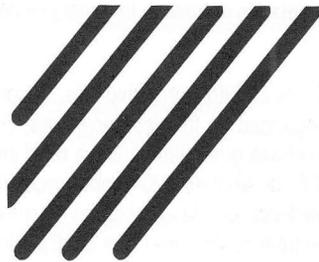


capítulo 23



Ignacio DEL REY. ETSII. Universidad Politécnica de Madrid
Enrique ALARCÓN. ETSII. Universidad Politécnica de Madrid
Irene ESPINOSA. CEMIM. Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial

VENTILACIÓN EN CASO DE INCENDIO Y GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL EN LOS TÚNELES DE CALLE 30

1. INTRODUCCIÓN

Como toda obra pública, los túneles son infraestructuras esencialmente seguras en que los accidentes graves son sucesos raros que, al ser inesperados y afectar a un número alto de usuarios, despiertan alarma social.

Los últimos años han sido pródigos en accidentes con fuego en túneles de tráfico, lo que ha motivado, siguiendo la ley anterior, la preocupación de los organismos encargados de velar por la seguridad en el transporte así como de los usuarios en general. Ello ha dado lugar a un renovado interés por todos los aspectos relacionados con la seguridad de lo que son buena prueba los numerosos grupos de trabajo y proyectos europeos destinados a su estudio.

Ventilación en caso de incendio y gestión medioambiental en los túneles de Calle 30

En el ámbito normativo, las Recomendaciones del Grupo de Expertos de las Naciones Unidas sobre la seguridad en túneles carreteros, publicadas en Diciembre de 2001, supusieron el inicio de un conjunto de medidas que culminaron, a nivel internacional, en la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo de la U.E. de abril de 2004 sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea y, a nivel nacional, con la aprobación en mayo de 2006 del Real Decreto 635 sobre requisitos mínimos de seguridad en túneles de carreteras del Estado.

En todas estas referencias, la gestión de los riesgos relacionados con la seguridad en los túneles se aborda desde una doble perspectiva basada, en primer lugar, en la prevención de los incidentes y, en segundo término, en la reducción de las consecuencias.

A su vez, estos dos criterios generales se enfocan desde cuatro vértices: la infraestructura, la explotación, los usuarios y los vehículos.

Siguiendo este esquema general, los túneles de Calle 30 incorporan numerosas medidas de seguridad que abarcan tanto las relacionadas con la infraestructura, como a la explotación. En primer lugar se pretende prevenir los incidentes, con medidas como el mantenimiento de elevados niveles de iluminación, la reducción de la velocidad de circulación o la restricción al paso de vehículos pesados de gran tonelaje y mercancías peligrosas.

Otros sin embargo, están orientados a paliar, desde un enfoque múltiple, las consecuencias en caso de producirse el incidente:

- minimizando los tiempos de respuesta: con la instalación de sistemas de alerta temprana por detección lineal de incendios, detección automática de incidentes, postes SOS, etc.
- mejorando las condiciones de evacuación de los usuarios: mediante el uso de los equipos de ventilación, señalización de las salidas de emergencia, iluminación de refuerzo, megafonía, etc.
- apoyando a los servicios de emergencia: con medidas como la construcción de la galería de acceso bajo calzada en los túneles del *By Pass*, la instalación de sistemas tradicionales de protección contra incendios (red de columna seca y húmeda) y otros, más novedosos, como el de extinción por agua nebulizada.

En definitiva, es muy importante resaltar que la seguridad de los túneles de Calle 30 se apoya en todo un conjunto de medidas y sistemas fundamentales, algunos de los cuales ya han sido tratados en capítulos anteriores, y que, en gran parte, son invisibles al usuario del túnel. En este capítulo se describen en mayor detalle los sistemas de ventilación y sus implicaciones en la gestión medioambiental de la obra.

2. UN PROYECTO SINGULAR

Desde el punto de vista de la ventilación, el Proyecto de los túneles de Madrid Calle 30 ha representado un enorme desafío, máxime teniendo en cuenta que, como criterio de partida, se exigieron los mayores niveles de seguridad posibles tanto en servicio como en incendio.

El desarrollo y ejecución de las soluciones de ventilación ha presentado una enorme complejidad por factores adicionales a los habitualmente existentes en túneles, entre los que de los más importantes han sido los severos condicionantes geométricos: no tanto por la gran longitud (más de 40 kilómetros) y sección transversal (hasta 5 carriles en zonas puntuales) sino por tratarse de una auténtica red de túneles (casi la mitad de la longitud total está representada en forma de ramales de acceso e interconexión).

A esto debe añadirse el entorno, de tipo urbano, que impone fuertes restricciones a las características del tipo de sistema de ventilación, al condicionar la ubicación de las imprescindibles estaciones de ventilación, e implica además elevados volúmenes de tráfico.

Un aspecto adicional, pero no menos importante, ha sido la necesaria subdivisión para la construcción de la obra en los plazos planteados en diversos contratos, Fig. 1, cada uno de los cuales fueron adjudicados a diferentes constructoras que debían ejecutar los proyectos con el apoyo de sus correspondientes ingenierías.

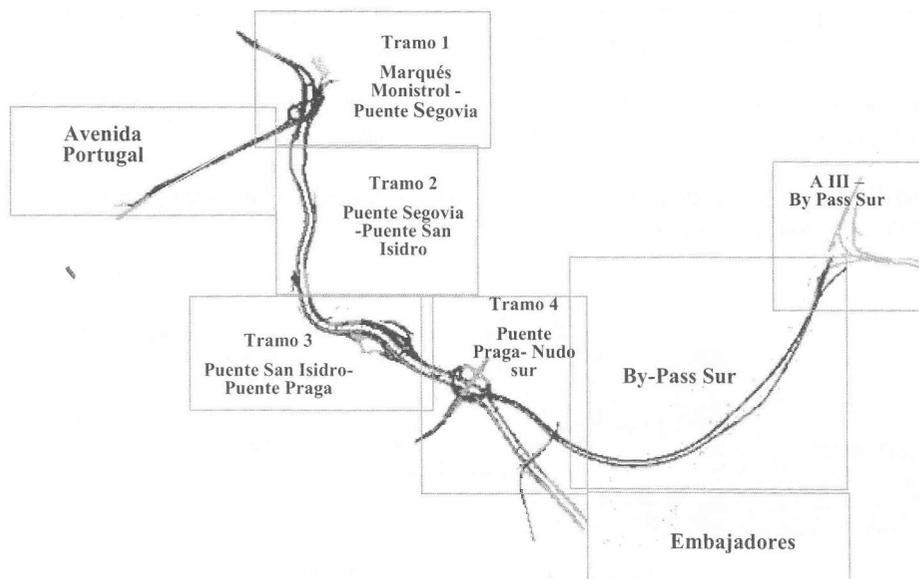


Figura 1. Esquema de división según contratos.

Este esquema ha permitido, por una parte, una ejecución muy rápida al disponerse de ingentes medios técnicos humanos y materiales, pero por otro, supuso un desafío constante para la consecución de los necesarios criterios de homogeneidad y coherencia en la infraestructura, aspecto clave no sólo desde el punto de vista de la percepción del usuario sino también para la explotación y actuación en caso de emergencia.

En este sentido, uno de los mayores logros de este gran proyecto ha sido precisamente la creación de grupos de trabajo multidisciplinares, con profesionales de diversos ámbitos de la ingeniería, en el intento de lograr una coherencia global como una infraestructura única. En particular, la creación del Ente Madrid Calle 30, como gestor global del proceso de construcción permitió abordar la supervisión y explotación desde un punto de vista único y homogéneo, objetivo final desde el principio del desarrollo de los proyectos,

En el caso de las medidas de seguridad, los objetivos de uniformidad y coherencia se lograron gracias a la redacción por parte de Calle 30 de especificaciones técnicas que definían los criterios a seguir por las empresas constructoras en la elaboración de los proyectos de detalle pero permitiéndoles, sin embargo, el planteamiento de soluciones innovadoras con las que resolver los problemas que surgían durante la fase de construcción.

Si bien no resulta posible en este capítulo explicar los detalles relacionados con el proceso completo del desarrollo conceptual, establecimiento de criterios de dimensionamiento, o criterios de control sí se intentará transmitir al lector los conceptos generales que relacionan la ventilación, y otros sistemas, con la seguridad y mostrar la flexibilidad y posibilidades inherentes al sistema de ventilación disponible en los túneles.

3. SOLUCIÓN CONCEPTUAL Y CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO

Tal como se explicó anteriormente, la solución finalmente adoptada en los túneles de Calle 30 ha estado fuertemente condicionada por diversos aspectos como son:

- Entorno geográfico: de tipo urbano con gran densidad de población y numerosas edificaciones próximas, planteando condicionantes medioambientales significativos
- Uso de métodos constructivos diversos: tuneladora en el caso del *By Pass* y construcción en trinchera en las proximidades del Río, Fig. 2.

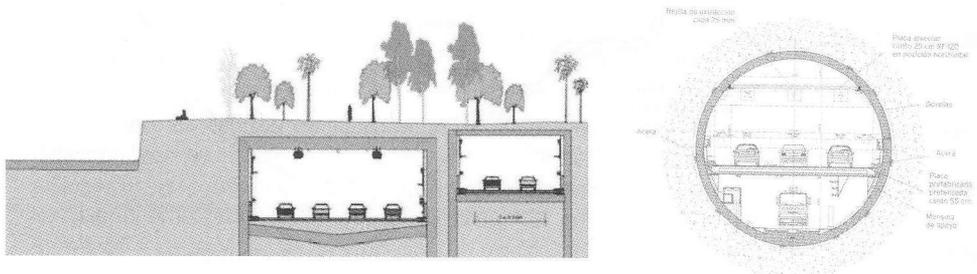


Figura 1. Secciones transversales tipo.

- Composición del tráfico: prohibición de paso de vehículos para transporte de mercancías peligrosas (y posteriormente también para vehículos de gran tonelaje)
- Niveles de servicio: tráfico fluido pero también en congestión con IMD de hasta 100.000 vehículos al día.
- Otras condiciones explotación: alto grado supervisión, tiempo de respuesta rápido de los servicios de emergencia.

Teniendo en cuenta estos criterios se evaluaron distintas configuraciones de ventilación, si bien se prestó especial atención a dos aspectos fundamentales: la seguridad frente a incendio y el impacto medioambiental.

3.1. Ventilación de servicio

Tradicionalmente, la gestión medioambiental, en los túneles cortos de la ciudad de Madrid, al igual que se hace en la mayoría de las ciudades europeas, se basa en la dispersión de los contaminantes por las bocas. Sin embargo, en el caso de los túneles de la M-30, debido a su gran longitud, se consideró

Ventilación en caso de incendio y gestión medioambiental en los túneles de Calle 30

necesario emplear una doble estrategia: la definición de secciones de ventilación cortas, junto a una fuerte dilución de los contaminantes con enormes caudales de aire.

Para ello los túneles disponen de numerosas estaciones de ventilación (con tramos de ventilación del orden de los 600 m), dividiendo así la carga de contaminantes de la vía.

Además, se reforzaron los niveles de dilución de contaminantes para paliar su impacto tanto dentro como fuera de los túneles.

Dado que no existen en España recomendaciones para el dimensionamiento de la ventilación de túneles (ni para el caso de servicio ni para el de incendio), las referencias que se han seguido han sido los informe de PIARC (ref. 1 a 5) y las recomendaciones francesas de ventilación emitidas por el CETU (ref. 6). Tanto PIARC, conocido a nivel nacional como Asociación Mundial de la Carretera (ref. 7), como el segundo (ref. 8) representan una referencia internacional indiscutible por la actualización permanente de sus reglamentos.

Teniendo en cuenta estos criterios, junto con el interés de disponer de caudales de dilución superiores a los habituales por razones medioambientales así como por el hecho de permitir tiempos de permanencia grandes en los túneles, se consideró un nivel máximo de CO de 30 ppm, frente a las 50 ppm recogidas en las recomendaciones francesas o las 70 ppm de las internacionales. Con ello, para establecer criterios generales de dimensionamiento a las distintas ingenierías, se realizaron diversos estudios paramétricos calculando las necesidades de ventilación para un túnel tipo de 1 km de longitud y tres carriles de circulación con pendientes de entre el -5% y el 5%. El resultado final fue que, salvo justificación específica a cada tramo, se recomendaba emplear un caudal de ventilación de unos 95 m³/(s km carril).

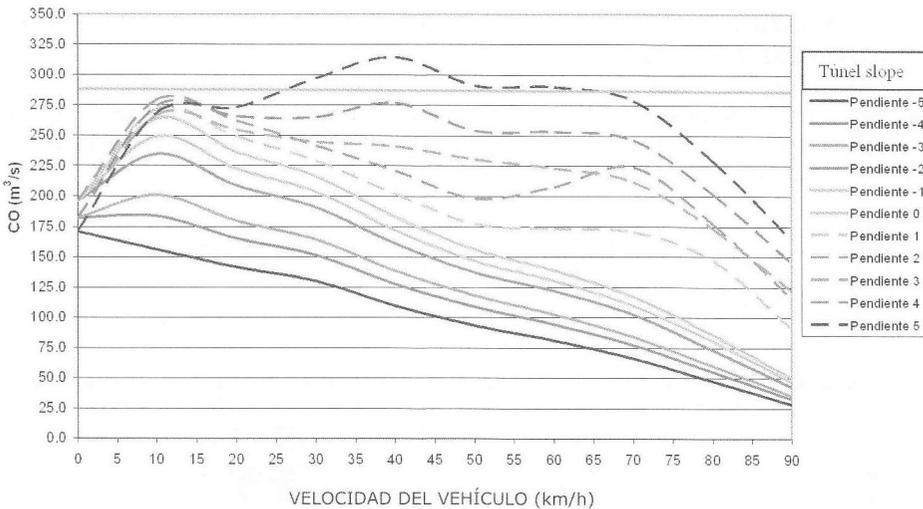


Figura 3. Estudio paramétrico para la determinación de caudales de aire de ventilación.

Como complemento a estas medidas, para mejorar la calidad de las condiciones medioambientales del aire en la ciudad, se han instalado en los pozos de ventilación del *By-Pass* Sur estaciones de filtrado de partículas y NO₂ (4 unidades de 680 m³/s cada una) y de partículas en el Tramo del río, con un rendimiento esperado no inferior al 80% tanto para gases como para partículas (PM 10 y PM 2.5).

Estas estaciones de filtrado se han completado con instalaciones eléctricas, de control y de almacenamiento, además de un sistema de *by-pass* que minimiza los daños en caso de incendio. Merece la pena destacar, el hecho de que el proceso de monitorización de los niveles de emisiones y de la estimación del rendimiento niveles de emisiones y de la estimación del rendimiento es el mismo para cada una de las cuatro estaciones de ventilación aun cuando los precipitadores electrostáticos y las estaciones de filtrado instaladas han sido suministradas por cuatro compañías diferentes, lo que, en un futuro, permitiría disponer de información cualitativa y cuantitativa útil, sobre el comportamiento de estos innovadores sistemas de filtrado.

3.2. Ventilación en caso de incendio

Para la gestión de un incidente se consideró un incendio tipo de diseño de 30 MW de potencia a aplicar ante dos soluciones conceptuales diferentes, en función del método de construcción empleado en los túneles:

- En los túneles en los que se pudo usar un sistema de ventilación por conductos, (principalmente el By-Pass construido mediante tuneladora y los tramos de los túneles adyacentes, es decir, el de la A-III y el Tramo 4), se propuso una ventilación transversal pura con cantones de unos 600 m de longitud y con circuitos independientes para el aire fresco y la extracción, Fig. 4.

El aire fresco se distribuye por conducto bajo calzada (el cual debería servir como vía de evacuación y emergencia) y se comunica con la zona de circulación de tráfico mediante boquillas de 70 x 35 cm² situadas cada 10 m en ambos hastiales.

El conducto de extracción, situado encima de la zona de circulación se comunica mediante trampillas reguladas (no tele-comandada) de 2 m² cada 25 m.

La capacidad total de caudal de aire es de unos 170 m³/s cada 600 m, lo que se ha conseguido mediante la construcción de pozos de ventilación que abarcaban hasta cuatro secciones de ventilación cada uno y expulsando hasta 680 m³/s de aire tratado.

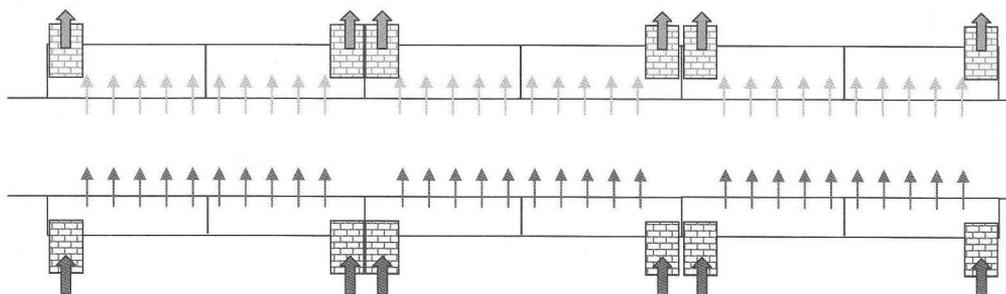


Figura 4. Croquis general del sistema de ventilación. Túneles del *By-Pass*.

- En los túneles excavados en trinchera ("*cut and cover*"), cercanos a los edificios y donde la existencia de otras infraestructuras y servicios afectados (redes de distribución, líneas de metro, cauce del río, etc.) hizo imposible la construcción de conductos de ventilación, se propuso un sistema de ventilación longitudinal reforzado con extracciones.

El esquema general consiste en secciones de ventilación separadas en torno a los 600 m. El caudal de aire entra en el túnel a través de una estación de inyección y se extrae al final de cada una de las secciones. Además, para dirigir el caudal de aire en la dirección del tráfico, se cuenta con aceleradores de chorro, Fig. 5.

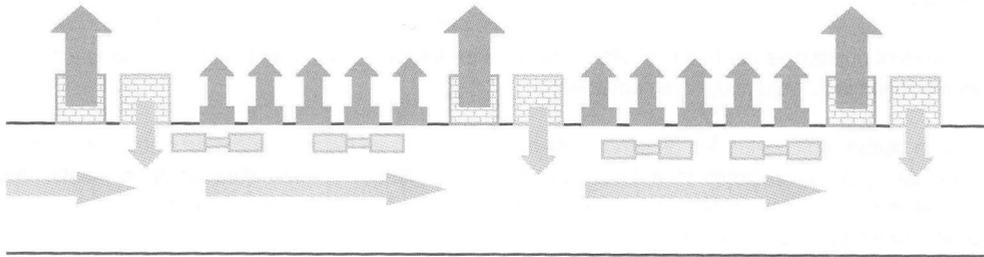


Figura 5. Croquis general del sistema de ventilación. Tramo del Río.

Como complemento, para mejorar el comportamiento del sistema de ventilación en caso de incendio, se propuso la instalación, entre los grandes pozos, de extracciones puntuales con capacidad de aspiración del orden de los $30 \text{ m}^3/\text{s}$, separadas entre 100 y 200 m, que equipara la solución con la de ventilación transversal para el caso de incendio.

Respecto a los criterios de dimensionamiento de las estaciones de ventilación se empleó el concepto de las recomendaciones francesas para las extracciones masivas lo que debería permitir conseguir velocidades de aire en el sentido de circulación del tráfico superiores a la crítica. Bajo esas condiciones se fijaron caudales de extracción entre 200 y $300 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que, para las ingenierías y constructoras encargadas del diseño detallado de la instalación, supuso un gran esfuerzo para conseguir soluciones innovadoras o, en su defecto, el empleo de diseños complejos de intercomunicación de registros o conductos intermedios, Fig. 6.

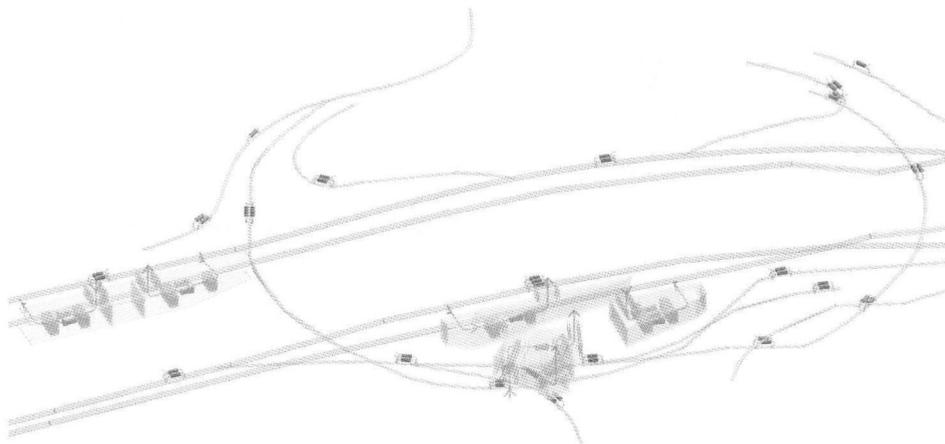


Figura 6. Detalle del diseño del sistema de ventilación para el Tramo del Río.

4. SISTEMA DE CONTROL DE LA VENTILACIÓN

Con el término sistema de control se hace referencia al conjunto de equipos, sistemas y herramientas informáticas implicadas en la ejecución de actuaciones, tanto manuales como automáticas, sobre la ventilación y en la gestión de incidentes mediante la propuesta de actuaciones al personal de explotación del túnel.

El principal objetivo es por tanto, facilitar la labor de explotación, minimizando el tiempo de reacción tanto en funcionamiento normal como en emergencia.

Para la ventilación en situación de servicio, se ha desarrollado un sistema de control distribuido, que divide la red de túneles en sectores controlados por unidades de control remotas. Para facilitar el mantenimiento del sistema, se ha desarrollado un único algoritmo de control, aunque para cada zona de ventilación es posible una configuración específica.

Las reglas de control se basan en la regulación de consigna por intervalos. Básicamente consiste en comparar las lecturas de los sensores de contaminantes y de los anemómetros, convenientemente tratadas, con un conjunto de umbrales predefinidos, pero configurables durante la explotación, que definen los niveles de ventilación deseados.

Puesto que los túneles constituyen una red compleja, el control de la ventilación en servicio se ha establecido por zonas o caminos preferentes de ventilación, cuyos sensores de contaminantes y equipos de ventilación están relacionados: las actuaciones sobre los distintos ventiladores dependen sólo de los sensores de su zona, y de las consignas de control establecidas en ella.

Con el fin de homogeneizar las actuaciones sobre la ventilación, se han clasificado los distintos tramos de los túneles en tipologías básicas, para lo cual se han tenido en cuenta las características del tipo de vía (cantones pertenecientes a vía troncal, cantones formados por incorporaciones a vía troncal, y cantones formados por ramales de salida) y de diseño del sistema de ventilación.

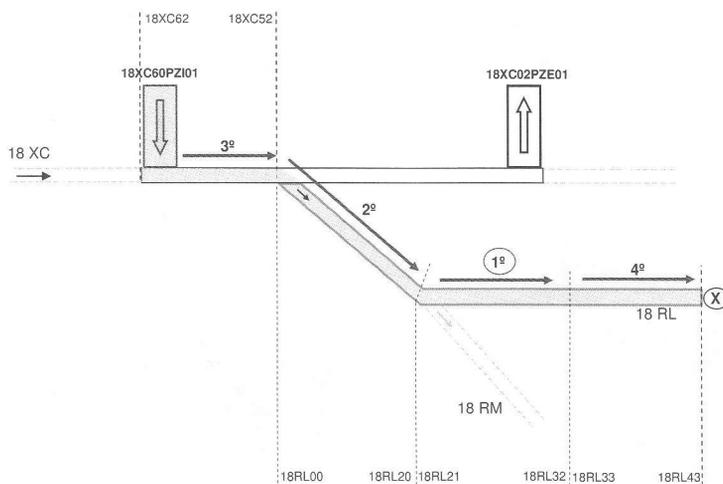


Figura 7. Estrategias de control de ventilación en caso de servicio.

En caso de incendio, el esquema de ventilación es completamente diferente del caso de funcionamiento normal, ya que las estrategias de ventilación residen en el servidor principal del centro de control. Esto se debe a que, en caso de incendio, a diferencia de lo que sucede en situación de servicio donde la independencia entre distintas zonas es mayor, se precisa disponer de información del estado de una gran parte la infraestructura para poder adoptar decisiones sobre las zonas afectadas.

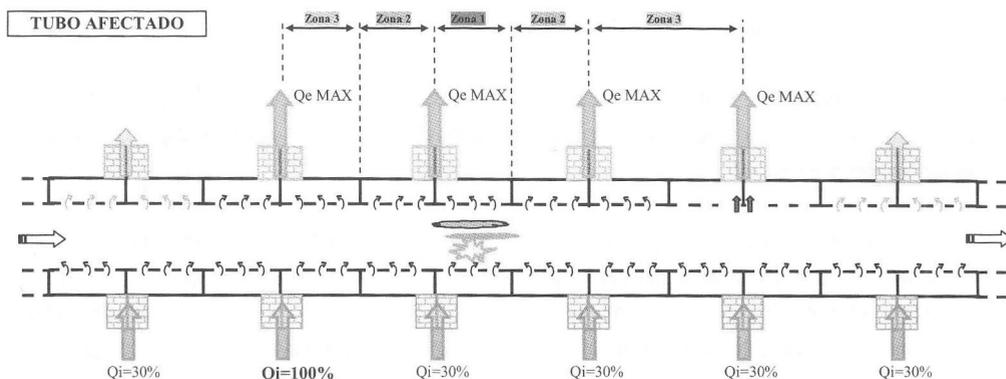


Figura 8. Actuaciones automáticas predefinidas en caso de incendio. By Pass.

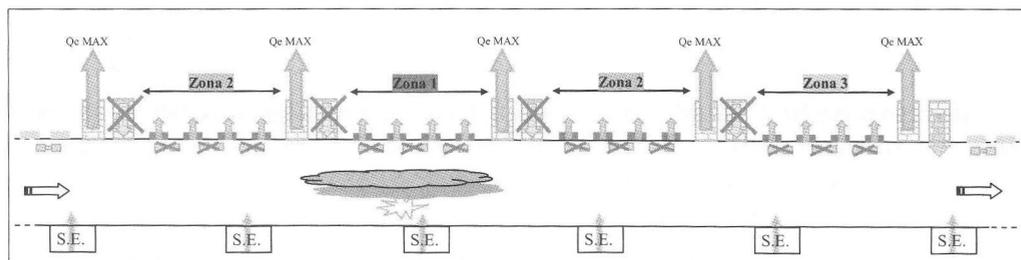


Figura 9. Actuaciones automáticas predefinidas en caso de incendio. Tramo del Río.

El esquema general de actuación se apoya en las siguientes etapas:

- *Alarma de incendio:* por la detección lineal (automática) mediante cable sensor tanto por umbral de temperatura como gradiente o por la recepción de información por parte del operador a partir del CCTV, el cual activaría la secuencia de incidente (manual).
- *Identificación y validación:* el sistema ayuda a identificar la posición de incendio (crítico en una red tan compleja) para permitir que el operador (o el sistema de control automáticamente) confirme las alarmas existentes y se desencadenen las actuaciones automáticas.
- *Actuación:* Se completan las actuaciones automáticas y manuales sobre la ventilación (pauta de actuación inicial y comienzo del control continuo de la velocidad).

Desde el punto de vista de las actuaciones se definen distintas etapas:

- “*Estado de seguridad*”: para reducir el tiempo de respuesta en caso de incendio, tan pronto como se produce una alarma, se llevan a cabo las actuaciones que mejoran la seguridad en el tiempo que transcurre hasta que se confirma el incendio, y sin que resulten perjudiciales ante la habitual carencia de información precisa. Estas actuaciones incluyen la interrupción de la ventilación de servicio en las zonas afectadas, la parada de los ventiladores que generan altos niveles de turbulencia (inyecciones y aceleradores), y el arranque de las extracciones.
- “*Respuesta automática*”: Una vez producido el proceso de identificación y validación (la cual es automática al cabo de un cierto tiempo prefijado o manual mediante actuación de algún operador), se llevan a cabo dos etapas:
 - Desencadenamiento de una pauta de “actuación inicial”; cuya estrategia consiste, por un lado, en extraer el aire del túnel a máxima capacidad en el sector de incendio y en los dos sectores adyacentes y, por otro, intentar reducir la velocidad del aire en la zona del incendio mediante el control de la corriente longitudinal para apoyar las condiciones de estratificación de los humos.
 - Inicio del proceso de control de la corriente longitudinal para intentar lograr una velocidad del aire controlada en el foco del incendio, en función de las condiciones de tráfico. Para ello, el sistema debe evaluar el estado del tráfico y modificar la estrategia de control de la corriente longitudinal: velocidad reducida para condiciones de congestión de tráfico y algo más elevada si es fluido.

Por último, en el interfaz del operador se dispone de herramientas adicionales que suelen ser útiles en la gestión de este tipo de incidentes, como son, por ejemplo, las actuaciones para el apoyo a los servicios de emergencia o la interrupción de los sistemas automáticos.

5. ENSAYOS DE PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

Los departamentos de calidad de cada una de las partes involucradas en el proyecto de los túneles de la M-30, realizaron diversas campañas de ensayos para la puesta en marcha de las instalaciones de los túneles.

En lo relativo al sistema de ventilación, se llevaron a cabo variados ensayos: desde individuales para los sensores y ventiladores hasta ensayos “*in-situ*” para determinar los parámetros de la instalación y verificar el comportamiento global del sistema de ventilación (es decir, el funcionamiento en conjunto no sólo de cada parte del sistema, sino también de las actuaciones de control programadas tanto en caso de servicio como de incendio).

Como resultado de estos ensayos se obtuvieron curvas de respuesta de la instalación ante el arranque sucesivo de aceleradores, Fig. 10, o la determinación de caudales de extracción en los conductos de ventilación, Fig. 11.

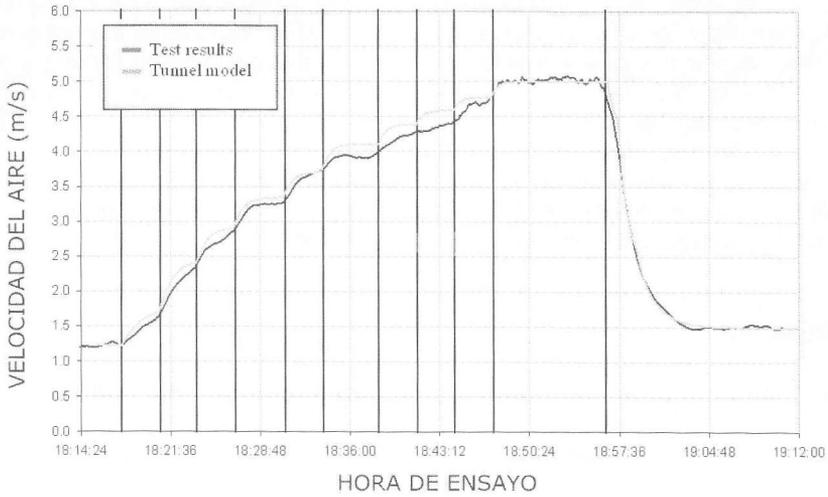


Figura 10. Esquema de las estrategias de control de ventilación.

MEDIDAS TOMADAS EN EL EJE DEL VENTILADOR EN EL POZO DE VENTILACIÓN

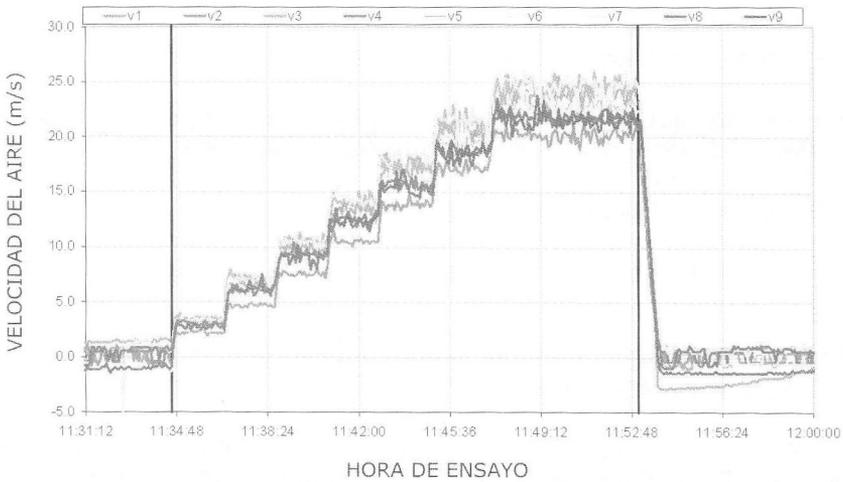


Figura 11. Esquema de las estrategias de control de ventilación.

6. CONCLUSIONES

La construcción de los túneles de Calle 30 representa un interesantísimo ejemplo de obra en que pueden darse complejas condiciones geométricas, topográficas, etc. en condiciones de tráfico también muy variadas. Es por ello que tanto el Proyecto como la ejecución han supuesto un enorme desafío técnico y, tras su finalización, se ha convertido en un referente nacional e internacional, como reflejó la celebración de una sesión especial sobre el proyecto de la M 30 en uno de los más prestigiosos eventos relacionados con la seguridad en túneles.

Los autores quieren agradecer al Ayuntamiento de Madrid y la Sociedad Madrid Calle 30 la oportunidad brindada para la participación en un proyecto singular, donde han participado en el asesoramiento técnico para la definición de principios generales de funcionamiento, criterios de dimensionamiento y de control de la ventilación, así como apoyar para que los Proyectos elaborados por las distintas ingenierías mantuviesen la deseada compatibilidad.

Por último, y no menos importante, se ha tenido la oportunidad de participar en los distintos grupos multidisciplinares creados durante el desarrollo del proyecto para la gestión de los aspectos medioambientales, de seguridad frente a incendio y de explotación.

7. REFERENCIAS

- [1] PIARC. (1995).: "Road tunnels: Emissions, Ventilation Environment". ISBN: 2-84060-127-3.
- [2] PIARC. (1999).: "Fire and Smoke Control in Road Tunnels". ISBN: 2-84060-064-1.
- [3] PIARC. (2000).: "Pollution by Nitrogen Dioxide in Road Tunnels". ISBN: 2-84060-127-3.
- [4] PIARC. (2004).: "Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation". ISBN: 2-84060-177-X.
- [5] PIARC. "World Road Association". <http://www.piarc.org/es/>
- [6] Les dossier pilotes du CETU. Ventilation (Novembre 2003). Centre d'Etudes des Tunnels. 25, avenue François Mitterrand – 69674 Bron cedex – France; ISBN: 2-11-084740-9
- [7] Centre d'Etudes des Tunnels. <http://www.cetu.equipement.gouv.fr/>
- [8] MADRID M-30. Un Proyecto de Transformación Urbana. (2007); Ed. Turner; ISBN: 978-84-7506-790-2.
- [9] PRESA, J. (2008).: "Madrid Calle 30. An urban transformation Project." 4th International Conference on Tunnel Safety and Ventilation. Abril.
- [10] DEL REY, ESPINOSA, FERNÁNDEZ, GRANDE, ALARCÓN. (2008).: "Ventilation System Design and Large Scale Fire Test". 4th International Conference on Tunnel Safety and Ventilation. Abril.