

6. VENTILACIÓN

6.1. ALCANCE DEL CAPÍTULO

Este capítulo se centra en los aspectos relativos a túneles urbanos y a redes de túneles. En muchos casos la infraestructura difiere significativamente respecto a túneles de carretera propiamente dichos ya que sirven a propósitos múltiples y pueden llegar a ser multimodales.

Las características que pueden influir en la ventilación son:

- múltiples incorporaciones hacia y desde la superficie,
- conexiones con aparcamientos,
- conexiones a túneles de servicio,
- uso de varios sistemas de transporte,
- elevada intensidad y densidad de tráfico,
- elevada probabilidad de congestión,
- aspectos medioambientales relacionados con la contaminación acústica y del aire en los accesos,
- túneles de gálibo bajo.

Lo siguiente se centra en la sinopsis de las hojas monográficas.

6.2. PRINCIPALES ASUNTOS RELACIONADOS CON LA VENTILACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS COMPLEJAS SUBTERRÁNEAS DE CARRETERA

6.2.1. Asuntos relacionados con el proyecto y la elección del sistema de ventilación

En comparación con un túnel "clásico", existen criterios específicos de proyecto que pueden tener un impacto significativo en el el proyecto de los sistemas de ventilación y deben considerarse en el caso de un túnel urbano o de una compleja red de túneles. El proyecto de sistemas complejos de ventilación depende considerablemente de los siguientes factores:

- **Cambios en la sección transversal del túnel:** El funcionamiento del sistema de ventilación está directamente relacionado con la sección transversal del túnel. Por consiguiente, deben tenerse muy en cuenta las transiciones longitudinales a distinta sección. Esto ocurre, por ejemplo, en ramales de entrada y salida donde el número de carriles puede variar. La mayoría de los túneles analizados consideran este factor.
- **Conexiones con otros túneles:** El control de la corriente de aire (distribución del aire fresco en situación normal o el control del humo en caso de emergencia) en túneles que se conectan con otras infraestructuras subterráneas supone un desafío. Por consiguiente la presencia de estas conexiones necesita ser considerada como un importante parámetro de proyecto del sistema de ventilación.
- **Gálibo restringido:** Debido a las restricciones espaciales que se dan en este tipo de túneles normalmente es difícil instalar equipamiento de ventilación en la sección transversal como aceleradores o ventiladores de chorro. Además la baja altura libre minimiza el beneficio de la estratificación en estrategias de emergencia en ventilación transversal. Sin embargo, como en muchos casos el tráfico se restringe a vehículos ligeros y pequeños camiones, el proyecto en caso de emergencia debería ser menos exigente de lo normal.

- **Espacio disponible:** La viabilidad de instalar estaciones o pozos de ventilación en áreas urbanas puede ser un problema. En consecuencia el proyecto del sistema de ventilación debe realizarse considerando el espacio disponible en los ramales de acceso o en la superficie respecto a las condiciones medioambientales y de seguridad de este entorno. El espacio limitado puede hacer necesarias soluciones de ventilación específicas.
- **Incendio de proyecto:** Su tamaño depende de la naturaleza del tráfico. Sin embargo y debido a las características de éste, los incidentes con varios vehículos son más frecuentes que en túneles interurbanos. De esta forma la carga de fuego para un único vehículo ligero no resulta elevada pero el riesgo de varios vehículos involucrados existe. Esta situación puede derivar en una baja potencia de fuego pero prolongada en un periodo de tiempo mayor. Debido a la mayor densidad de tráfico y al nivel de congestión, la frecuencia de incidentes durante una retención se eleva. Estos aspectos deben considerarse en un análisis de riesgo que influya en la elección del sistema de ventilación.
- El **tráfico** es otro parámetro clave que puede ser relevante en el proyecto de túneles complejos urbanos. Los requerimientos de ventilación en explotación normal se incrementan (como se indica a continuación en los aspectos medioambientales) y también los problemas de seguridad lo que conduce a tener un particular cuidado en el proyecto y explotación de los sistemas de ventilación de emergencia.
- Los **aspectos medioambientales** claramente influyen en la elección del sistema de ventilación siendo más apropiado garantizar los objetivos previstos que el proyecto del sistema en sí mismo. En caso de ventilación longitudinal puede resultar necesario un equipamiento adicional para la extracción de aire. Por ejemplo, un sistema de ventilación longitudinal puede complementarse con puntos de extracción masiva que eviten o reduzcan las emisiones en las bocas del túnel. En caso de sistemas de ventilación con extracción masiva de humos, el cambio en el proyecto requerido por aspectos medioambientales no debería considerarse.
- Un **sistema de filtrado del aire** supone un requerimiento adicional para la ventilación en explotación normal. Si el sistema es transversal con compuertas de extracción masiva, su influencia en el proyecto de ventilación se reduce a las pérdidas de presión del propio sistema de filtración. Si el sistema es longitudinal se requiere un tratamiento en las bocas y ramales de acceso.

6.2.2. Ventilación en condiciones normales de explotación

Los túneles urbanos se caracterizan por una elevada intensidad de tráfico, alto porcentaje de vehículos ligeros (tanto de pasajeros como de carga) y un nivel de congestión frecuente. Estos factores influyen en el esquema de explotación del túnel y en especial en la gestión del sistema de explotación en situación normal.

En una red compleja de túneles uno de los principales problemas en relación con la ventilación en condiciones normales es el control apropiado del caudal de aire fresco en el túnel y asegurar que los ramales pueden recibir todo el aire requerido para la dilución de contaminantes. Por ello es necesario un estudio detallado del proyecto y un adecuado ajuste y equilibrado local del sistema.

Debido al riesgo de congestión los niveles de polución son generalmente mayores que en otros túneles. Una efectiva gestión del tráfico puede reducir este riesgo y por tanto el nivel de polución y la necesidad de aire fresco.

En función de la longitud, geometría de la sección transversal, la intensidad de tráfico y la emisión de contaminantes por parte de los vehículos que utilizan el túnel, una estrategia de ventilación longitudinal para introducir aire fresco puede derivar en una elevada velocidad longitudinal del aire en el túnel para mantener un nivel de polución aceptable cerca de la boca de salida. Esto puede conducir a un consumo energético elevado por parte de los ventiladores de chorro. En algunos casos podría ser más indicada una estrategia de ventilación transversal.

6.2.3. Ventilación en situación de incendio

En caso de incidente con fuego y propagación de humo, los sistemas de túneles complejos representan un gran reto para controlar el humo en orden a minimizar sus efectos nocivos. Para evitar el movimiento del humo por toda la red de túneles debería alcanzarse una clara zonificación del túnel.

El riesgo de colisión por alcance o con vehículos detenidos es considerablemente mayor en túneles urbanos por su elevado nivel de congestión. Este tipo de incidentes se asocia normalmente con un mayor número de víctimas y pueden desencadenar incendios por lo que el algoritmo de control de la ventilación debe tener un enfoque especial.

En túneles con ventilación longitudinal el riesgo de movimiento del humo sobre vehículos bloqueados aguas abajo del fuego es mayor cuando hay congestión. El proyecto y funcionamiento del sistema de ventilación debe considerar por tanto las medidas de gestión de tráfico y la probabilidad de atascos recurrentes. Con sistemas de tipo transversal o semi-transversal (incluso de tipo longitudinal con conducto para evacuación de humo), bien gestionados en situación de emergencia, el riesgo citado puede minimizarse.

Cuando el comportamiento aerodinámico del sistema conjunto complica el control de la ventilación en caso de incidente, debe considerarse seriamente la aplicación de otras medidas como aumentar el número de vías de evacuación o un sistema fijo de extinción de incendio.

En caso de tráfico congestionado, independientemente de la estrategia elegida, la regulación de la velocidad longitudinal del aire es esencial para prevenir una rápida propagación del humo aguas abajo y su desestratificación.

El control del sistema de ventilación puede basarse en metodologías de lazo abierto o de lazo cerrado (con realimentación). En los túneles investigados se presentan ambos tipos de sistema. La elección depende de las características físicas del túnel y de su entorno (en particular, la influencia del viento), del tipo de tráfico y de las estructuras existentes en caso de reforma.

6.3. RESULTADOS DEL CUESTIONARIO

6.3.1. Elementos de síntesis

Los sistemas de ventilación de los *"conjuntos de túneles"* estudiados son diversos, teniendo algunos distinto sistema para cada tubo e incluso para distintos tramos. Las diferencias pueden obedecer a distintas razones:

- túneles construidos con diferentes procedimientos o en periodos diferentes,
- perfil longitudinal, intensidad de tráfico, o diferente tráfico en cada uno de los tubos.

Los siguientes gráficos (*Ilustracións 25 y 26*) tratan de dar una visión completa. Se refieren a los 27 "túneles complejos". Sin embargo, el total resulta superior dependiendo del número de tubos individuales y del hecho de que algunos túneles tengan varios sistemas de ventilación.

La *Ilustración 25* muestra los diferentes sistemas de ventilación instalados en los túneles estudiados y el número con cada uno de ellos.

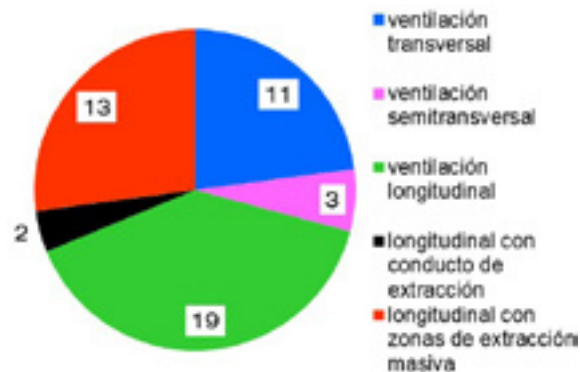


Ilustración 25 – naturaleza y número de sistemas de ventilación instalados en los túneles estudiados

La *Ilustración 26* muestra los "túneles complejos" investigados y las características de la ventilación instalada en ellos.

Como ejemplo Changsha (CHN) tiene dos tubos:

- uno de los tubos está equipado con sistema de ventilación longitudinal (color verde en el gráfico),
- el otro tubo está equipado con un sistema de ventilación longitudinal y con una estación de extracción masiva de humo (color rojo).

Otro ejemplo es el complejo Blanka (CZ) que incluye tres túneles. Cada uno de ellos tiene dos sistemas de ventilación:

- sistema de ventilación transversal de las secciones cercanas a las bocas (color azul),
- sistema de ventilación longitudinal para las otras secciones del túnel (color verde).

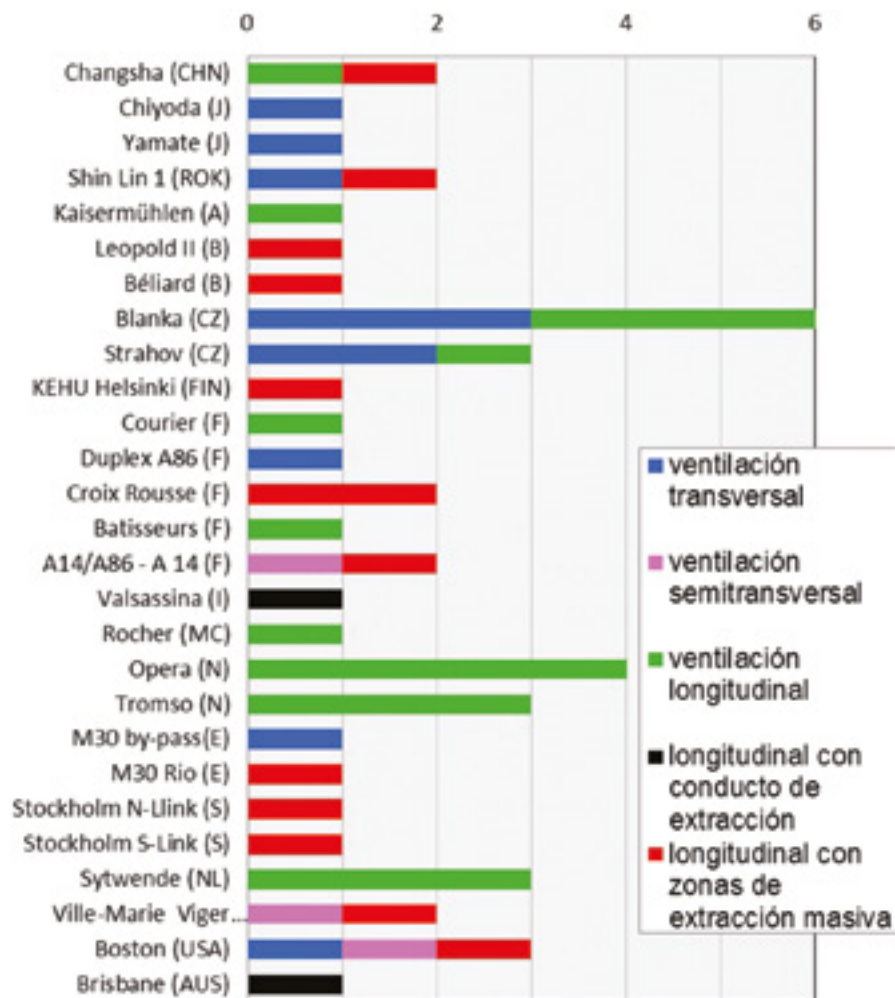


Ilustración 26 – sistemas de ventilación instalados en los “conjuntos de túneles” estudiados

6.3.2. Información principal extraída de las investigaciones

A continuación se presenta un resumen de los sistemas de ventilación instalados en cada uno de los “conjuntos de túneles”. Para obtener información más detallada se recomienda consultar las fichas monográficas de cada túnel, utilizando los enlaces que se citan.

6.3.2.1. Túnel de carretera Yingpan en Changsha (CHN)

- **Geometría y tráfico:** El túnel se construyó mediante excavación con voladuras. Hay restricciones al tráfico de mercancías peligrosas. [18]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** El tubo sur tiene un sistema combinado de ventilación: sistema longitudinal con ventiladores de chorro (aceleradores), asociada a pozos de ventilación para aportación de aire fresco y extracción del aire viciado así como del humo. El tubo norte está equipado con un sistema de ventilación longitudinal con aceleradores.
- **Ventilación en caso de incendio:** Ventilación longitudinal y extracción masiva de humos a través de una estación de ventilación para el tubo sur. Ventilación longitudinal para el tubo norte.

6.3.2.2. Túnel en Chiyoda à Tokyo (J)

- **Geometría y tráfico:** Es un túnel excavado entre pantallas. Dispone de un intercambiador subterráneo y de numerosas entradas y salidas. Los tubos están parcialmente superpuestos. El tráfico está prohibido para las mercancías peligrosas. Habitualmente no hay congestión ni formación de colas en el túnel. [19]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Sistema de ventilación transversal controlado mediante detectores de CO y opacidad. En las estaciones de ventilación hay sistemas de filtrado de partículas.
- **Ventilación en caso de incendio:** El humo se extrae por los conductos del sistema de ventilación transversal.

6.3.2.3. Túnel Yamate en Tokyo (J)

- **Geometría y tráfico:** El túnel se construyó mediante una tuneladora. Dispone de varios ramales para el acceso y salidas a la superficie y el tráfico está prohibido para mercancías peligrosas. [20]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Sistema de ventilación transversal controlado mediante detectores de CO y opacidad. En las estaciones de ventilación hay sistemas de filtrado (partículas y NOx).
- **Ventilación en caso de incendio:** El humo se extrae por los conductos del sistema de ventilación transversal. Hay 8 cantones de ventilación.

6.3.2.4. Túnel Shinlim Bongchun en Seúl (ROK):

- **Geometría y tráfico:** El túnel está actualmente en la etapa de proyecto. Estará prohibido al tráfico pesado y a autobuses. [21]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** El túnel tiene un sistema combinado de ventilación: tramos con ventilación longitudinal (incluyendo las bifurcaciones) y tramos con sistema de ventilación transversal.
- **Ventilación en caso de incendio:** En los tramos con ventilación transversal, los exutorios son de actuación remota y se abren en un tramo de 300m en el entorno donde está el incendio.

6.3.2.5. Kaisermühlen en Viena (A)

- **Geometría y tráfico:** El túnel Kaisermühlen es un túnel excavado entre pantallas. Gran parte del área de superficie está edificada y supone gran valor económico (es un área de negocios internacional). La intensidad de tráfico es muy elevada. La sección transversal del túnel es bastante grande. Hay múltiples ramales y carriles paralelos que funcionan como vías colectoras para los accesos al área de negocios. No hay restricciones al transporte de mercancías peligrosas. [22]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** El sistema de ventilación es longitudinal y rara vez se utiliza. Sin restricciones de emisiones en las bocas.
- **Ventilación en caso de incendio:** Sistema longitudinal. Los ramales están equipados con ventiladores de chorro. Las salidas de emergencia están presurizadas.

6.3.2.6. Túnel Leopoldo II en Bruselas (B)

- **Geometría y tráfico:** El túnel Leopoldo II se construyó en parte mediante perforación y en parte mediante excavación entre pantallas, presentando secciones transversales variadas. La intensidad de tráfico es alta, estando frecuentemente congestionado. Hay numerosos ramales de acceso y el tráfico está prohibido para vehículos de más de 3,5 toneladas y para las mercancías peligrosas. Algunos tramos del túnel tienen conexiones con el metro. [23]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** El sistema de ventilación es longitudinal con ventiladores de chorro a lo largo del túnel y con ventiladores de inyección y extracción situados en estaciones de ventilación. No hay restricciones para emisiones en las bocas. La contaminación en el interior del túnel es controlada por la Agencia de Medio Ambiente de Bruselas.
- **Ventilación en caso de incendio:** Extracción masiva de humos por las estaciones de ventilación. Control automático de la velocidad del aire. Ventilación de los ramales por medio de ventiladores de chorro.

6.3.2.7. Túnel Belliard en Bruselas (B)

- **Geometría y tráfico:** El túnel Belliard tiene diversos ramales para las conexiones con la superficie. Algunos ramales dan también acceso a aparcamientos subterráneos. [24]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** El sistema de ventilación es similar al descrito para el túnel Leopoldo II. El control de la ventilación se realiza en función de la intensidad de tráfico.
- **Ventilación en caso de incendio:** Extracción masiva de humos por las estaciones de ventilación. Control automático de la velocidad del aire. Ventilación de los ramales por medio de ventiladores de chorro.

6.3.2.8. Túneles Blanka, Mrazovka, Strahov en Praga (CZ)

- **Geometría y tráfico:** Blanka es un conjunto formado por tres túneles [25]. Los túneles Mrazovka y Strahov pertenecen a un conjunto de dos túneles [26]. Estos cinco túneles se construyeron en parte mediante perforación y en parte mediante excavación entre pantallas, presentando secciones transversales variadas (con forma de herradura o sección rectangular). Hay numerosos ramales. Está restringido el acceso a los túneles de vehículos de más de 12 toneladas.
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Los túneles Blanka y Mrazovka tienen sistemas combinados de ventilación: sistema longitudinal asociado a un sistema transversal en las bocas. Hay restricciones para las emisiones en 3 bocas. (El parámetro que activa el control de emisiones en la boca es la concentración exterior de NO₂). El túnel Strahov tiene un sistema de ventilación transversal puro.
- **Ventilación en caso de incendio:** Túneles Blanka y Mrazovka: extracción de humo a través de exutorios con control remoto. Control de la velocidad del aire. Túnel Strahov: extracción de humo a través de conducto de extracción. No hay exutorios con control remoto ni control de la velocidad del aire.

6.3.2.9. Túnel de servicio KEHU en Helsinki (FIN)

- **Geometría y tráfico:** El túnel KEHU es un túnel de servicio en el centro de Helsinki que da acceso a los centros comerciales, viviendas, edificios de oficinas y aparcamientos subterráneos. Su construcción fue mediante excavación con voladuras. El tráfico es muy reducido, estando prohibido para los vehículos pesados y de mercancías peligrosas. Hay cuatro glorietas subterráneas y diversos ramales de acceso [27].
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Sistema de ventilación longitudinal.
- **Ventilación en caso de incendio:** Ventilación longitudinal y pozos de extracción masiva de humo.

6.3.2.10. Túnel Courier en Annecy (F)

- **Geometría y tráfico:** Courier es un túnel excavado entre pantallas y su construcción se ha integrado por completo en la nueva área urbana (centros comerciales y de ocio y viviendas). El túnel da acceso a aparcamientos subterráneos. Es un túnel de gálibo reducido que presenta congestiones de tráfico de vez en cuando. El tráfico está prohibido para los vehículos pesados y de mercancías peligrosas. [28]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** El sistema de ventilación es longitudinal controlado en base a la calidad del aire en el interior. Es reversible con el fin de empujar el aire hacia la boca en la que los niveles de polución exteriores sean menos sensibles (incluso en contra del sentido de los vehículos).
- **Ventilación en caso de incendio:** Ventilación longitudinal con escenarios específicos teniendo en cuenta el túnel y los aparcamientos. Las puertas resistentes al fuego que dan acceso a los aparcamientos son de control remoto y se cierran en caso de incendio en el túnel o en los aparcamientos. Las salidas de emergencia y los accesos peatonales del aparcamiento tienen su propia ventilación. Los sistemas de ventilación del túnel, aparcamiento y acceso peatonal son independientes.

6.3.2.11. Túnel A86 Duplex en el área de París (F)

- **Geometría y tráfico:** El Duplex A 86 es un túnel con calzadas superpuestas en el mismo tubo y de gálibo reducido. Fue construido con una tuneladora de gran tamaño. El acceso está prohibido para vehículos pesados de más de 3,5 toneladas y para los vehículos que utilizan como combustible el GLP y el GNL. El túnel Duplex es de peaje [29].
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** El sistema de ventilación es transversal controlado mediante detectores de NO₂, CO y opacidad.
- **Ventilación en caso de incendio:** El humo se extrae por los conductos de extracción del sistema de ventilación transversal. Los exutorios están controlados de manera remota. El movimiento del humo se controla mediante ventiladores de chorro y cortinas de aire para los ramales.

6.3.2.12. Túnel Croix-Rousse en Lyon (F)

- **Geometría y tráfico:** El túnel se construyó mediante excavación con voladuras. Está prohibido el tráfico para vehículos de más de 3,5 toneladas. El túnel paralelo, también utilizado como vía de emergencia, es un túnel multimodal utilizado por el transporte público, peatones y ciclistas. [30]

- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** El sistema de ventilación es longitudinal. La gestión de la extracción del aire viciado (conforme a las condiciones de tráfico y a la calidad del aire en el túnel) se basa en las condiciones ambientales en las bocas, utilizando tanto la ventilación longitudinal como la extracción a través de pozos o una combinación de ambas con el fin de limitar la descarga de contaminantes cerca de las áreas de viviendas.
- **Ventilación en caso de incendio:** Las galerías transversales que conectan el túnel de carretera con el túnel multimodal están presurizadas. Hay 5 pozos de extracción masiva en el túnel de carretera. El control de la corriente longitudinal del aire y el confinamiento del humo dentro de este túnel se realiza con ventiladores de chorro. En el túnel multimodal la extracción de humo se realiza con un sistema de ventilación longitudinal y extracción masiva usando dos galerías conectadas a los pozos de extracción del túnel de carretera.

6.3.2.13. Túnel A14 A 86 en Paris (F)

- **Geometría y tráfico:** Es un túnel excavado entre pantallas bajo el Distrito Financiero de La Défense. Tiene conexiones y muchos ramales de acceso a los edificios, centros comerciales y aparcamientos subterráneos. Está prohibido el tráfico de mercancías peligrosas. [31]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** El sistema de ventilación es una combinación de todo tipo de sistemas debido a las diferentes etapas de construcción, al largo periodo de tiempo entre las mismas y a la evolución de los requerimientos de ventilación y de seguridad. No hay ninguna precaución particular por motivos ambientales. El control de la ventilación se basa en las medidas de NO₂, CO y opacidad.
- **Ventilación en caso de incendio:** La instalación dispone de varias estaciones de ventilación que permiten una extracción masiva de humo. Tiene escenarios predefinidos pero no dispone de control en tiempo real de la corriente de aire longitudinal. Existen numerosas conexiones con infraestructuras vecinas (centros comerciales, metro, red ferroviaria regional, etc.).

6.3.2.14. Voie des Bâtisseurs en el Distrito Financiero de La Défense (F)

- **Geometría y tráfico:** Es un túnel unidireccional que da acceso a numerosos bloques de oficinas, centros comerciales y aparcamientos del Distrito Financiero de La Défense. Se trata de un túnel de servicio con tráfico reducido, alto porcentaje de camiones y prohibido para las mercancías peligrosas. [32]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Sistema de ventilación longitudinal.
- **Ventilación en caso de incendio:** Sistema longitudinal. Los accesos a los diferentes habitáculos, aparcamientos y edificios disponen de puertas resistentes al fuego que se cierran en caso de incendio en el túnel y permiten independizar en diferentes sectores.

6.3.2.15. Tunnel Valsassina (I)

- **Geometría y tráfico:** El túnel Valsassina tiene 3,3 km de longitud con un largo ramal de acceso de 2 km que entronca con el túnel mediante un enlace subterráneo. Existen otros ramales subterráneos más cortos. El túnel dispone de una galería de ventilación situada en la bóveda separada del espacio destinado al tráfico mediante un falso techo. En un tramo del túnel esta galería es reversible disponiendo de un solo conducto, mientras que en el otro dispone de dos conductos, uno para suministro de aire fresco y otro para extracción

de humo. Está equipada con 85 boquillas motorizadas y controladas remotamente. Hay dos estaciones de ventilación (Bione y Lecco) que conectan a la superficie por medio de pozos. [33]

- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Ventilación longitudinal con 20 tramos equipados cada uno con 3 o 4 ventiladores de chorro. El aire se extrae a través de la estación de ventilación de Bione. En caso de tráfico muy denso se inyecta adicionalmente aire fresco desde la estación de ventilación de Lecco a través de la galería de ventilación.
- **Ventilación en caso de incendio:** El humo se extrae a través de la galería de ventilación hacia las estaciones de Bione y Lecco según la localización del fuego. Los ventiladores de chorro se utilizan para el control de la velocidad del aire en el túnel y para el confinamiento del humo en la zona del incendio.

6.3.2.16. Túnel bajo Le Rocher en Mónaco (MC)

- **Geometría y tráfico:** El túnel bajo Le Rocher se construyó mediante excavación con voladuras. Uno de los ramales del túnel reutiliza un antiguo túnel ferroviario del siglo XIX. El túnel se presenta bajo la forma de doble "Y". En otro de los ramales está prohibido el paso de mercancías peligrosas y otro tiene un gálibo reducido de 3,2 m. El tráfico pesado de más de 3,5 toneladas está prohibido durante las tres horas punta diarias. [34]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Sistema de ventilación longitudinal.
- **Ventilación en caso de incendio:** Ventilación longitudinal con 3 escenarios de incendio predefinidos. El túnel bajo Le Rocher tiene 8 conexiones con la superficie. Se han instalado cuatro cortinas de agua en las principales conexiones que son activadas en caso de incendio. También se ha instalado en un tramo del túnel un sistema de rociadores para proteger su estructura y los edificios que están en superficie.

6.3.2.17. Túnel Opera en Oslo (N)

- **Geometría y tráfico:** El túnel Opera es un conjunto de 4 túneles: uno sumergido, otro que se construyó mediante excavación entre pantallas y los otros dos construidos mediante excavación con voladuras. Estos túneles tienen diversos ramales. [35]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Sistema de ventilación longitudinal.
- **Ventilación en caso de incendio:** El incendio de proyecto es de 100 MW con la excepción del túnel sumergido que se proyectó para una potencia de 300 MW.

6.3.2.18. Complejo de Túneles en Tromsø (N)

- **Geometría y tráfico:** El complejo de Tromsø incluye 3 túneles interconectados mediante glorietas. Todos se construyeron con el procedimiento de excavación con voladuras. Cada uno de ellos es un tubo único con tráfico bidireccional. El conjunto de túneles da también acceso a un aparcamiento subterráneo que a su vez tiene 3 accesos directos al exterior. [36]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Sistema de ventilación longitudinal. Los sistemas de ventilación del aparcamiento y de los túneles son independientes.
- **Ventilación en caso de incendio:** Ventilación longitudinal. Las puertas que dan acceso al aparcamiento son resistentes al fuego y se cierran en caso de incendio.

6.3.2.19. M30 – By-pass en Madrid (E)

- **Geometría y tráfico:** El túnel se construyó con una tuneladora de gran tamaño. Dispone de muchos ramales de entrada y salida y el tráfico es muy elevado. Está prohibido el paso de vehículos > 7,5 toneladas y el de mercancías peligrosas. [37]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Sistema de ventilación transversal con 4 estaciones de ventilación que operan en función de los datos de CO, NO y visibilidad. Dichas estaciones están equipadas con sistemas de filtrado de aire para partículas y NOx.
- **Ventilación en caso de incendio:** Extracción del humo a través de los conductos del sistema de ventilación transversal. Las trampillas no están controladas remotamente.

6.3.2.20. M30 – Rio en Madrid (E)

- **Geometría y tráfico:** El túnel M30-Rio es un túnel excavado entre pantallas, con muchos ramales de acceso y elevada intensidad de tráfico. Está prohibido el paso de vehículos > 7,5 toneladas y el de mercancías peligrosas. [38]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Sistema de ventilación longitudinal con estaciones para inyección de aire y extracción masiva. Los ramales se ventilan mediante un sistema longitudinal, habiéndose proyectado una estación cuando el ramal tiene una longitud superior a 300m. Las estaciones de ventilación están equipadas con sistemas de filtrado de aire para partículas y NOx.
- **Ventilación en caso de incendio:** Extracción masiva de humo a través de las estaciones de ventilación. Los ventiladores de chorro no actúan en caso de incendio.

6.3.2.21. Northern y Southern Link en Estocolmo (S)

- **Geometría y tráfico:** Los túneles Northern Link [39] y Southern Link [40] se construyeron mediante excavación con voladuras. Disponen de varios ramales y no tienen ninguna restricción al tráfico.
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Sistema de ventilación longitudinal con pozos de extracción en los extremos de los túneles principales para limitar la emisión de contaminantes en las bocas. Las emisiones de NOx son las que se tienen en cuenta para el control de la ventilación.
- **Ventilación en caso de incendio:** Extracción del humo del túnel principal a través de las estaciones de ventilación situadas cerca de las bocas. Ventilación longitudinal para los ramales.

6.3.2.22. Conjunto de túneles Sytwende en La Haya (NL)

- **Geometría y tráfico:** Este conjunto incluye 3 túneles, siendo uno de ellos (Vliettunnel) multimodal (de carretera y ferroviario) con tubos separados. Los túneles se construyeron mediante excavación con voladuras. El tráfico de mercancías peligrosas está parcialmente permitido: los líquidos inflamables están autorizados pero no así en los gases tóxicos licuados que están prohibidos. [41];
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Sistema de ventilación longitudinal.
- **Ventilación en caso de incendio:** Sistema de ventilación longitudinal.

6.3.2.23. Túneles Ville-Marie y Viger en Montreal (CND / QC)

- **Geometría y tráfico:** Los túneles se construyeron por el método de excavación entre pantallas. El túnel Ville-Marie tiene un intercambiador subterráneo con un ramal principal hacia el Este y diversos accesos a los viales de superficie. Dispone de 6 pozos de ventilación que incluyen los cuartos técnicos electromecánicos y las estaciones de ventilación. El número de carriles varía de tres a cinco en cada sentido de tráfico. Los tubos se superponen hacia la mitad de la longitud del túnel de Ville-Marie. El túnel Viger tiene dos pozos de ventilación y solo un ramal de acceso al exterior. [42].
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** El sistema de ventilación del túnel Ville-Marie es semi-transversal con 6 estaciones de ventilación situadas en los pozos: 42 ventiladores para suministro de aire fresco y 31 ventiladores para extracción del aire contaminado. El túnel Viger tiene un sistema de ventilación longitudinal con cuatro ventiladores de chorro en cada sentido.
- **Ventilación en caso de incendio:** En el túnel Ville-Maire, el humo se extrae a través de las estaciones de ventilación. El túnel Viger tiene dos pozos de ventilación y el humo se extrae mediante tres ventiladores en cada pozo.

6.3.2.24. Boston Central Artery (USA)

- **Geometría y tráfico:** Boston Central Artery es un túnel complejo con numerosos ramales que fue construido por el método de excavación entre pantallas. Cruza dos líneas de metro, una por encima y otra por debajo. [43]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** El sistema de ventilación es una combinación de los sistemas transversal puro y semi-transversal, así como sistema longitudinal con ventiladores de chorro y toberas tipo Saccardo.
- **Ventilación en caso de incendio:** El humo puede extraerse tanto por los conductos del sistema de ventilación transversal o semi-transversal, como por las estaciones de extracción masiva en los tramos del túnel que tienen sistema de ventilación longitudinal.

6.3.2.25. Túnel M7 Clem Jones en Brisbane (AUS)

- **Geometría y tráfico:** El túnel se construyó en parte con tuneladora (37% de la longitud) y en parte por el método convencional a sección completa. Dispone de 7 ramales de entrada y salida. [44]
- **Ventilación en condiciones normales de explotación:** Sistema de ventilación longitudinal con ventiladores de chorro. El aire viciado se extrae utilizando las estaciones de ventilación ubicadas en las bocas.
- **Ventilación en caso de incendio:** La extracción de humo se realiza a través de los exutorios situados en la parte superior.

6.3.3. Principales conclusiones del análisis de los cuestionarios

6.3.3.1. Tráfico e incendio de proyecto

La mayoría de los túneles estudiados no permiten el paso de mercancías peligrosas. Por tanto el tamaño del incendio de proyecto se limita a 30 MW o incluso menos para aquellos túneles con gálibo reducido ya que solo permiten el paso de vehículos ligeros. Sólo cuatro túneles

(Kaisermülhe en Viena (A), Southern y Northern links en Estocolmo (S), Opera en Oslo (N) y Sijtwende en La Haya (NL)) permiten el paso de mercancías peligrosas.

Para el conjunto Opera en Oslo (N) la potencia de incendio de proyecto es de 100 MW para los túneles construidos mediante excavación entre pantallas y excavación con voladuras. La potencia de incendio adoptada para el túnel sumergido es de 300 MW, principalmente debido a razones estructurales.

6.3.3.2. Elección del sistema de ventilación

Casi todos los túneles estudiados son unidireccionales. Por tanto las estrategias de ventilación longitudinal en situación normal o de incendio son frecuentemente adecuadas, siempre que no haya congestión de tráfico. En ese caso se requieren equipamientos y medidas adicionales para garantizar la seguridad de los usuarios.

Sin embargo, la ventilación en caso de incendio raramente se basa en sistemas de ventilación longitudinal puros (solo lo tienen seis de los túneles – Opera en Oslo (N), Tromsø (N), Courier en Annecy (F), Sijtwende en La Haya (NL), Southern y Northern links en Estocolmo (S)). En la mayoría de los casos el sistema de ventilación longitudinal para el caso de incendio incluye también zonas de extracción masiva o galerías de extracción de humo, con el fin de reducir lo más posible su propagación por el túnel y limitar las consecuencias sobre los pasajeros que pudieran quedar bloqueados por una congestión. La distancia entre las zonas de extracción masiva varía generalmente entre 400m y 600m.

El funcionamiento del sistema de ventilación longitudinal en caso de incendio incluye en algunos casos dos etapas:

- Primera etapa en la que la velocidad de la corriente longitudinal se controla a baja velocidad con el fin de mejorar la estratificación del humo durante la auto-evacuación;
- Segunda etapa donde la velocidad de la corriente longitudinal se aumenta para empujar el humo en una sola dirección durante la intervención de los cuerpos de Bomberos.

En algunos casos (Ville-Marie (CDN/QC), Shinlim (ROK), A14-A86 (F), Chiyoda y Yamate (J), Strahov (CZ)), el sistema de ventilación en caso de incendio se basa parcialmente o por completo en sistemas de ventilación transversal.

En pocos casos (A14-A86 (F), Ville Marie (CDN/QC)), las restricciones de espacio junto con las permanentes ampliaciones de las redes de carreteras subterráneas han dado lugar a varias combinaciones de diferentes sistemas de ventilación.

En algunos túneles se instalan equipamientos específicos adicionales para en caso de incendio aislar e independizar los diferentes ramales de la red.

- Por ejemplo, en el Duplex A-86 (F) se utilizan cortinas de aire para mantener la presurización del tubo seguro y evitar la propagación del humo en los ramales de acceso.
- El túnel bajo Le Rocher en Mónaco (MC) dispone de cortinas de agua en las zonas de los ramales de los accesos con el fin de limitar la propagación del humo a los tramos aguas arriba y de reducir su temperatura
- En otros túneles, la independencia, en caso de incendio, entre los distintos ramales se consigue mediante el control del sistema de ventilación para conseguir que no haya corrientes de aire (velocidad cero) en las zonas de entronque.