

SIMULACIÓN DE INCENDIO EN TÚNELES LARGOS DE FERROCARRIL.

ESTRATEGIAS DE ESCAPE

LUIS FORT LÓPEZ-TELLO. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
NECSO, España

PATRICK CHASSE. Ingénieur des Ponts et Chaussées
CETE Méditerranée, Francia

RESUMEN: Para un proyecto de comunicación ferroviaria a gran velocidad, se ha estudiado en una alternativa con túneles de doble vía, "Alternativa Paraíso", la estrategia de explotación del tramo afectado en caso de accidente, con ayuda del programa TRANSIT de modelización de incendio en redes subterráneas complejas. El tramo comprende tres túneles principales integrantes del nuevo acceso ferroviario propiamente dicho, infraestructura TAV (Tren Alta Velocidad), conectados mediante galerías a otros paralelos de carácter auxiliar, infraestructura VAL (Vehículo Auxiliar Ligero). Las diferentes simulaciones realizadas tienen en cuenta el efecto "chimenea" debido a las condiciones meteorológicas en las bocas de los túneles, el efecto "pistón por cruce de otro tren y una potencia de incendio que alcanza 50 MW en 20 minutos. De los 48 escenarios definidos, se han analizado seis, que han permitido deducir de las simulaciones correspondientes, las estrategias de evacuación a recomendar, para su inserción en el "Manual de Seguridad de Explotación", y para la incorporación automática de las medidas a adoptar en el sistema de seguridad de explotación del trayecto.

PALABRAS CLAVE: ALTA VELOCIDAD, TÚNEL, FERROCARRIL, INCENDIO, ESCAPE

On an alternative with double track tunnels, called "Paradise Alternative", for a high speed train project, consideration has been given to an operation strategy of the section of railway affected by an accident, with the help of the TRANSIT program, with is used to model fires in complex underground networks. The stretch includes the three main tunnels that make up the new railway acces proper, the high speed train infrastructure (TAV), linked by means of galleries, to other parallel auxiliary tunnels, VAL infrastructure (Light Auxiliary Vehicle). The different simulations performed take into account the "chimney" effect caused by the weather conditions around the tunnel entrances, the "piston" effect, caused by crossing of another train and a fire power that reaches 50 MW in 20 minutes. Out of the 48 defined scenarios, six have been assessed. From the relevant simulations, the scape strategies to be recommended were determined, so that they be included in the Operation Safety Manual and automatically incorporated to be taken in the operation safety system of section.

KEYWORDS: HIGH-SPEED, TUNNEL, RAILWAY, FIRE, SCAPE

1. INTRODUCCIÓN

Las simulaciones de incendio en la Alternativa Paraíso de este trayecto ferroviario han sido realizadas con el programa TRANSIT del CETU (Centre d'Etudes des Tunnels), que es un código de cálculo 1 D que permite simular en forma transitoria, situaciones de incendio en túneles de redes ramificadas ó malladas⁽¹⁾.

Próximo al 50% del recorrido entre agujas de los PAET (Puesto de Adelantamiento y Estacionamiento de trenes) que limitan este trayecto (Fig. 1), se desarrolla en túnel, con tres longitudes respectivas 10.240 m (túnel 1), 1.850 m. (túnel 2) y 6.100 m. (túnel 3). Cada uno de estos túneles consta de un tubo principal (infraestructura TAV), con una sección libre de 86 a 101 m² y de un tubo auxiliar (infraestructura TAV), con una sección libre de 23 m² para la evacuación de

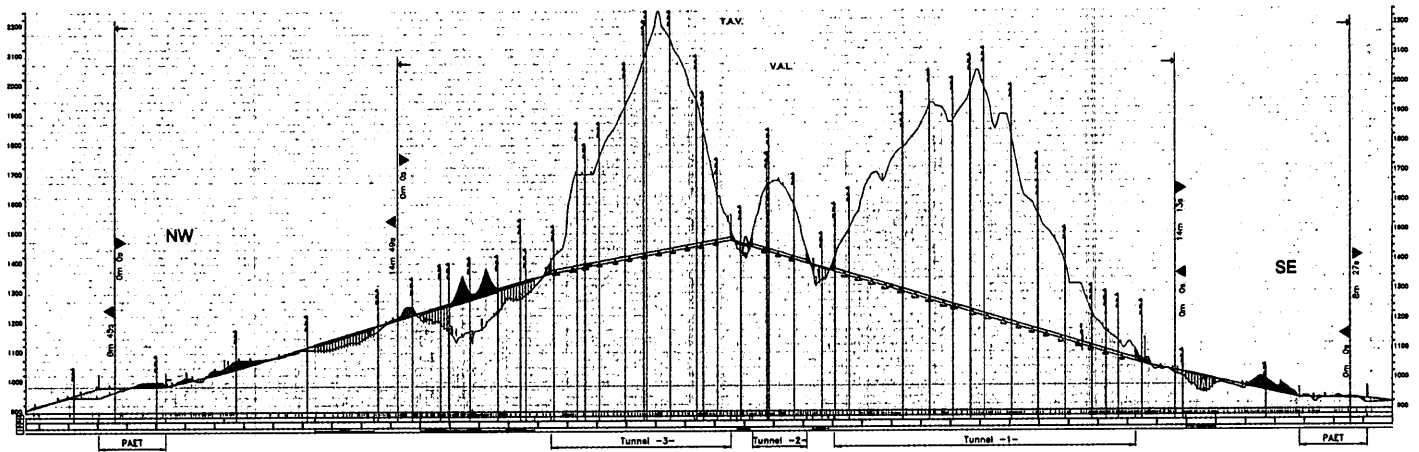


Figura 1. Perfil del trayecto.

pasajeros en caso de accidente, que comunica con el tubo principal mediante galerías de 12 m² de sección libre espaciadas cada 500 m. (Fig. 2). Las pendientes de los tubos son respectivamente de 3,00%, ascendente sentido SE-NW (túneles 1 y 2) y de -1,82%, descendente sentido SE-NW (túnel 3).

Los túneles están equipados con ventilación mecánica constituida en cada uno por una estación Saccardo situada entre los tubos, en su punto medio, y por aceleradores dispuestos entre las galerías de comunicación en toda la longitud.

Las simulaciones tienen por objeto examinar las condiciones de evacuación de los pasajeros a través de las galerías de socorro para diferentes escenarios de incendio y diferentes condiciones meteorológicas y de cruce eventual de un tren.

2. PRINCIPIOS DE MODELIZACIÓN

Para cada túnel, el modelo integra el tubo principal, la galería de socorro por donde debe hacerse la evacuación de los pasajeros y el tubo auxiliar. Los tubos se descomponen en tramos, en el principal, tantos como espacios entre

galerías de socorro más los de conexión con la estación Saccardo, y en número menor en el tubo auxiliar al no ser tan necesaria la precisión en la predicción de la propagación de humos.

El fuego se representa por una fuente volumétrica de calor inyectada en el centro del tramo donde el tren incendiado se detiene (depende del escenario, Tabla n.º. 1). La potencia volumétrica de calor se supone aumenta progresivamente en forma lineal de 0 a 50 MW en 20 minutos.

Los efectos meteorológicos que crean una corriente de aire longitudinal (efecto chimenea) mantenida durante toda la simulación se representan por una diferencia de presión constante entre los dos portales del túnel, que se aplica tanto al tubo principal como al tubo auxiliar.

Las situaciones climáticas medias de diferencias mínimas o máximas, a estos efectos, entre las bocas de cada uno de los túneles, deducidas del análisis de las series estadísticas de variables climáticas de las estaciones meteorológicas más próximas, con las correcciones de altitud y orientación que corresponden a cada una de ellas, dan lugar a las siguientes velocidades límites, tenidas en cuenta en las simulaciones efectuadas.

Velocidades límites por efecto chimenea (m/s)

Túnel 1	+5,0/ +2,5
Túnel 2	+8,5/ +5,0
Túnel 3	+4,0/ ±0,00/ -3,0
+	= Sentido SE → NW
-	= Sentido NW → SE

El efecto dinámico originado en el túnel por el cruce de un tren ha sido estudiado previamente, para este mismo proyecto⁽²⁾. Se deduce de este estudio que el cruce de un tren genera una corriente de aire que con una velocidad próxima a los 5 m/s. se mantiene durante cuatro a seis minutos, según la longitud del Túnel.

Figura 2. Sección transversal.

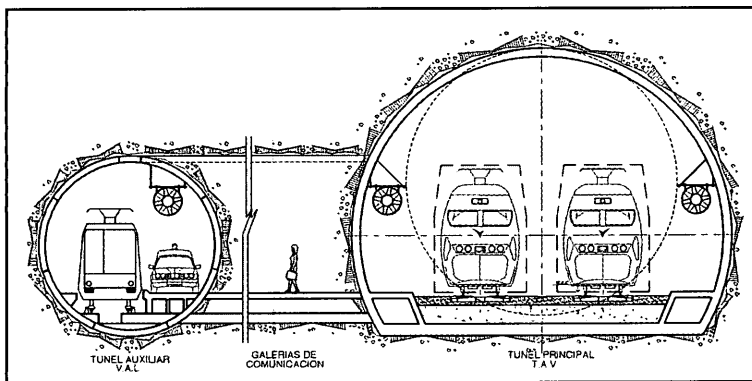


TABLA 1. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS POR CAMPOS DE IDENTIFICACIÓN

A	B	C	D		
Túnel nº 1 (Tu 1) Túnel nº 2 (Tu 2) Túnel nº 3 (Tu 3)	Zona Extremo Sur (ZES)	Sentido NW ←NW	[	Incendio en cabeza (I_o)	E1, 19, 31
				Incendio en zona central (I_m)	E2, 20, 32
		Sentido SE →SE	[	Incendio en cabeza (I_o)	E4, 22, 34
				Incendio en zona central (I_m)	E5, 23, 35
	Zona Central (ZC)	Sentido NW ←NW	[	Incendio en cola (I_f)	E3, 21, 33
				Incendio en cabeza (I_o)	E7, -, 37
		Sentido SE →SE	[	Incendio en zona central (I_m)	E8, -, 38
				Incendio en cola (I_f)	E9, -, 39
	Zona Extremo Norte (ZEN)	Sentido NW ←NW	[	Incendio en cabeza (I_o)	E10, -, 40
				Incendio en zona central (I_m)	E11, -, 41
		Sentido SE →SE	[	Incendio en cola (I_f)	E12, -, 42
				Incendio en cabeza (I_o)	E13, 25, 43
Sentido NW ←NW	[	Incendio en zona central (I_m)	E14, 26, 44		
		Incendio en cola (I_f)	E15, 27, 45		
Sentido SE →SE	[	Incendio en cabeza (I_o)	E16, 28, 46		
		Incendio en zona central (I_m)	E17, 29, 47		
			Incendio en cola (I_f)	E18, 30, 48	

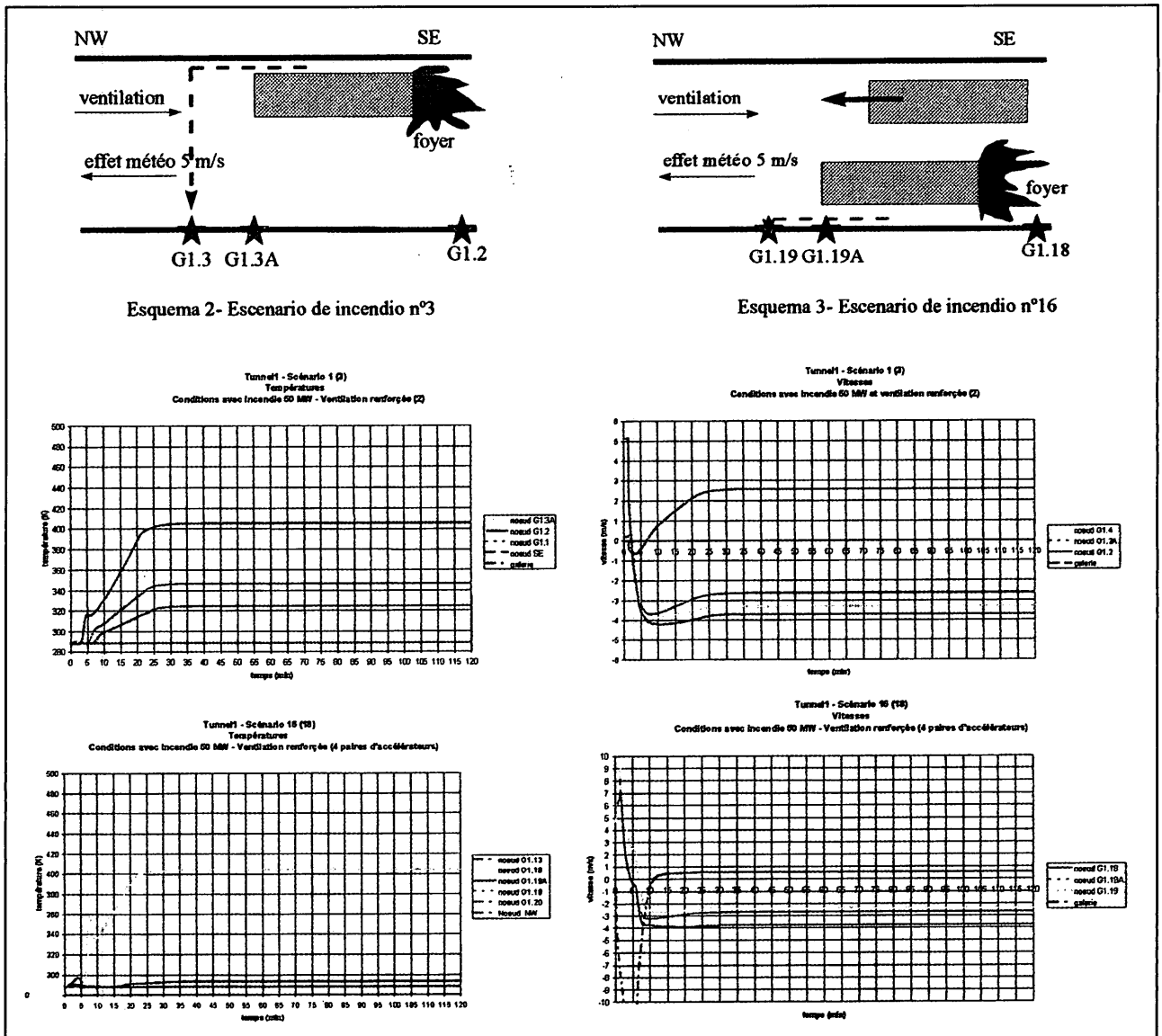
3. ESCENARIOS DE INCENDIO MODELIZADOS

De los 48 escenarios de incendio definidos (Tabla nº. 1) se han seleccionado para su modelización los seis más desfavorables (dos por túnel) desde el punto de vista de estrategia de evacuación.

En función de la localización del fuego (cabeza ó cola de tren), el punto de parada del tren incendiado y la posibilidad o no de cruce de otro tren, elementos que identifican el escenario considerado, se elige una estrategia de evacuación de pasajeros y un sentido de soplado para la ventilación. La dirección elegida para empujar los humos permite determinar la galería de socorro que será utilizada para la evacuación de pasajeros. Las condiciones meteorológicas y el cruce eventual de un tren han sido elegidos para crear las condiciones más desfavorables para la ventilación (efecto chimenea incluido).

La gestión temporal de cada escenario ha sido reglada de forma similar para cada uno de ellos. En el instante $t = 0$, el tren incendiado se detiene en el emplazamiento predeterminado y la potencia del incendio comienza a crecer de 0 a 50 MW durante 20 minutos, para estabilizarse durante 2 horas. Las condiciones iniciales dependen de las hipótesis hechas sobre las condiciones meteorológicas, también predeterminadas con el escenario, al elegir de entre las estadísticamente posibles y compatibles las de combinación más desfavorable con el cruce ó no de un tren. Si la hipótesis de cruce de tren se considera, su efecto se traduce en una corriente de aire de 5 m/s. durante alrededor de 5 minutos. En el instante $t = 1$ min. y 30 seg. la entrada del túnel se cierra a los otros trenes, así como las galerías de socorro, salvo la que sirve a la evacuación de pasajeros. La ventilación de refuerzo entra en funcionamiento en el sentido elegido para el escenario considerado.

Figura 3.
Túnel 1.
Escenarios
de accidente.



A continuación se describen los escenarios modelizados y los resultados obtenidos.

Túnel 1
Escenarios de incendio n°s. 3 y 16.

En la Figura 3 se presentan los esquemas con la localización de los escenarios en el túnel en los que se indican los nodos del programa TRANSIT donde se hace el análisis de velocidades y temperaturas del aire en el túnel, así como los gráficos en los que se recoge la evolución de velocidades y de temperaturas en función del tiempo en puntos característicos.

En ambos escenarios se han efectuado nuevas hipótesis de ventilación, resultando necesario poner en marcha la estación Saccardo con su capacidad inicial de diseño (460 m³/s + 125 m³/s), reforzándola con el empuje de una pareja de acelera-

dores cada 500 m. en el Escenario 3 y cada 125 m. en el Escenario 16, en toda la longitud del túnel, en sentido NW → SE en ambos casos.

La corriente de aire invertida se estabiliza, en estas condiciones, a una velocidad de -2,61 m/s y de -2,68 m/s respectivamente, muy próxima a la velocidad crítica 2,85 m/s.

Se deduce pues, que con las capacidades indicadas de ventilación, se llega a empujar los humos hacia el portal SE y a permitir la evacuación de pasajeros por la galería G 1.3 (Escenario 3) ó por la G 1.19 (Escenario 16). Es de notar que la evacuación no puede realizarse antes de la inversión completa de la corriente natural de aire por efecto chimenea y el retorno de los humos que hayan podido ser enviados hacia el portal NW al principio. En las condiciones más desfavorables esta situación puede tardar en producirse hasta 5 min. y 10 min., respectivamente.

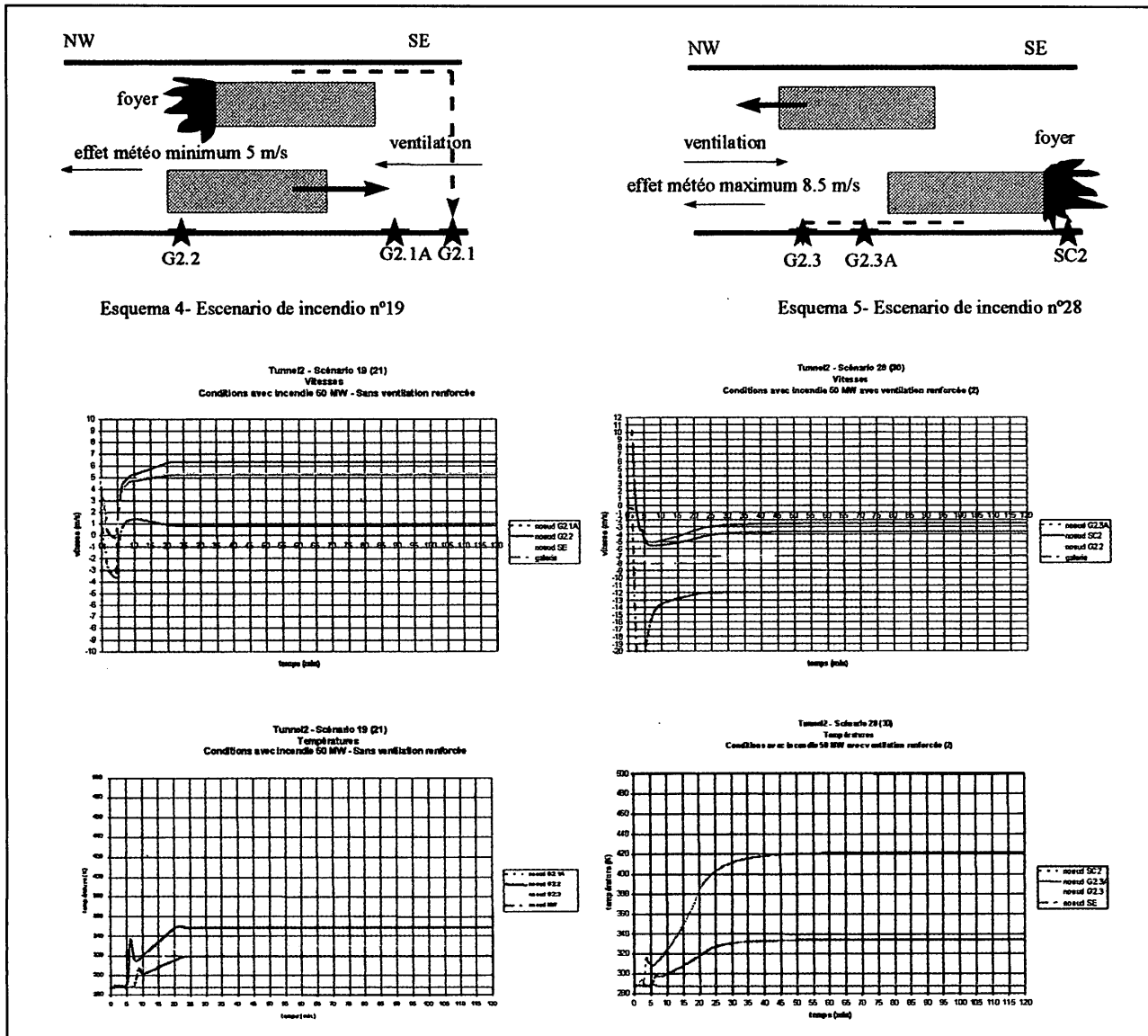


Figura 4. Túnel 2. Escenarios de accidente.

La temperatura en las zonas de túnel inmediatas al incendio se eleva hasta unos 130° C, pero permanece prácticamente sin alteración notable en aquellas otras próximas a la galería de evacuación y en esta misma.

El tiempo máximo de espera para la llegada del primer tren de auxilio VAL (suficiente para las composiciones TAV de 200 m.) es de 6m 22s y de 11m 18s para el segundo tren de auxilio (necesario para la evacuación de las composiciones TAV de 400 m.)

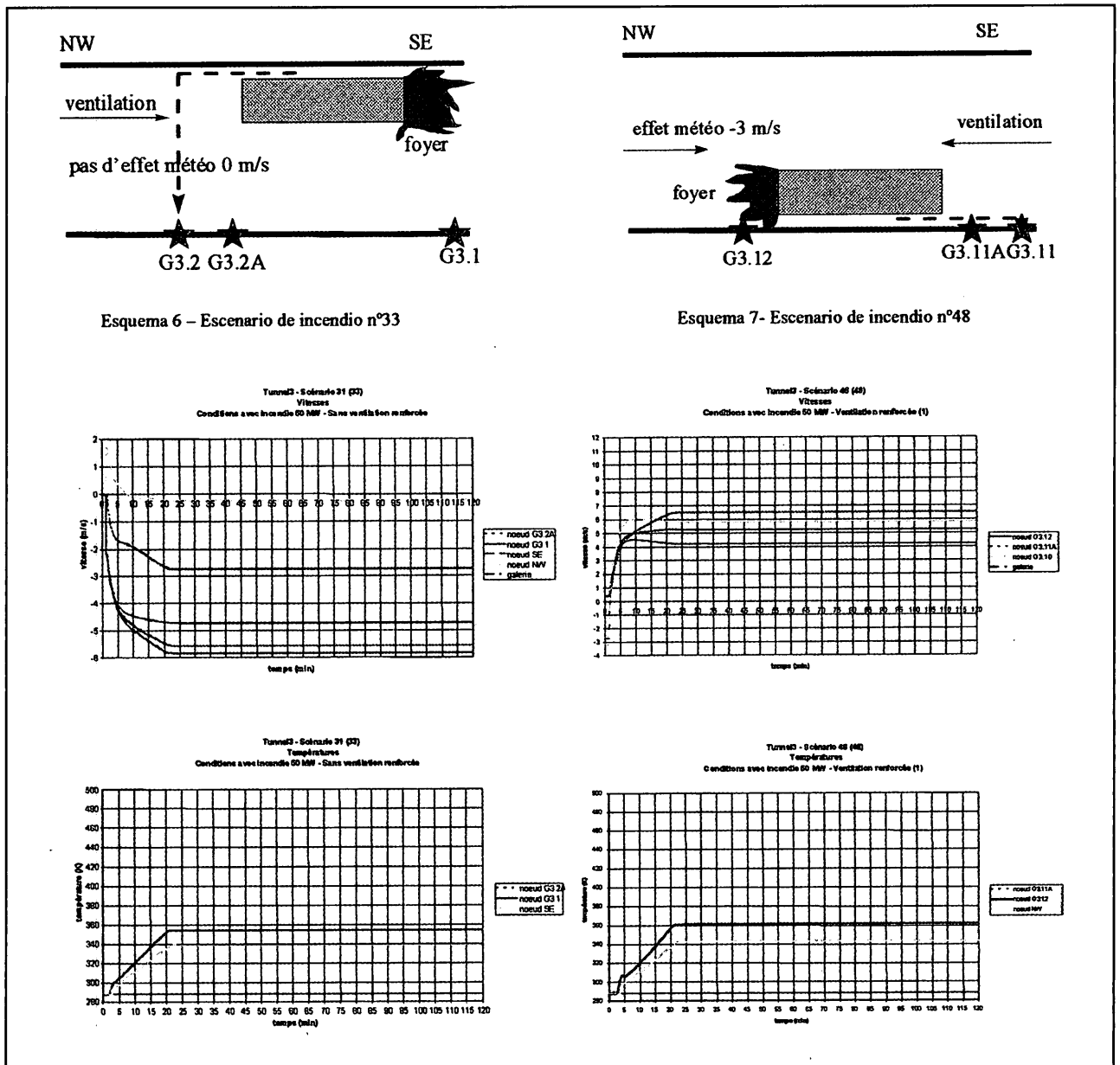
El tiempo total de evacuación de trenes circulando en sentido NW → SE, (lado próximo a las galerías de socorro, p. ej. Escenario 16), calculado según la NFPA es en la situación más desfavorable de parada entre galerías de unos 9 min. y el de aquellos que se accidenten cuando circulan en sentido SE → NW (lado opuesto a las galerías, p. ej. Escenario 3) puede llegar a ser en idénticas hipótesis de 11 a 12 min.

Quiere decir que, en cualquier circunstancia los trenes de rescate llegarán, por la infraestructura VAL, a la localización de la galería de socorro que se utilice para la evacuación 2 a 7 min. antes de que termine ésta, lo cual sucederá en las situaciones más desfavorables a los 17 a 19 min. de iniciarse el incendio, llegando el tren de auxilio con los pasajeros rescatados de la rama TAV accidentada, a la estación de la infraestructura de rescate VAL más alejada (lado NW) antes de los 30 min. de haber comenzado el fuego.

Túnel 2
Escenarios de incendio nºs. 19 y 28

De forma similar a los del Túnel 1, la Figura 4 presenta los esquemas de localización de los escenarios, con los nodos en los que se efectúa el análisis de velocidades y tempe-

Figura 5. Túnel
3. Escenarios
de accidente.



raturas del aire en el túnel, e igualmente los gráficos de evolución de éstas en función del tiempo.

En los gráficos se constata la influencia del cruce del tren hasta el instante $t = 4,5$ min. En el escenario 19, pasados estos primeros minutos, la velocidad del aire en la zona del túnel por donde se realizará la evacuación (hacia la galería G 2.1) se estabiliza, con funcionamiento a plena capacidad de la estación Saccardo ($260 \text{ m}^3/\text{s} + 60 \text{ m}^3/\text{s}$) en $5,22 \text{ m/s}$, muy superior a la velocidad crítica $2,55 \text{ m/s}$, siendo prácticamente suficiente la ventilación natural. La elevación de temperatura en esta zona es imperceptible, llegando a 77° C en las inmediaciones del incendio y a 47° C en el portal NW.

En el escenario 28, con un tiro natural extremo de $8,5 \text{ m/s}$, presenta una situación muy especial de evacuación, que requeriría una capacidad de ventilación forzada, soplando en dirección contraria a la de la ventilación natural, muy superior a la prevista de la estación Saccardo, resultando necesaria la puesta en marcha de una pareja de aceleradores de 809 N de empuje cada 70 m .

La evolución de temperaturas alcanza en las inmediaciones del incendio, valores de 147° C , mientras que en el portal SE llega solamente a 62° C . Hacia la zona de evacuación, la elevación de temperatura es mucho menos importante y solo durante los primeros ocho minutos, lo

que hace recomendable no iniciar hasta entonces la evacuación de pasajeros.

Los tiempos máximos de espera para la llegada de los trenes de auxilio son para este túnel, de 3m 31s para el primero y de 11m 33s para el segundo.

Teniendo en cuenta los tiempos de evacuación de trenes, antes comentados y con análogas consideraciones se llega a la conclusión de que en las situaciones más desfavorables el transbordo al tren de rescate puede terminarse también en 17 a 20 min. y la llegada de éste a la estación VAL que corresponda es de 24 a 27 min.

Túnel 3

Escenarios de incendio nº 33 y 48.

Análogamente a las Figuras 3 y 4, la Figura 5 incluye la localización de estos escenarios y la representación gráfica de la evolución con el tiempo de las velocidades y temperaturas del aire en el túnel.

En el escenario nº. 33, con la puesta en marcha de la estación Saccardo (caudal de $420 \text{ m}^3/\text{s} + 110 \text{ m}^3/\text{s}$), la evolución de las velocidades en función del tiempo muestra que la velocidad en la zona anterior al fuego (nudo G 3. 2 A) alcanza rápidamente un valor superior a la velocidad crítica y en el sentido adecuado. Las velocidades aguas abajo del incendio (nudos G 3.1 y portal SE) son superiores por el calentamiento de los gases debido a aquel. Aguas arriba del fuego, en el portal NW, la velocidad es ligeramente negativa, es decir pequeña y de dirección NW \rightarrow SE. La velocidad en la galería es del orden de -3 m/s . (sentido tubo auxiliar \rightarrow tubo principal). Las temperaturas se elevan hasta 77°C en el nudo G 3.1 y hasta 67°C en el portal SE. Aguas arriba del fuego, con la ventilación en funcionamiento, no son apreciables incrementos de temperatura. En conclusión, este escenario no presenta dificultades de evacuación de los humos para asegurar la de los pasajeros por la galería G 3.2. El tiempo de evacuación (11 a 12 min.) es similar al máximo tiempo de espera de llegada de los trenes de auxilio (12 min. 22s. para el segundo tren si fuera necesario. El primero habría llegado a los óm 16s).

En el escenario nº. 48, es necesario el refuerzo de la estación Saccardo de ventilación, con la puesta en marcha de una pareja de aceleradores cada 500 m., en toda la longitud del túnel. La velocidad del aire se estabiliza al cabo de 10 min. en un valor de $4,21 \text{ m/s}$, netamente superior a la crítica ($2,85 \text{ m/s}$), por lo que hay una reserva en el dimensionamiento inicial de la esta-

Las simulaciones realizadas con el programa TRANSIT han permitido validar las estrategias de evacuación en túneles de gran longitud de un trayecto ferroviario de alta velocidad, básicas para la seguridad del mismo.

ción Saccardo de ventilación, que permite razonablemente disminuir su capacidad.

La temperatura en la zona de evacuación, no registra variación apreciable, con la hipótesis de ventilación reforzada estudiada, y muy ligera con solo la estación Saccardo en marcha, ascendiendo hasta 88°C en el nudo G 3.12 y hasta 70°C en el portal NW.

A los 20 a 23 min. del comienzo del incendio, los pasajeros rescatados de un tren que se hubiera accidentado en el Túnel 3, habrán llegado a la estación VAL correspondiente (lado NW o lado SE).

4. CONCLUSIONES

Las simulaciones realizadas con el programa TRANSIT han permitido validar las estrategias de evacuación en túneles de gran longitud de un trayecto ferroviario de alta velocidad, básicas para la seguridad del mismo.

El sistema de seguridad de este trayecto incorpora al puesto de mando de los trenes que entran en él, por medio de los centros de control situados en los PAET que lo limitan, y de forma automática a su paso por las agujas de entrada, las estrategias de escape, programadas en función de las condiciones del momento, meteorológicas en las bocas de los túneles y de circulación de trenes en el trayecto, compatibles y acordes con los posibles escenarios definidos, según los resultados de las simulaciones realizadas descritas en este artículo. Los centros de control transmiten simultáneamente a los puestos de mando de las estaciones de ventilación con ellos conectados la programación de refuerzos de caudales o inversiones de sentido de soplado deducida de los escenarios que correspondan a las estrategias incorporadas al puesto de mando de circulación para su puesta en marcha de forma automática si se produce detención de un tren en el interior de los túneles. Igualmente, la entrada en el cantón de un TAV, pone automáticamente en funcionamiento un VAL de auxilio que le sigue en el recorrido completo de los túneles, bloqueando hasta su salida ó accionamiento manual la puesta en marcha de otro VAL en sentido contrario. ■

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chasse, P. and Aprville, J.M. *A new ID computer model for fires in complex underground networks*. International Conference "Tunnel Fires and Escape from Tunnels" Lyon, France, Mai 1999.
- [2] Fort, L. and Gil, F. *Aerodynamic calculations in railway tunnels. Simulations with the Ouranos program*. Fourth International Conference "Safety in Road and Rail Tunnels", Madrid, Spain, april 2001 y ROP, marzo 2001.