

11. SITUACIÓN ACTUAL, COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES PRELIMINARES

11.1. PRÓLOGO

Todos los túneles estudiados (27 "túneles complejos") se encuentran en zonas urbanas o suburbanas. Los túneles tienen de hecho la doble característica de "túnel urbano" y de "infraestructura subterránea compleja" (ver la definición en [capítulo 1.4.1](#)), siendo bastante difícil una diferenciación entre estas características.

El objetivo de este apartado es el de presentar un análisis transversal entre los criterios analizados anteriormente uno por uno y señalar la complejidad resultante de la interdependencia entre ellos.

Este apartado incluye recomendaciones preliminares obtenidas de las investigaciones y análisis transversales que se desarrollarán con más detalle en el siguiente ciclo y que se presentarán en el futuro informe Parte B.

La investigación muestra también lo importante que es la evolución de los túneles durante su ciclo de vida, que conduce a menudo a una sucesión de soluciones que no siempre son las más adecuadas. Ello demuestra lo esencial que es el procurar tener desde el inicio del proyecto de una "nueva red subterránea de carretera" una reflexión cuidadosa sobre las necesidades y la evolución futura con el fin de poder incluir en él los conceptos para integrar esa evolución. A menudo es un reto pero contribuirá a disponer soluciones mejores y más rentables.

11.2. GEOMETRÍA

11.2.1. Situación actual - Comentarios

El análisis de los incidentes en relación con el trazado en planta, el perfil longitudinal, las condiciones de tráfico, el número y geometría de los ramales de entrada y salida, la señalización y la calidad del alumbrado muestran que la mayoría de los incidentes ocurren:

- en curvas cerradas y en particular cuando están asociadas con pendientes altas,
- cerca de las salidas cuando la visibilidad es demasiado baja o en caso de colas (accidentes en el final de un atasco),
- en las zonas de conexión de los ramales de entrada.

11.2.2. Recomendaciones preliminares

Con el fin de reducir el número de incidentes deben ser investigados los siguientes temas:

11.2.2.1. En túneles existentes

- mejora de la pre-señalización, señalización y alumbrado de los ramales de salida;
- mejora de la detección y señalización del final de las colas de retención;
- reducción de la frecuencia y amplitud de los atascos mediante la mejora de la gestión de las conexiones entre las infraestructuras subterráneas y las redes de carretera a cielo abierto que permitan mejorar la integración en el tráfico de superficie;

- mejora del control de los límites de velocidad cerca de las zonas de entrada y salida y en las curvas cerradas.

11.2.2.2. Para túneles nuevos

- durante la fase de proyecto se requiere un tratamiento simultáneo de la geometría y la señalización con el fin de llegar a un mejor equilibrio entre las exigencias urbanas, técnicas y de seguridad de acuerdo con las características del trazado en planta y el perfil longitudinal;
- diseño cuidadoso de las salidas con el fin de:
 1. hacerlas más visibles –
 2. conseguir dimensiones acordes con la intensidad y condiciones del tráfico –
 3. disponer carriles paralelos de salida de longitud adecuada a la intensidad de tráfico con el fin de evitar atascos que bloquen el tráfico principal;
- diseño cuidadoso de la localización y organización de las conexiones con las redes de carretera de superficie.

11.3. SECCIÓN TRANSVERSAL

11.3.1. Situación actual – Comentarios

La investigación muestra que en el 80% de los túneles está prohibido el paso de vehículos de más de 3,5 toneladas. Sin embargo, ello no se considera durante la fase de proyecto, en particular en lo referente a la anchura de los carriles y al gálibo.

Un estudio realizado recientemente por miembros del grupo de trabajo para el proyecto de una serie de tres túneles urbanos con conexiones y una longitud nominal total de 8 km, muestra que existen posibilidades de ahorro importantes asociadas con la adaptación del ancho del carril y del gálibo, de acuerdo con el tipo de vehículos que estén autorizados a pasar por el túnel.

Este análisis ha sido realizado para:

- 2 tubos paralelos con dos carriles por sentido, construidos con tuneladora (por tanto, con sección circular)
- acceso restringido a vehículos ligeros, furgonetas y vehículos comerciales ligeros.

La siguiente tabla muestra los ahorros en los costes de construcción de acuerdo con la variación del gálibo. El mismo rango de ahorro se pudo observar en los túneles con forma de herradura construidos por el método de excavación con voladuras:

| GÁLIBO | COSTES DE CONSTRUCCIÓN | AHORRO DEL COSTE |
|--------|------------------------|------------------|
| 5,0 m | 100 | 0% |
| 4,5 m | 95 | 5% |
| 3,2 m | 79 | 21% |
| 2,7 m | 73 | 27% |

La sección transversal para un gálibo de 3,2 m y 2,7 m fue diseñada de acuerdo con la normativa definida por la Recomendación Francesa RECTUR (ver en bibliografía [1])

11.3.2. Recomendaciones preliminares

Desde el inicio del Proyecto ha de realizarse un análisis detallado sobre la función del túnel, las condiciones de tráfico y la financiación (capacidad financiera y de financiación) con el fin de analizar las optimizaciones posibles sin pérdida del nivel de servicio y seguridad.

Los costes de construcción de las infraestructuras subterráneas urbanas complejas suelen ser muy altos y con frecuencia la financiación es difícil de conseguir. Como se muestra en el conjunto de túneles que se han analizado, el 80% de ellos han sido proyectados con el gálibo convencional incluso cuando está prohibido el paso de camiones.

La realización de análisis preliminares sobre la función y el uso del túnel podría conducir a una optimización financiera y, debido al ahorro de costes, se podrían promover proyectos viables que de otra manera no son económicamente abordables.

11.4. VENTILACIÓN

Los riesgos debidos a la presencia de Vehículos de Mercancías Peligrosas junto con un tráfico urbano denso deben ser considerados cuidadosamente teniendo en cuenta el hecho de que generalmente cualquier tipo de sistema de ventilación no tiene capacidad para reducir significativamente los efectos de un gran fuego de mercancías peligrosas en tales condiciones del tráfico. El tránsito de mercancías peligrosas sólo debería permitirse en el túnel si no hubiera una ruta alternativa con menos riesgo aceptable.

Para el proyecto de la ventilación en túneles urbanos complejos, los enfoques normativos podrían no ser completamente aplicables ya que cada caso requiere un enfoque de ingeniería a medida de su especificidad. Tiene que aplicarse un concepto de seguridad apropiado con el fin de demostrar que se alcanzan los objetivos de seguridad de la red subterránea.

En túneles urbanos, para el caso de incendio, no debería proyectarse un sistema de ventilación longitudinal sin incluir medidas adicionales tales como una extracción masiva o una galería para la extracción del humo ya que el riesgo de congestión aguas abajo puede ser relevante debido a los atascos en la salida del túnel. Incluso si la congestión no se espera a corto plazo, se debe considerar cuidadosamente en el proyecto de ventilación la evolución del tráfico a largo plazo y la posible actualización del sistema. Al menos podría ser necesaria una extracción masiva o una ventilación transversal para abordar adecuadamente el riesgo de congestión.

Con independencia del tipo de ventilación elegido, el sistema de seguridad debe considerarse en conjunto. El tráfico debe gestionarse adecuadamente con sistemas o procedimientos operativos adecuados para reducir lo más posible el número de usuarios que podrían quedar afectados por el humo.

En el caso de las redes de túneles complejos podría ser necesario proyectar y proporcionar equipos específicos de ventilación para evitar la propagación del humo a otras secciones del túnel que en un principio no se ven afectadas por el fuego. Esto se recomienda particularmente cuando el túnel dispone de largos ramales de entrada o salida y conexiones entre tubos. En la mayoría de los casos se consigue con equipos de ventilación que crean una sobrepresión en la zona segura.

En los casos en que las redes subterráneas incluyen infraestructuras vecinas (estacionamientos, otras redes de transporte, etc.), es aconsejable independizarlas lo más posible. Las soluciones más eficientes son los tabiques y las puertas, pero, cuando no sea posible, podrían reemplazarse por sistemas de ventilación específicos como por ejemplo: cortinas de aire o de agua, ventiladores de chorro específicos, etc. El procedimiento de emergencia también debe ser lo más simple posible con respecto a la protección de las infraestructuras vecinas de un posible incendio en el túnel y viceversa.

Los problemas de ruido también deberían tratarse adecuadamente en los túneles urbanos debido a sus efectos sobre los residentes locales. En algún caso, podrían ser precisos controles específicos del sistema de ventilación durante el funcionamiento normal para evitar, por ejemplo, el uso nocturno de los ventiladores de chorro en las bocas o el de las estaciones de ventilación situadas cerca de residentes, para los que el tratamiento acústico puede no ser suficiente.

11.5. LUCHA CONTRA INCENDIOS

11.5.1. Situación actual - Comentarios

En todos los túneles estudiados (con excepción de tres) la lucha contra incendios se realiza por el cuerpo de bomberos local de la ciudad cuya actividad principal es la extinción de incendios en edificios. Rara vez están equipados y preparados para las condiciones específicas de los túneles que hace que las tareas sean más difíciles.

Además, la rotación del personal es generalmente alta lo que dificulta la formación específica de los recién llegados y su conocimiento detallado del túnel.

Las tres excepciones son:

- Duplex A86 París (F): El equipamiento específico de lucha contra incendios conforme al gálibo de baja altura se encuentra en las bocas del túnel donde está situado el cuerpo de bomberos de primera intervención.
- M30 Madrid (E): Considerando la longitud del túnel y el tiempo de llegada de los bomberos locales desde su base, se dispone de Agentes de Primera Intervención en cuatro puntos junto al acceso al túnel dotados con el equipamiento necesario
- Yamate Tokio (J): Los equipos de primera intervención, dotados con motos o vehículos todoterreno, se encuentran junto a las bocas del túnel para evitar los atascos.

11.5.2. Recomendaciones preliminares

Existen numerosas recomendaciones de la AIPCR a las que se sugiere remitirse. Sin embargo, podrían mencionarse recomendaciones preliminares adicionales, de acuerdo con las características específicas y la complejidad de la red viaria subterránea, así como a consecuencia de la situación mencionada anteriormente: los equipos están más orientados a la lucha contra incendios en edificios, rotación habitual importante y falta de formación específica.

- Organización de cursos para los recién llegados con el fin de adquirir un conocimiento detallado del túnel y para el resto de la plantilla con el fin de actualizar sus conocimientos:
 - trazado general, salidas de emergencia y de acceso para los equipos de rescate;
 - ventilación (sistema, su función y eficacia);
 - estrategias de evacuación;
 - equipamientos de seguridad en el túnel;
 - tipología del tráfico;
 - etc.
- Es obligatoria la organización de programas de formación y ejercicios regulares de capacitación:
 - planificación operativa, tácticas básicas;
 - coordinación con el explotador;
 - mentalización de los empleados sobre el comportamiento de los usuarios del túnel;
 - equipamiento especial si lo hay;
 - teoría, práctica;
 - etc.
- Una herramienta muy eficaz puede ser utilizar un modelo virtual en 3D del túnel completo ya que es más atractivo y comprensible que el empleo de multitud de dibujos e informes. También podría explicarse mejor con películas y aplicaciones virtuales como por ejemplo el funcionamiento del sistema de ventilación, su eficacia y el control de la propagación del humo.
- Durante la fase de proyecto y la de la preparación de las estrategias de emergencia, debe realizarse un análisis detallado del tiempo que necesitaría el cuerpo de bomberos para llegar a la boca del túnel desde su centro, en condiciones normales de tráfico y en horas punta. El objetivo es analizar si se tiene que instalar un equipo de primera actuación junto al túnel.

11.6. SEÑALIZACIÓN

11.6.1. Situación actual - Comentarios

Ha sido investigada una gran diversidad de túneles y los resultados son desiguales:

- algunos túneles tienen una señalización muy clara y un buen concepto del diseño geométrico de las salidas lo que reduce el comportamiento arriesgado de los usuarios y mejora el nivel de seguridad,
- otros tienen muy mala señalización (no visible) y una mala legibilidad del carril de salida lo que frecuentemente conduce a un aumento del nivel de riesgo como consecuencia de incidentes.

11.6.2. Recomendaciones preliminares

- Es obligado llevar a cabo un proyecto integrado desde el principio de la concepción del trazado, previendo las salidas de emergencia y su señalización con el fin de garantizar el nivel de seguridad requerido;
- es esencial que en la fase de proyecto se verifique la buena visibilidad de las salidas y la legibilidad de la señalización;
- la identificación de las salidas debe ser objeto de especial atención con el fin de llamar la

atención de los conductores, por ejemplo: la iluminación específica, pintura, instalaciones arquitectónicas, etc;

- las salidas de emergencia: la iluminación, la pintura, las balizas sonoras, la señalización continua de las vías de evacuación que conducen a un lugar seguro.

11.7. MEDIO AMBIENTE

11.7.1. Situación actual - Comentarios

Durante la investigación se ha recopilado mucha información relativa a las estaciones de tratamiento de aire del túnel Opera en Oslo (N), M30 en Madrid (E) y túneles Yamate y Chiyoda en Tokio (J).

La estación de tratamiento de partículas y NOx del túnel Opera (de primera generación para esta tecnología) ya no está operativa debido a:

- enormes consumos energéticos,
- costes de explotación y mantenimiento,
- baja eficiencia.

La misma decisión se ha tomado para los otros seis túneles en Noruega, a pesar de que este equipamiento es de tecnología de última generación.

En el caso de los túneles de la M30 (E), el sistema de filtrado se conecta automáticamente cuando los ventiladores de extracción correspondientes están en marcha. Sin embargo, éstos entran en funcionamiento en pocas ocasiones debido al reducido nivel de polución, bastante menor que el que se esperaba en fase de proyecto.

En los túneles de Chiyoda y Yamate en Tokio (J), los equipos de filtrado de aire también se han instalado en las estaciones de ventilación. Todavía están operativos pero el tiempo de funcionamiento varía con la intensidad del tráfico y la situación de las estaciones.

11.7.2. Recomendaciones preliminares

La decisión en relación a los sistemas de filtrado de aire es con frecuencia política y no racional o técnica, lo que implica grandes diferencias de un país a otro. El empleo de sistemas de filtrado de aire en túneles de carretera es relativamente raro y el número de estas instalaciones es muy limitado.

Sin embargo, debe hacerse un balance general para evaluar la situación técnica y financiera, entre la eficiencia real y los costes de inversión, energía y de mantenimiento.

El empleo de sistemas de filtrado de aire en túneles de carretera es relativamente nuevo y el número de estas instalaciones es muy reducido. Por tanto, la decisión de usarlos tiene que analizarse cuidadosamente teniendo en cuenta diversos criterios (costes de inversión y mantenimiento, eficacia y resultados esperados, consumo de energía e impacto medioambiental, etc.). Esta decisión también tiene que tener en cuenta la reducción en la emisión de contaminantes por parte de los vehículos en el futuro, consecuencia del desarrollo

de la tecnología de los automóviles, que dará lugar a concentraciones más bajas y por tanto una eficacia cada vez menor de los sistemas de tratamiento del aire que recibirán mucho caudal con poca contaminación.

11.8. CARACTERÍSTICAS DEL TRÁFICO Y SU CONTROL

El retorno de la experiencia de los túneles investigados muestra dos asuntos importantes en relación a las características del tráfico y a su control.

11.8.1. Tráfico

El estudio muestra que hay muy pocos túneles sin congestión ni atascos por lo que es utópico proyectar un túnel considerando como supuesto de partida que ello no va a ocurrir.

El tráfico de tránsito, que tiene continuidad tanto dentro como fuera del túnel, generalmente no se ve demasiado afectado por la congestión y el atasco (con excepción del atasco localizado en las incorporaciones de los ramales de salida). La organización podría ser: (1) con un único operador tanto para el tráfico en superficie como para el tráfico en el túnel; (2) o con dos operadores, uno para el de dentro y otro para el de fuera. Generalmente la coordinación y el intercambio de información se realizan sin problemas especiales.

La situación no es tan buena en los ramales de salida debido a la frecuente congestión y atasco, consecuencia de la incorporación de los ramales con los viales de superficie. Los principales motivos son:

- un diseño estricto de la salida o de la incorporación a los viales a cielo abierto;
- un tráfico intenso en la red de superficie que hace muy difícil la integración del tráfico del túnel en el tráfico urbano;
- la no existencia de una gestión del tráfico en la incorporación o una coordinación reducida entre los operadores o una carencia de herramientas para controlar el tráfico.

La congestión y los atascos no son exclusivos de los ramales. Normalmente también afectan al túnel como consecuencia de las colas, reduciendo la capacidad del tráfico y elevándose el riesgo de colisión.

El operador de los viales en superficie no siempre dispone de herramientas ni de medios para controlar las incorporaciones (sin aforador de tráfico, sin cámara, sin semáforo, etc.). En este caso la cooperación entre los dos operadores puede no ser eficiente.

En otros casos sí que dispone de todas las herramientas y medios necesarios, por la que la gestión de las incorporaciones es posible. Se necesita una excelente coordinación, buenos procedimientos comunes y la definición de prioridades para desalojar el túnel en caso de incidente o de incendio. El estudio ha mostrado túneles con una coordinación suficiente y una buena gestión, pero también otros muchos ejemplos con malas prácticas.

11.8.2. Recomendaciones preliminares

Las principales recomendaciones relativas a las salidas y los riesgos de congestión y atasco son:

- el equipamiento de la incorporación con los viales de superficie debe ofrecer la posibilidad de controlar y gestionar el tráfico
- mejorar la coordinación entre los operadores con el fin de clarificar la situación y el papel de cada uno con el fin de definir procedimientos comunes y fijar las prioridades del tráfico.

11.9. EXPLOTACIÓN

11.9.1. Situación actual - Comentarios

Las relaciones entre las diversas empresas de explotación (si existen) se suelen tener en cuenta. El análisis muestra que a menudo existe coordinación general entre los explotadores de las infraestructuras subterráneas (aparcamientos, acceso a centros comerciales, etc.) y el del túnel. Generalmente el plan de emergencia define de manera clara al explotador del túnel como coordinador en caso de incidentes.

11.9.2. Recomendaciones preliminares

Los procedimientos deben establecer como una de las primeras prioridades a llevar a cabo la independencia de cada una de las infraestructuras (por ej.: cierre de las puertas corta-fuego de los aparcamientos subterráneos). Por lo general, todos los equipamientos, y en particular la ventilación, la extracción de humos, etc, son independientes unos de otros y así cada explotador puede controlar su propia instalación y transmitir la información al coordinador del incidente.

Es fundamental definir lo más pronto posible estas disposiciones de organización y de independencia ya que tienen gran impacto en la concepción de todas las obras afectadas, de sus equipamientos y de su forma de gestión.