de calor generada a partir de la combustión de fueloil. La potencia del incendio se podía variar entre 10 y 100 MW. Se disponía de 1400 posiciones de medida distribuidas en 12 secciones transversales. En estas posiciones se obtuvo la temperatura, velocidad del aire y concentración de CO y CO_2 . Los resultados de los ensayos fueron publicados (MTFVTP, 1995) y constituyen hasta la fecha la base de datos más importante sobre incendios en túneles de carretera.



Figura 1. Vista de una de las entradas y sección transversal del túnel Memorial

La metodología propuesta consiste en la simulación numérica con un código comercial (Fluent) de la propagación de humo en incendios de una potencia determinada. Este código se utiliza para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, complementadas con un modelo multiespecie y de radiación, de forma no estacionaria (los detalles específicos se indicarán con posterioridad). Para desarrollar y verificar el modelo numérico se usará el ensayo 501 del túnel Memorial. Este ensayo tiene una potencia de 20 MW y no utiliza ventilación forzada durante los primeros 25 minutos.

El programa del MTFVTP incluía 15 ensayos con ventilación forzada longitudinal en los que se usaron fuentes de 10, 20, 50 y 100 MW y distintas velocidades de ventilación. A pesar de que no se realizaron pruebas específicas para estimar la velocidad crítica, en cada uno de los ensayos se detectó la presencia de *backlayering* y se dedujo la velocidad crítica para cada potencia Q de la fuente de calor. Los valores de velocidad crítica se corrigieron para tener en cuenta el estrechamiento del flujo en las secciones transversales de medida. Estos valores se utilizan en este artículo para contrastar la adecuación del modelo propuesto, en combinación con otras medidas (Wu et al., 1997) y modelos disponibles: Kennedy, Gonzales & Sánchez (1996), Hwang & Edwards (2005) y Kunsch (2002).

3. Modelo numérico

La geometría que se utilizó para desarrollar el modelo numérico se puede ver en la Figura 2. En esta geometría se definió una condición longitudinal de simetría para reducir el coste computacional. Cerca del portal sur (izquierda) y del norte (derecha) existe un falso techo. Se incorporó un bloque adicional en cada una de las salidas para simular una superficie horizontal sobre la que imponer una condición de contorno de presión.



Figura 2. Geometría del túnel y detalle de la zona del incendio

El código utilizado (Fluent) resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes (continuidad, cantidad de movimiento y energía) para flujo tridimensional y turbulento utilizando un método de volúmenes finitos. La fracción másica de cada especie se calcula mediante la resolución de una ecuación adicional de convección-difusión. Las fuerzas de flotabilidad se consideran a través de las fuerzas volumétricas y de presión reducida.

El incendio se simula como un sumidero de aire fresco que es fuente de calor y de humo. Dado que el objetivo principal de la investigación es estudiar el transporte de humo, el proceso de combustión no fue tenido en cuenta en las simulaciones (simplemente se añade una masa de combustible para mantener la continuidad). La producción de humo se tuvo en cuenta mediante el uso de un modelo multiespecie con aire limpio y CO₂. La generación de calor tiene lugar por el propio flujo de la masa de gas caliente. Los flujos másicos de aire y de gases calientes se calcularon con las siguientes expresiones:

$$\dot{m}_{\rm g} = \frac{Q}{C_{\rm p} \left(T_{\rm g} - T_{\rm amb} \right)}; \tag{1}$$

$$\dot{m}_{\rm aire} \cong \dot{m}_{\rm g} - \frac{1}{3} \dot{m}_{\rm CO_2} \,, \tag{2}$$

donde Q es la potencia del incendio, C_p es el calor específico de la mezcla, T_g es la temperatura de los gases de combustión y T_{amb} es la temperatura en las proximidades del incendio. La estimación de la masa de aire en la ecuación (2) se hace mediante un análisis estequiométrico de la reacción de combustión de los hidrocarburos típicos. Este tipo de enfoque proporciona unos resultados peores en las proximidades de la fuente de incendio, principalmente en lo que se refiere al calor radiado a las paredes adyacentes, pero ha demostrado una buena concordancia con los datos experimentales (véase por ejemplo Malhotra, 1995). Únicamente la cantidad de CO₂ presente en el humo tiene relevancia en la

resolución del transporte de especies, ya que el resto de componentes presentes se puede obtener como un porcentaje de la masa de CO₂ (PIARC, 1999).

La geometría de la fuente de incendio está formada por un paralelogramo hueco de 3 m de largo, 1.5 m de ancho (3 m si se tiene en cuenta la simetría) y 0.9 m de alto, tal y como se muestra en el detalle de la Figura 2. En la cara superior se impone un determinado flujo másico de gases calientes. En los laterales, en cambio, se impone un flujo de entrada a temperatura inferior para tener en cuenta el aire consumido por el fuego para mantener la combustión, de la forma explicada en el párrafo anterior. En la Tabla 1 se muestran los valores usados para cada potencia de incendio simulada. Estos valores se han seleccionado de acuerdo a las indicaciones de PIARC (1999).

Q (MW)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	<i>Т</i> _g (К)	V _g (m/s)	V _{asp} (m/s)
10	1600	3.2	600	11.75	3.00
20	2300	4.6	650	10.80	3.89
50	2700	5.4	810	9.57	3.87
100	3500	7.0	1300	7.98	2.33

Tabla 1. Parámetros de la fuente del incendio

El dominio de cálculo se discretizó con una malla triangular no estructurada en sentido transversal y estructurada en sentido longitudinal. Este tipo de discretización originó celdas con forma de paralelepípedo, de un tamaño que varía entre 0.02 m^3 en las proximidades de la fuente del incendio y 0.5 m^3 en las zonas más alejadas (en las que no existen gradientes en sentido transversal). Esta estructura permite disponer de celdas relativamente pequeñas en las proximidades del fuego y de celdas de mayor tamaño a mayor distancia, lo cual ayuda a reducir el tiempo de cálculo. Antes de realizar el conjunto de simulaciones se llevó a cabo un análisis de sensibilidad del mallado. El tamaño de la malla elegida para los cálculos finales es de $6 \cdot 10^5$ celdas, aunque se pudo comprobar que los resultados parciales obtenidos con la mitad de celdas eran prácticamente idénticos. En la Figura 3 se muestra una vista interior del túnel con el detalle del paralelepípedo que simula la fuente de calor.

Figura 3. Perspectiva del mallado en el túnel y detalle de la fuente de calor



Inicialmente se probaron distintas variantes del modelo *k*-epsilon y también el modelo de las tensiones de Reynolds (RSM) para simular la turbulencia. Apenas se encontraron diferencias entre los resultados para distancias superiores a la decena de metros desde la

fuente. El modelo de turbulencia *k*-omega se seleccionó finalmente tras comprobar que presentaba un equilibrio adecuado entre coste computacional y precisión de los resultados. Las condiciones de contorno en los portales son de presión atmosférica constante para las pruebas de ventilación natural y de flujo másico y presión constantes para las pruebas de velocidad crítica. En este caso, el flujo másico se aumentaba progresivamente hasta que el *backlayering* desaparecía. Para discretizar los términos convectivos y difusivos se utilizó un esquema de segundo orden; el acoplamiento entre presión y velocidad se estableció con el método SIMPLEC.

La pendiente del túnel no está definida explícitamente en la geometría del modelo, sino que se tuvo en cuenta al imponer el sentido de la gravedad en las fuerzas volumétricas. La densidad del aire exterior se utilizó como referencia para calcular el cambio en la presión atmosférica debido a la distinta altitud de los portales. La conducción de calor en las paredes se calculó a partir de la transmisión de calor a través de las rocas en dirección perpendicular (esto es, con una única ecuación). De forma adicional, se incluyó cierta disipación y pérdidas de calor en las secciones transversales de medida para refinar los resultados, en concordancia con los datos proporcionados por el MTFVTP (1995).

La simulación del calor radiado fue uno de los puntos más conflictivos. Los modelos más simples que se proponen en la bibliografía (por ejemplo en PIARC, 1999) presentan errores sustanciales tanto en la temperatura como en la extensión del humo en las zonas más próximas al fuego. Se probaron distintos modelos de radiación y se comprobó que los mejores resultados se obtuvieron con un modelo de medio ópticamente denso (modelo de Rosseland o de aproximación difusa) con un valor de 5 para el coeficiente de absorción adimensional (Choi et al., 1994).

El paso temporal elegido para llevar a cabo las simulaciones no estacionarias fue de 1 s. Previamente se probaron algunos pasos temporales de menor magnitud, y se pudo observar que los resultados obtenidos era prácticamente idénticos. Como criterio de convergencia se fijó una magnitud de los residuos por debajo de 10⁻⁵. El tiempo total simulado fue de 1600 s.

4. Contraste experimental y resultados

En las Figuras 4 y 5 se muestra la distribución de temperatura en la dirección longitudinal para la simulación con ventilación natural (prueba 501 en el túnel Memorial). Tal y como se aprecia, el humo se expande en ambas direcciones durante el primer minuto y medio; sin embargo, la pendiente del túnel provoca una mayor concentración en las proximidades del techo de la zona sur (pendiente descendente). Aproximadamente a unos 150 s desde el inicio del incendio se establece el efecto chimenea, con lo que el humo ya no alcanza el portal sur. El flujo de humo es forzado a fluir pendiente arriba hacia el portal norte, y se expande de tal forma que llega a ocupar toda la altura del túnel. El aire fresco es atraído desde el portal sur. El régimen estacionario se alcanza aproximadamente tras diez minutos del inicio del incendio, observándose cambios posteriores de muy pequeña magnitud.

Figura 4. Distribución de temperatura al comienzo del ensayo 501. Resultados para una extensión de 200 m en las cercanías de la fuente de calor. La pendiente es ascendente de derecha a izquierda.



Figura 5. Distribución de temperatura durante el ensayo 501. Resultados para la extensión completa del túnel. La pendiente es ascendente de derecha a izquierda.



Esta situación final se compara en la Figura 6. Las secciones transversales 302 y 304 se encuentran situadas pendiente abajo del incendio (es decir, en la zona sur) a 120 y 75 m respectivamente, mientras que las secciones 208 (a 190 m) y 209 (a 300 m) están localizadas pendiente arriba. Como se aprecia, la concordancia global es bastante buena, aunque se observan ciertas discrepancias de velocidad en las cercanías del techo de la sección 302. Ello es debido a que esta sección se encuentra pendiente abajo en el límite de la región de humo, y también porque el humo se extiende 15 m más en las simulaciones que en los ensayos experimentales. De igual forma, se puede apreciar que las temperaturas alcanzadas en la región inferior de la sección 304 son mayores en las pruebas experimentales. Esto puede ser debido a la radiación directa que proviene de las llamas.





Una vez contrastado, el modelo se utilizó para estimar la velocidad crítica necesaria para evitar el *backlayering*. Para ello se realizaron ensayos con cuatro potencias de incendio: 10, 20, 50 y 100 MW. En cada caso se impuso como condición de contorno un caudal másico de aire fresco constante en el portal norte y una presión atmosférica constante en el portal sur. Se simularon distintos caudales másicos hasta que el flujo reverso de humo se restringía a menos de 30 m pendiente arriba del punto de incendio. Se escogió este límite debido a que la velocidad se incrementa bruscamente para valores menores.

En la Figura 7 se representa la fracción másica de CO₂ en las cercanías del incendio para una potencia de 50 MW y distintas velocidades. Se puede observar que únicamente una pequeña lengua de humo permanece pendiente arriba con las velocidades más altas. Por otro lado, el flujo pendiente abajo se ve severamente afectado, puesto que se aprecia que la estratificación en las proximidades del incendio visible en las Figuras 4 y 5 se ha roto, y que el humo ocupa la altura total del túnel. De forma adicional, también se puede observar una especie de onda estacionaria, aunque este fenómeno no ha sido estudiado con más profundidad.

Figura 7. Contornos de la fracción másica de CO₂ para el ensayo de 50 MW a distintas velocidades de ventilación. Los resultados mostrados corresponden a una zona de 45 m alrededor del fuego. La pendiente es ascendente de derecha a izquierda.



En la Tabla 2 se comparan las velocidades críticas estimadas a partir del modelo con las publicadas en el informe de las pruebas en el MTFVTP (1995). Estos mismos valores se comparan en la Figura 8 con los experimentos de Wu y Bakar (1997), con los modelos desarrollados por Kennedy et al. (1996) y Kunsch (2002), y con las simulaciones de Hwang y Edwards (2005). La velocidad crítica y la potencia del incendio se representan como valores adimensionales, de acuerdo con Hwang y Edwards (2005) y Malhotra (1995), donde u_e representa la velocidad en la entrada del túnel, *H* la altura del mismo y las variables con subíndice 0 se refieren a condiciones ambientales.

Q (MW)	Modelo, V _{cr} (m/s)	MTFVTP, V _{cr} (m/s)	
10	2.3	2.18	
20	2.8	2.60	
50	3.6	2.82	
100	4.2	2.85	

Tabla 2. Velocidad crítica en las simulaciones y en las pruebas del Memorial

Tal como se observa en la Figura 8, se ha encontrado que la velocidad crítica permanece prácticamente constante para potencias de incendio altas. Los valores tan elevados que se obtienen con el modelo propuesto son causados por la temperatura y el flujo másico utilizado para simular el fuego. A pesar de que estos valores se han encontrado de forma experimental, no tienen en cuenta el efecto de la ventilación forzada. Es necesario por tanto un estudio más detallado para llegar a la correlación adecuada, ya que la relación entre la temperatura máxima y el flujo másico en la zona del incendio es muy compleja cuando se fuerza la circulación de aire fresco en las proximidades de la fuente.



Figura 8. Comparación de la velocidad crítica en distintas pruebas y simulaciones.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado un modelo numérico para simular la propagación de humo en túneles de carretera con ventilación natural longitudinal. Las predicciones del modelo se han contrastado con resultados experimentales procedentes de ensayos en el túnel Memorial. El contraste mostró un buen acuerdo en el caso de ventilación natural. El modelo se empleó con posterioridad para estimar la velocidad crítica necesaria para evitar el fenómeno del *backlayering* con ventilación forzada longitudinal. Las estimaciones se compararon con los resultados obtenidos en las pruebas experimentales y con otros datos y modelos existentes en la bibliografía. Se encontró que los valores de velocidad crítica estimados para potencias de incendio elevadas se pudo observar que el modelo sobreestimaba la velocidad crítica. Por tanto, los valores de la temperatura y de los flujos másicos impuestos en la fuente del incendio se deben compensar para tener en cuenta el efecto de la ventilación.

Referencias

- Choi, M. Y., Mulholland, G. W., Hamins, A., & Kashiwagi, T. (1994, October). Experimental Study of the Optical Properties of Soot and Smoke. *Annual Conference on Fire Research*. Symposium conducted at The National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Grant, G. B., Jagger, S. F., & Lea, G. J. (1998). Fires in Tunnels. *Philosophical Transactions* of the Royal Society of London, 356, 2873-2906.
- Hwang, C. C., & Edwards, J. C. (2005). The Critical Ventilation Velocity in Tunnel Fires. A Computer Simulation. *Fire Safety Journal*, *40*, 213-244.
- Kennedy, W. D., Gonzales, J. A., & Sánchez, J. G. (1996). Derivation and Application of the SES Critical Velocity Equations. *ASHRAE Transactions: Research*, *102*(*2*), 40–44.
- Kunikane, Y., Kawabata, N., Yamamoto, N., Takekuni, K., & Shimoda, A. (2002). Numerical Simulation of Smoke Descent in a Tunnel Fire Accident. *Proceedings of 4th International Conference on Tunnel Fires* (pp. 357-366). Switzerland: ITC Conferences Ltd.

- Kunsch, J. P. (2002). Simple Model for Control of Fire Gases in a Ventilated Tunnel. *Fire Safety Journal*, 37, 67-81.
- Lea, C. J., Bettis, R. J., & Jagger, S F. (1994). *A Review of Available Data and Models for Tunnel Fires* (The Health and Safety Laboratory Report IR/L/FR/94/12). U. K.: The Health and Safety Executive.
- Lee, S. R., & Ryou, H. S. (2005). An Experimental of the Effect of the Aspect Ratio on the Critical Velocity in Longitudinal Ventilation Tunnel Fires. *Journal of Fire Sciences*, 23, 119-138.
- Malhotra, H. L. (1995). Goods Vehicle Fire Test in a Tunnel. *Proceedings of the 2nd International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels* (pp. 237-244). Spain.
- Massachusetts Highway Department. (1995). *Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program*. Test Report, Boston, MA.
- PIARC. (1999). *Fire and Smoke Control in Tunnel Fires* (PIARC committee on road tunnels (C5) 05.05.B). P. I: PIARC.
- Rigter, B. P. (2003, July). Two-layer Theory Applied to the Phenomenon of Backlayering. 11th International Symposium on Aerodynamics & Ventilation of Vehicle Tunnels, Luzern, Switzerland.
- Wu, Y., Bakar, M. Z., Atkinson, G. T., & Jagger, S. (1997, October). A Study of the Effect of Tunnel Aspect Ratio on Control of Smoke Flow in Tunnel Fires. 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Eduardo Blanco Phone: +34 985 182 103 Fax: +34 985 182 098 E-mail: eblanco@uniovi.es URL: