

APUNTES CURSO CI57B

INCENDIOS EN TÚNELES. 2009.

INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos en construcción han permitido aumentar el número de tramos subterráneos. Cada día se construyen más túneles y más largos, y la seguridad en ellos se vuelve cada día más importante. Esto es por las consecuencias catastróficas que tienen estos siniestros: con gran número de personas muertas o heridas, con altos costos directos incluida la reparación del túnel y los equipos, y con altos costos indirectos por el cierre o parada del túnel (Costo por dejar de hacer actividades económicas por el túnel).

Entre los riesgos posibles, el incendio de un vehículo es súper importante considerarlo, ya que no es un evento muy extraño que pueda ocurrir y sus consecuencias pueden ser catastróficas.

Es vital considerar que los incendios en túneles ocurren. Así lo podemos ver en esta tabla sobre los últimos incendios con consecuencias de daño para las personas sólo en túneles de carreteras. Existen otras tablas de accidentes para túneles ferroviarios y para metros.

Uno de los incendios más importantes fue el ocurrido en el túnel Mont Blanc (túnel que une Francia e Italia), el cual produjo 39 muertos al incendiarse un camión que transportaba harina y mantequilla y provocar una explosión en cadena de los depósitos de combustible de otros vehículos. A los pocos meses ocurrió otro incendio en Austria. Estos siniestros promovieron el estudio de nuevas normativas y reglamentación para los incendios en túneles, especialmente en Europa.

(En el interior del túnel se alcanzaron temperaturas superiores a los 1.000 grados centígrados, lo que hizo imposible ninguna operación de rescate hasta cinco o seis días después, cuando todavía el calor hacía difícil la actuación de los bomberos. Las imágenes lo dijeron todo, aquello se convirtió, en cuestión de segundos, en un horno crematorio donde, pasado el trance, el único objetivo era identificar las cenizas. Dos meses más tarde, en el túnel de Tauern (Austria), se produjo una situación similar aunque con un balance menos trágico, 12 muertos y 49 heridos. En ambos sucesos quedó patente que la actuación humana ante una escena así no podía ir más allá de llevarse las manos a la cabeza de desesperación e impotencia.)

Por lo tanto, este problema debe considerarse en el diseño de túneles y debe preverse el comportamiento de éste frente a diversos escenarios de incendios. Por consiguiente el sistema de ventilación de un túnel debe diseñarse para controlar los humos producidos por incendios, y no diseñarse para controlar la contaminación vehicular, ya que esto último quedaría controlado por tener menores requerimientos. Además, aunque no tengamos reglamentación exigente con respecto al tema en países sudamericanos, existe bastante información internacional respecto al tema, en la cual debemos apoyarnos.

PROBLEMÁTICA

Según las estadísticas, la siniestralidad en los tramos subterráneos de carretera es similar a la que se produce en los tramos a cielo abierto. La mayoría de estos incidentes cotidianos no terminan en tragedia, pero cuando se produce un accidente grave, sus consecuencias son más dramáticas dentro de un túnel, por lo siguiente:

Efecto horno. La concentración del humo y calor que se produce en el interior de un túnel, es debida a que no existe hueco alguno por donde pueda salir el humo y el calor de una forma inmediata y natural. Esto genera el denominado "efecto horno", que consiste en acumulación progresiva del calor, que se traduce en un aumento continuado de la temperatura. Se le denomina efecto horno, porque la situación es muy parecida a lo que ocurre con el horno de una cocina (pero siendo los usuarios, en el caso del túnel, los que pueden llegar a terminar asados, en vez del pollo). Por supuesto, el calor no tiene porque ser considerado lo más peligroso, pues como ya se sabe, el humo es un factor mucho más peligroso en un primer momento.

Alta Radiación: Las altas temperaturas dentro de un túnel, producto del efecto horno generan grandes flujos de calor por radiación.

Efecto cañón. Este efecto se presentará, cuando se produzcan explosiones, debidas, por ejemplo, a un incendio. Imaginemos un camión-cisterna, que contiene un gas presurizado, que por efecto del calor del incendio explota, debido al aumento de la presión de vapor del gas que transporta. No es difícil imaginar, que existiendo solo una cavidad lineal, esta, se comportará como si fuera el cañón de una escopeta. Ello es debido, a que la sobrepresión generada por la explosión en el interior del túnel, solo puede liberarse hacia ambos lados a partir del punto de origen de dicha explosión. Si tal explosión se produce, la sobrepresión creada, será mayor que si nos encontráramos a cielo abierto, con lo cual, los daños para las personas, debidos a la onda expansiva, serán mayores que en un lugar a cielo abierto. También los objetos proyectados por la explosión, se concentraran, debido a que serán direccionados a través del túnel (como los perdigones de una escopeta).

Vías de escape reducidas. Por lo general, las vías de escape en un túnel son bastante reducidas, por lo que bastan sólo algunas condiciones para un desenlace catastrófico.

Menor visibilidad. Otro problema importante, es la desorientación que se produce en las personas cuando pierden la visión, debido a la acumulación del humo producido durante un incendio. Esta desorientación ocasionará, que no sepan hacia donde caminan o conducen, pudiendo generar nuevos accidentes. Serán pocos a los que se les ocurrirá salir palpando la pared, o caminando agachados para respirar un aire con menos humo, etc.

Mayor concentración de tóxicos. El reducido espacio dentro de un túnel genera combustión incompleta y mayor cantidad de tóxicos.

Comportamiento ingenuo del usuario. Este comportamiento es muy grave, pues ha sido motivo de varias muertes en incendios recientes. Hablamos de comportamiento ingenuo, cuando un usuario que está viendo fuego en un vehículo, se detiene e incluso se baja de su vehículo para contemplar mejor la escena, debido a la curiosidad que suscita lo inhabitual. No estamos hablando

de personas que cogen un extintor para intentar tratar de apagar el fuego, sino de personas espectadoras. Estas personas espectadoras, se ponen así mismas en grave peligro, por el hecho de permanecer en el interior del túnel y además, bloquean el paso a los vehículos que vienen detrás, con lo cual, también ponen en peligro a los demás usuarios. Los usuarios, lo que deberían hacer, es evacuar inmediatamente el túnel incendiado. Los usuarios, cuando están obteniendo el permiso de conducir en las autoescuelas, podrían recibir un mínimo de formación sobre como actuar en caso de incendio en lugares confinados (garajes, túneles, aparcamientos subterráneos). Con ello, es posible que dejaran de reaccionar de manera ingenua.

TIPOS DE TÚNELES

Es importante tener en consideración que hay distintos tipos de túneles y distintos requerimientos en cuanto a seguridad.

Hay muchas clasificaciones de túneles, pero podemos mencionar las siguientes:

Túneles urbanos Los que se encuentran situados en la vía pública de las ciudades.

Túneles no urbanos Se encuentran situados en el trazado de las carreteras, quedando fuera de los núcleos de las ciudades.

Esta distinción, que a simple vista parece evidente y superflua, tiene gran importancia, porque condiciona en gran medida el diseño de los elementos que componen un túnel. Los túneles urbanos, generalmente tendrán, a igualdad de longitud que los no urbanos, unas mayores exigencias de ventilación y unas medidas de seguridad más importantes.

Una variable que se utiliza mucho para definir las exigencias de seguridad de un túnel, es la IMD de tráfico (intensidad media diaria del tráfico). Lógicamente, los túneles urbanos son los que tienen mayor IMD.

Túneles en trinchera Son en realidad zanjas o trincheras que se abren, para ser luego recubiertas con un forjado que permitirá el tránsito de personas y vehículos por encima de ellas. Son típicas en las ciudades y sirven para solucionar cruces de calles con tráfico intenso, o para respetar zonas peatonalizadas. Estas trincheras, si tienen mucha longitud, se las equipa con salidas de evacuación verticales, que facilitan ascender a la superficie.

Túneles recubiertos Son realizados en carreteras donde se realizan desmontes importantes del terreno, queriéndose evitar que queden unos taludes muy grandes. Estos taludes se suelen querer evitar, porque existe peligro de corrimientos del terreno (cuando llueve mucho), o porque paisajísticamente quedan unos desmontes muy agresivos. Estos túneles se construyen, primeramente desmontando el terreno, después se construyen uno o dos tubos y por último se recubren con tierra.

Los túneles excavados, son los que se abren en el terreno, sacando solo la tierra necesaria para que quede la cavidad lineal deseada. Son la mayoría de los túneles que conocemos

Los túneles prefabricados Están constituidos por piezas que se apoyan y luego se ensamblan. Lógicamente, son realizados para atravesar el agua y no

el terreno, es decir son túneles acuáticos, que salvan barreras de agua y no barreras orográficas.

Túneles terrestres Los túneles terrestres atraviesan el terreno

Túneles fluviales Atraviesan lagos o cursos de ríos, como es el caso del túnel del río Elba en Hamburgo.

Túneles marinos Atraviesan el mar, como es el caso del Eurotúnel del Canal de La Mancha, que une Inglaterra con Francia.

Tanto los túneles fluviales como los marinos, pueden ser excavados por debajo del lecho impermeable, o prefabricados. En este último caso, en vez de excavados por debajo del lecho, las piezas prefabricadas van apoyadas sobre el mismo.

Túneles carreteros Tienen tráfico rodado, ligero y pesado.

Túneles ferroviarios Solo tienen tráfico de trenes.

Normalmente, como los usuarios de un tren atraviesan los túneles ferroviarios sin posibilidad de bajarse en ellos, estos están dotados de medidas de seguridad diferentes a las de los túneles carreteros. *En general las medidas de seguridad de los túneles ferroviarios son muy inferiores a las de los carreteros. Para justificar estas menores medidas de seguridad en los túneles ferroviarios, se suele argumentar, que estos presentan una menor siniestralidad, debido a las características propias del tráfico ferroviario.*

Túneles con tráfico en dos sentidos Se presentan cuando solo se ha construido un único tubo y la carretera que lo transita tiene tráfico con doble sentido.

Túneles con un único sentido de circulación Son frecuentes en autopistas y su particularidad reside en que cada sentido de circulación, transita por un tubo diferente, es decir hay dos túneles, uno para cada sentido de circulación. *Este tipo de túneles son mucho más seguros para los usuarios, que los que son atravesados por doble sentido de circulación. También, en caso de incendio, este tipo de túneles, a los bomberos les ofrece menores dificultades, a la hora de intervenir en la extinción y el rescate.*

Una característica del sentido de circulación del tráfico en los túneles, es el resultado del movimiento del aire por el denominado "efecto pistón". Los vehículos, al penetrar por la cavidad de un túnel, se comportan como si fueran un émbolo o pistón que empuja el aire existente en el interior del túnel, actuando este último como de cilindro. En un túnel con tráfico en un único sentido, las emboladas sucesivas que proporcionan los vehículos que lo atraviesan, generarán viento en el mismo sentido de circulación que los vehículos. Sin embargo, en un túnel con doble sentido de circulación, el viento debido a las emboladas de los vehículos será caótico, sin un sentido de circulación definido, puesto que las emboladas que producen los vehículos se contrarrestan.

Los túneles sin revestir Son aquellos en los que el terreno queda a la vista cuando los atravesamos. Suelen ser más usuales en terrenos duros rocosos, donde es difícil que se produzcan desprendimientos.

Túneles revestidos Son los que tienen algún material que los aísla de la visión directa del terreno excavado. Este material puede ser, laminas impermeabilizadoras, chapa u hormigón.

Los túneles revestidos con hormigón ofrecen, una protección adicional frente a los desconches o desprendimientos, una mayor resistencia estructural frente al fuego y un comportamiento del régimen de ventilación más laminar, con menores pérdidas de carga debidas a la fricción con las paredes.

NORMATIVA (hasta 2004)

ESPAÑA

"Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre" de 19 de noviembre del año 1998, conocida comúnmente como la IOS-98.

Es incompleta e imprecisa.

La IOS-98, no dice nada sobre las características de las instalaciones de lucha contra incendios, de las salidas de evacuación, etc. Admite los refugios como una alternativa a la galería de evacuación (galería de servicios), lo cual no es admisible bajo mi punto de vista.

FRANCIA

Circular interministerial N° 2000-63 de 25 de agosto del 2000 relativa a la seguridad en los túneles de la red nacional de carreteras. Dedicada 6 páginas a la protección contra incendios.

Regula exhaustivamente el diseño y equipamiento de todos los elementos de seguridad de los túneles carreteros. Las instalaciones de extinción están bien definidas. Las salidas de evacuación se definen con gran precisión y la ventilación tiene un tratamiento especial.

ALEMANIA

Norma alemana RABT del año 2003, que es muy cuidada en todo lo referente a ventilación. La edición de 1994 dedica más de 9 páginas a la protección contra incendios. El año 2001 se reunió un comité para buscar mejoras de la norma alemana, a raíz del incendio en el túnel Mont Blanc.

USA

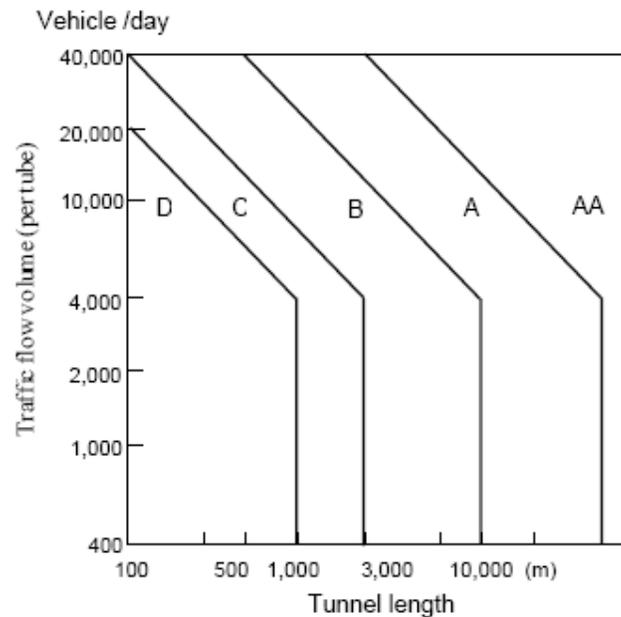
NFPA 502 del año 2004. Dedicada todo su contenido a la protección contra incendios (30 páginas)

Norma detalla los equipos y elementos de seguridad necesarios en diversos tipos de túneles. Como por ejemplo indica que "En los túneles de más de 240 m debe considerarse ventilación para control de humo". Además incorpora los datos obtenidos en el **Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, (Pruebas a escala real de distintos tipos de ventilación aplicadas al control de humo de incendios, se iniciaron a partir de 1993 y el reporte se entregó en 1995)**

No considera la realización de pruebas de ventilación con incendios generados en piscinas o palanganas de combustible.

JAPÓN: Hasta Abril de 2001 Japón tenía túneles en 8331 localidades con un total de 2653 km de largo.

Ellos comenzaron a normar la seguridad a partir del incendio en 1967 del SUZUKA tunel. Y luego el incendio de 1979 en Nihonzaka hizo revisar la norma. Japón clasifica los túneles:



Los túneles A y AA deben usar sprinklers.

La operación y el manejo de sprinkler es un tema bajo discusión. El agua de los sprinkler ayuda a controlar el fuego y evitar su propagación. Se reconoce como una herramienta efectiva para evitar el daño causado por el fuego. En Japón, al contrario que en el resto del mundo, los sprinkler son ampliamente instalados de acuerdo a la clasificación de cada túnel. Se usa porque éstos pueden enfriar el área donde se inicia el incendio y sus alrededores, y puede además controlar el fuego y brindar soporte para la lucha contra el fuego. Por otro lado, el uso de sprinkler puede botar el humo hacia el suelo y sofocar a los que evacuan y deteriorar el medio para la evacuación. Teniendo esto en vista, se requiere considerar la situación completa del fuego, humo y evacuantes para ver si se usa o no el sistema de sprinkler o que tan rápido se accione.



1979 Nihonzaka Tunnel fire accident (159 horas de duración el incendio)



Sprinkler en Japón.

La AIPCR o PIARC ocupa una posición única en cuanto a que es un forum internacional de intercambio de información : está en condiciones de tratar toda la gama de problemas del transporte por carretera y de las infraestructuras de carretera. Los participantes de la actividades de la AIPCR han descubierto que tenían mucho que aprender los unos de los otros. Ellos pueden desarrollar las políticas y métodos técnicos más eficaces teniendo en cuenta los logros y fracasos constatados en otras partes. PIARC es general de carreteras, pero dentro de su estructura existe un comité dedicado a los Túneles, y a los Incendios.

FIT es una RED EUROPEA TEMÁTICA sobre Fire In Tunnels (FIT). Brinda una plataforma Europea para la divulgación de la información del estado del arte en Incendios en Túneles.

Estas normas se han basado en el conocimiento adquirido a través de las pruebas a escala real de incendios en túneles. Los dos ensayos más importantes de este tipo que se han realizado en el mundo corresponden al proyecto EUREKA EU499 realizado en Europa y el proyecto del Memorial Tunnel en los Estados Unidos.

El proyecto EU 499 de investigación de incendios en túneles se llevó a cabo con la colaboración de Alemania, Francia, Austria, Gran Bretaña, Suiza, Suecia, Noruega e Italia entre los años 1990 y 1992 con los siguientes objetivos:

Estudio del fenómeno local del incendio: evolución espacial y temporal de temperaturas, tasa de combustión, energía liberada e influencia de la ventilación en la evolución del fuego.

Posibilidades de escape, rescate y extinción: Iluminación de emergencia, funcionamiento de sistemas de detección y alarma, vías de escape, tiempo de evacuación máximo, etc.

Influencia de la estructura en el fuego: resistencia de los materiales, calentamiento de la estructura, etc.

Re-utilización de la estructura: daños, posibilidades y tiempos de reparación.

Validación de métodos numéricos.

Para su elaboración se realizaron ensayos en túneles distintos en Alemania, Finlandia y Noruega y en laboratorios de Alemania.

El proyecto de ensayo de ventilación de túneles en caso de fuego del Memorial Tunnel fue llevado a cabo a partir de 1993 en un túnel abandonado en West Virginia. Para el ensayo se realizó una exhaustiva monitorización del túnel, así como la reparación de instalaciones de ventilación preparadas para poder realizar ensayos con fuego con los siguientes sistemas de ventilación:

I Transversal
I Semitransversal
I Transversal con un pozo de extracción
I transversal con trampillas de extracción
I Natural
I Longitudinal con aceleradores de chorro.

NORMATIVA (últimos avances)

A comienzos del 2004 se creó una Directiva Europea 2004/54/EC del Parlamento Europeo con directrices mínimas que deben cumplir los túneles de Europa.

La mayoría de los países mencionados anteriormente han actualizado sus normativas basados en la nueva directiva europea y las últimas publicaciones PIARC.

En USA fue publicada la nueva NFPA versión 2008.

A nivel Latinoamericano el único país con una norma completa es Brasil que publicó este año (2009) su norma ABNT NBR 15661 “Protección contra incendio em tuneis”.

Los países europeos más avanzados en este tema son: Francia, Alemania, Reino Unido, Austria, Suiza y Noruega.

CONTROL DE HUMOS

Los objetivos del control de humos e incendios en túneles son:

- Salvar vidas posibilitando la evacuación de usuarios
- Posibilitar la lucha contra el fuego y el rescate.
- Evitar explosiones
- Limitar el daño a la estructura del túnel y al equipamiento.

Dentro de los aspectos que hay que considerar en el diseño del sistema de control de humos, están los siguientes:

Control radiación. Entre 2 y 2,5 kW/m² pueden ser tolerados varios minutos

Control convección. Temperatura del aire no debiera exceder los 80°C, la cual es tolerada durante 15 minutos.

Control visibilidad. Visibilidad de al menos 7 m para caminar con tranquilidad en una atmósfera humeante. Para leer las señales debe ser de 15 m.

Control toxicidad. Como no es un parámetro que pueda determinarse efectivamente, ya que depende de muchos factores tales como el tipo de combustible del incendio, se considera que al asegurar el mínimo de visibilidad se mantendrán los gases tóxicos a un nivel aceptable.

Para comenzar el diseño de los elementos de seguridad y el sistema de control de humos dentro de un túnel es necesario definir ciertos escenarios de incendios, de acuerdo al tipo de túnel y al uso que se le da.

Para el diseño de la estructura del túnel resistente al fuego es necesario ocupar la temperatura de los gases calientes, y para el diseño de la ventilación es necesario ocupar la potencia del incendio expresada en MW o la tasa de humo liberada versus el tiempo.

Cabe mencionar que la evaluación de la resistencia al fuego de las estructuras dentro de un túnel no se rige por las curvas tiempo-temperatura que se utilizan normalmente, sino que se rige por otras curvas como las siguientes:

RWS: Elaborada en Holanda. Se basa en asumir que en el escenario del peor caso puede ocurrir un incendio de un tanque de 50m³ de petróleo con una carga de 300 MW con una duración de hasta 120 minutos. Esta curva se basó en los resultados de unos ensayos llevados a cabo en Holanda en 1979.

RABT: Elaborada en Alemania, basada en pruebas a escala real realizadas en Alemania. El criterio de falla es que la temperatura de los refuerzos no puede elevarse por sobre los 300°C.

ISO: Curva común como la Chilena

HC: Curva para incendios de hidrocarburos (combustibles)

Se deben diseñar varios escenarios de incendio para obtener una estrategia de prevención de incendios óptima.

Los escenarios de incendios deben definirse para brindar especificaciones técnicas con respecto a :

- Ingeniería estructural del túnel
- Ensayos de materiales para la estructura y equipamiento
- La elección del sistema de ventilación
- La operación del túnel
- Entrenamiento del equipo de personas encargados de los incendios.

Los peores casos no deberían considerarse para el diseño debido a su baja probabilidad de ocurrencia. Sin embargo, si las consecuencias son catastróficas, por ejemplo en un túnel sumergido, tales circunstancias deben ser tomadas en cuenta para el diseño.

Los escenarios de incendio deberían incluir la investigación de diferentes condiciones de operación, por lo tanto es un proyecto **multidisciplinario**.

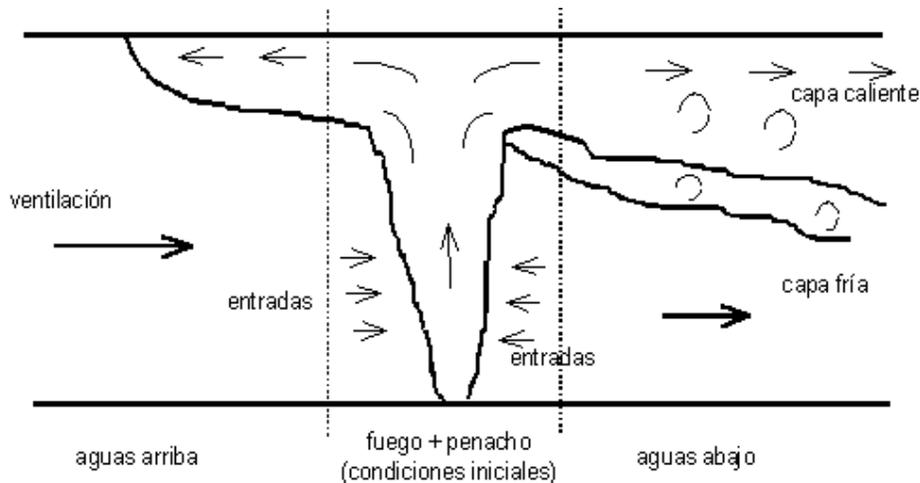
- Tráfico congestionado (horas punta)
- Tráfico atascado (debido a un accidente)
- Tráfico denso (se incrementa la posibilidad de múltiple colisiones)
- Disponibilidad de equipos de lucha contra el fuego.
- Disponibilidad para detectar un incendio y/o informar al operador.
- Tiempo de llegada de la brigada contra incendios.
- Disponibilidad de salidas de emergencia
- Capacidad de emergencia del sistema de ventilación
- Capacidad de remoción de humos del sistema de ventilación
- Gestión del tráfico para mantener los vehículos aguas abajo del incendio fuera del túnel.

COMPORTAMIENTO DE LOS HUMOS

Depende de los siguientes factores:

- posibilidad de reducir el suministro de oxígeno a la fuente del incendio
- calor liberado
- calor de convección
- **pendiente del túnel.**
- **tipo de ventilación**

- dimensiones del espacio del tráfico y posibles obstrucciones
- impulsión causada por el movimiento de vehículos **EFFECTO PISTÓN**.
- **influencias meteorológicas** (velocidad y dirección del viento)



Básicamente se puede decir que el humo se eleva hacia el cielo debido al calor liberado, y éste continúa su flujo en una dirección cuando la velocidad longitudinal es alta, y en ambas direcciones cuando la velocidad longitudinal es baja. Por lo tanto, hay un espacio sin gases ni humos un par de metros del suelo, por lo menos durante un corto periodo de tiempo.

Una vez que comienza el desarrollo del incendio se produce a partir del foco un penacho a elevada temperatura que por efecto de la flotabilidad impacta en el techo y se estratifica, manteniéndose en la zona superior de la sección. Cuando el humo caliente se aleja del foco comienza a enfriarse descendiendo y ocupando toda la sección. El foco se alimenta por su parte inferior, con corrientes de aire re-entrantes. En función de las condiciones de la corriente de aire longitudinal existente en el túnel, aguas arriba del foco, la nube de humos se distribuirá en mayor o menor medida produciendo el retorno (**back layering**) de la capa caliente de humos. Existe entonces una **velocidad crítica**, que es la mínima velocidad que evita el fenómeno de back layering.

Entonces la idea es tener una ventilación que supere la velocidad crítica, pero no demasiado para disminuir al máximo el enfriamiento de los gases calientes y así evitar que la capa de humos aguas abajo del incendio descienda hasta el suelo.

Como ya se vio, la peligrosidad de la nube de humos viene dada por la cantidad de **contaminantes** que contenga, la reducción de la **visibilidad** producida y los efectos de la temperatura por **radiación** o **convección**.

Cuando se inicia un incendio, la temperatura se va incrementando paulatinamente, aumentando la cantidad de gases generados los cuales por efecto de la flotabilidad se elevan a la parte superior de la sección del túnel. Si el incendio se produjese al aire libre, el calor generado por el incendio se disiparía. Sin embargo, cuando el incendio se produce en recintos cerrados

(como es el caso de un túnel), los gases acumulados en las proximidades del combustible, con una temperatura elevada, emiten energía por radiación la cual contribuye a gasificar el combustible existente incrementando la temperatura del foco. Este proceso de realimentación del incendio por radiación lleva a un incremento muy importante de la temperatura en las proximidades del foco denominado **flash-over**.

TIPOS DE VENTILACIÓN

Ventilación longitudinal natural

No corresponde propiamente a un sistema de ventilación al no disponerse instalaciones de ventilación ya que la dilución de contaminantes se produce únicamente por efectos meteorológicos o del tráfico creando una corriente suficiente de aire en el túnel. Suele emplearse solamente en túneles muy cortos (no superior a 300 metros) ya que no existe ningún control sobre la ventilación en caso de accidente.

Ventilación longitudinal natural con pozo (TUBO EXTRACCIÓN)

Este sistema, prácticamente en desuso, es muy similar al longitudinal natural pero se potencia el efecto atmosférico creando un pozo de ventilación gracias al cual, debido al efecto atmosférico, parte del aire viciado se extrae del túnel. De esta forma, manteniendo la misma concentración máxima admisible se dobla la longitud del túnel permitida. Sin embargo, en caso de algunas circunstancias meteorológicas pueden aparecer funcionamientos incorrectos del sistema.

Ventilación longitudinal con ventiladores en pozo (TUBO EXTRACCIÓN)

Partiendo del concepto anterior este sistema permite el control correcto del flujo de aire con contaminantes en la dirección deseada. Es posible tener configuraciones en las que a través del pozo se sople aire fresco o se aspire aire viciado. En cualquier caso, el segundo tipo es más favorable ya que evita las molestias de un fuerte chorro en la mitad del túnel y en zonas urbanas no sale aire contaminado a través de las bocas.

Ventilación longitudinal por ventiladores de chorro (JET FANS)

En este tipo de túneles se disponen pequeños ventiladores de chorro situados a lo largo del túnel los cuales generan una corriente longitudinal de aire en el mismo. Este tipo de ventilación está especialmente indicado para túneles con un sentido único de circulación incluso para grandes longitudes. En caso de incendio, se impulsan los humos hacia la boca de salida de los vehículos, evitando el retroceso de los humos a la zona en la que se produce la retención de los coches. En túneles bidireccionales es muy conveniente que los ventiladores sean de tipo reversible para facilitar el control de los humos en caso de incendio. Su gran ventaja es un reducido coste tanto inicial como de explotación.

Ventilación longitudinal por ventiladores en pozo y aceleradores (JET FANS Y EXTRACTORES)

Es un sistema de ventilación que tiene la ventaja de que el pozo de extracción permite doblar la longitud máxima del túnel y a la vez controlar la nube de contaminantes en caso de incendio.

Ventilación semi-transversal con inyección de aire fresco

Con este tipo de ventilación se pretende dar a cada zona del túnel la cantidad de aire fresco necesario para diluir los contaminantes que allí se producen. El aire fresco se introduce a lo largo de todo el túnel a través de una serie de aberturas que comunican un conducto auxiliar con el túnel. El conducto auxiliar habitualmente va situado en un falso techo del túnel. El aire contaminado sale a través de las bocas (entradas y salidas de autos). Para prevenir el caso de incendio este tipo de ventilación puede estar preparada para invertir el sentido del aire y pasar a una aspiración a lo largo del túnel o en zonas localizadas. Para ello se disponen trampillas que se pueden abrir o cerrar según el caso.

Ventilación transversal total

Con este tipo de ventilación cada tramo del espacio de tráfico debe recibir exactamente la cantidad de aire fresco necesario para diluir las materias nocivas producidas. Igualmente, el sistema debe ser capaz de extraer aire viciado con el fin de que en el túnel no se produzca ninguna corriente longitudinal dentro del espacio del tráfico. El aire fresco se suele repartir mediante aberturas situadas al nivel de la calzada o en la parte superior mientras que el aire viciado se extrae por la parte superior del túnel. Las aberturas para la extracción de aire viciado deben situarse siempre en la parte superior del túnel para permitir la extracción de los humos en caso de incendio. Este es probablemente el sistema de ventilación más completo aunque conlleva los mayores gastos tanto de instalación como de mantenimiento y explotación. Existen dudas también sobre su capacidad para controlar la velocidad longitudinal del aire (y por consiguiente la nube de humos en caso de incendio) en caso de fuertes diferencias de presión entre bocas.

Ventilación pseudo-transversal

La ventilación pseudo-transversal está basada en la transversal total con la diferencia de que la cantidad de aire extraído es menor que la del aire inyectado, saliendo por las bocas la diferencia entre ambos. Esto permite reducir los gastos de explotación y de construcción al dimensionarse los conductos de extracción para un menor caudal. Sin embargo, la capacidad del sistema de extracción en caso de incendio se ve reducida.

Mixtos

A la hora de llevar a la práctica estos principios, las limitaciones económicas de espacio o simplemente las peculiaridades de cada túnel obligan a buscar soluciones intermedias. Una alternativa interesante consiste en diferenciar el funcionamiento del túnel en caso de servicio y en caso de incendio. Por ejemplo, una distribución de tipo longitudinal mediante aceleradores puede completarse con un sistema de extracción con trampillas telecomandadas para los casos de incendio.

HERRAMIENTAS DE DISEÑO Y EVALUACIÓN.

Modelos computacionales.

1.- Modelos numéricos para el régimen permanente

Esto corresponde a resolver ecuaciones simples.

El objetivo de los modelos numéricos para el estudio del régimen permanente es el dimensionamiento de los equipos necesarios para el sistema de ventilación del túnel, tanto para los escenarios de servicio como los de incendio.

Estos modelos se basan en el cálculo de las pérdidas de carga producidas en el túnel (ventilación longitudinal) o en los conductos auxiliares (ventilación semi/transversal) durante su funcionamiento. Para ello se resuelven las ecuaciones básicas de conservación de la cantidad de movimiento.

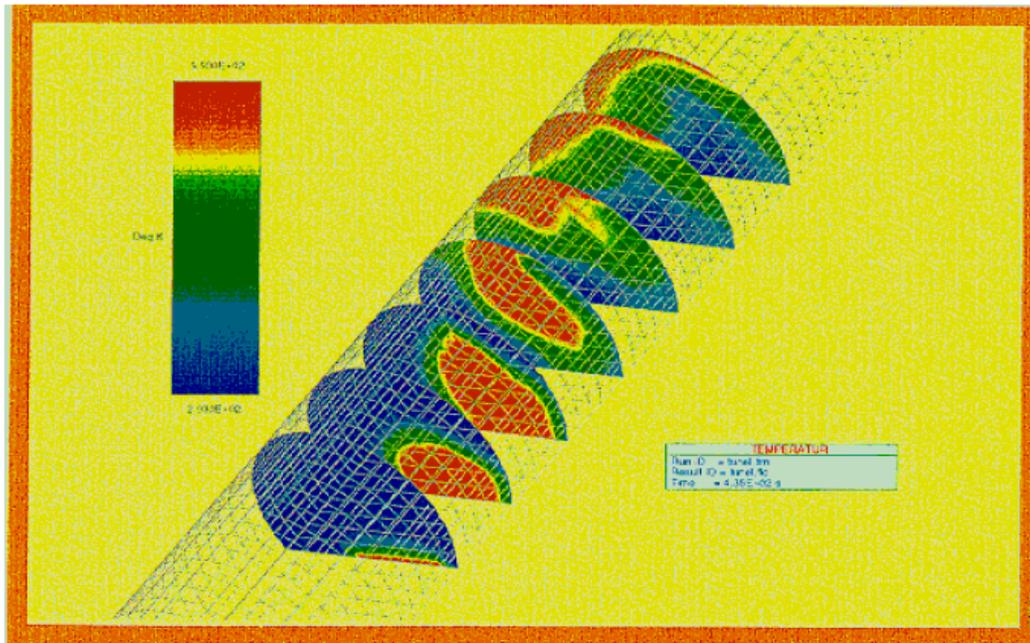
2.- Modelos numéricos para el régimen transitorio

Existen gran cantidad de tipos de modelos numéricos para el estudio en régimen transitorio del escenario de incendio en el túnel. Los modelos tridimensionales buscan como objetivo explicar el comportamiento de la zona próxima al foco del incendio. Sin embargo, el alto costo computacional y la dificultad de representar el comportamiento global del sistema de ventilación hacen que, para definir pautas de actuación del sistema de ventilación, sean más apropiados los modelos de tipo unidimensional. A continuación se hace una recopilación de los distintos tipos de modelos y la aplicación de cada uno.

2.1.- Modelos 3D de combustión (Modelos CFD Computacional Fluid Dynamic)

Los modelos tridimensionales pretenden resolver el sistema completo de ecuaciones diferenciales parciales que expresan los principios de conservación de la masa, la cantidad de movimiento, la energía y de las especies. Para ellos se divide el campo de estudio en una serie de celdillas (elementos volumétricos de control) a las que se les asignan las distintas propiedades del fluido. Hay intercambios de masa, cantidad de movimiento y energía, tanto por convección como radiación entre el aire, el objeto, los gases emitidos por éste y las paredes del túnel; las ecuaciones que rigen el fenómeno son las 5 ecuaciones de conservación de la Mecánica de Fluidos: masa, 3 de cantidad de movimiento y de la energía, además de las necesarias para modelar la combustión, la producción de hollín y la radiación. Al ser las ecuaciones de conservación en derivadas parciales, (siendo las variables independientes las coordenadas de cada punto y el tiempo) es necesario fijar, además de condiciones iniciales, condiciones de contorno apropiadas en la pared del túnel, en las paredes del objeto que arde (o alternativamente una simulación de cómo

se consume el material combustible de dicho objeto o vehículo), y en la zona de entrada aguas arriba y de salida aguas abajo. La resolución del anterior sistema de ecuaciones en derivadas parciales, junto con las condiciones iniciales y de contorno se realiza numéricamente, mediante discretización apropiada del campo de fluido y del intervalo temporal de interés.



2.2 Modelos unidimensionales. (Variante de un modelo CFD)

Estos modelos mantienen un nivel de simplicidad que permite su uso para el análisis general del fenómeno así como una interpretación de éste en términos de variables macroscópicas controlables y utilizables incluso en términos de dimensionamiento. El bajo costo operacional de este modelo permite realizar multitud de estudios. Además sus resultados pueden ser utilizados para imponer condiciones de contorno en modelizaciones más complejas.

Este método supone que toda la sección transversal se encuentra en las mismas condiciones, lo que es claramente irreal en las proximidades del foco donde los gases calientes por flotación tienden a situarse bajo la bóveda o el falso techo del túnel permitiendo una zona con aire respirable a la altura de las personas si se consigue mantener la estratificación. En este sentido cabe considerar que los resultados serán conservadores. Por otra parte, al perder los detalles en la sección transversal no se observan ciertos fenómenos como por ejemplo las recirculaciones de la capa caliente. Una de las ventajas de este modelo es que permite acoplarlo fácilmente con el comportamiento del tráfico.

2.2.1 Modelos de un solo tubo

Los modelos de un solo tubo son similares a los modelos para el régimen permanente a los que se añade el acoplamiento con el tiempo. Es decir, la

ecuación de conservación de la cantidad de movimiento queda de la siguiente forma:

$$\sum (\Delta P_{fricción} \cdot S) + (\Delta P_{sing} \cdot S) + (\Delta P_{emb} \cdot S) + (\Delta P_{atm} \cdot S) + (\Delta P_{vent} \cdot S) = \sum m \frac{dv_a}{dt}$$

Una vez resuelto el circuito hidráulico es suficiente una ecuación de convección-difusión para describir la evolución del contaminante. El modelo se completará con la ecuación de movimiento de la columna de aire que permitirá determinar la velocidad de arrastre del contaminante en cada instante.

$$\frac{\partial(\rho c)}{\partial t} = S_q - \frac{\partial(\rho c v)}{\partial x} + D \frac{\partial^2(\rho c)}{\partial x^2}$$

Donde las variables que intervienen son funciones de la posición longitudinal en el interior del túnel x y del tiempo t .

Habitualmente el desplazamiento de los humos por difusión es despreciable frente al término convectivo o de arrastre de los mismos, con lo que es razonable despreciar el término de difusión, quedando la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{c}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{S_q}{\rho} - \frac{\partial(c v)}{\partial x} - \frac{1}{\rho} c \cdot v \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

2.2.2 Modelos de redes hidráulicas

Con los modelos de redes se puede estudiar el funcionamiento de cualquier sistema de ventilación. Su aplicación está ideada para sistemas complejos donde se tengan que modelar conductos de extracción de humos, trampillas, boquillas de soplado, etc. También se puede reproducir el efecto de entradas y salidas de vehículos, habituales en túneles urbanos. El sistema es un entramado de conductos caracterizados por su caudal y presión, que se distribuyen por las distintas ramas y mallas cumpliendo leyes semejantes a las de Kirchhoff en circuitos eléctricos sustituyendo la intensidad de corriente por el caudal y la caída de potencial por la pérdida de carga. El modelo del sistema está formado por nudos y ramas. Las ramas son los tramos que unen dos nudos y cada una de ellas tiene asignada una dirección. Un camino cerrado a través de varias ramas, de tal forma que sólo se repiten el nudo inicial y el final es una malla.

2.2.3 Acoplamiento con la temperatura

Las ecuaciones presentadas anteriormente parten de la hipótesis de que la densidad varía levemente con la temperatura. Sin embargo, en caso de incendio, las variaciones de las mismas son suficientemente importantes para tenerlas en cuenta.

Para aplicar la corrección de la densidad es necesario resolver la ecuación de la transferencia de calor para establecer el valor de la temperatura en cada punto de la malla, modificar el valor de la densidad y volver a resolver las ecuaciones de masa y transferencia, lo cual hace aumentar considerablemente el coste computacional.

Una forma de simplificar el problema consiste en definir un perfil de temperatura del aire en el túnel en función de la distancia al foco del incendio y evaluar el valor de la densidad con esta distribución. Una vez estimado el valor de temperatura se resolverían de nuevo las ecuaciones de transferencia de

masa y cantidad de movimiento. Se acorta así el número de procesos iterativos a resolver y se disminuye de forma importante el coste de computación. Además, obtener la evolución de las temperaturas en el interior del túnel tiene gran importancia ya que permite definir las especificaciones que deben cumplir los equipos instalados dentro del túnel de forma que mantengan su correcta operación durante el incendio.

2.3.- Modelos por zona

Los modelos zonales en lugar de dar el detalle de lo que ocurre en cada punto, dividen el dominio en diferentes zonas o compartimentos, y dan propiedades medias de las magnitudes en cada una de ellas, o presuponen variaciones de acuerdo con reglas fijadas a priori, basadas en la experimentación o en argumentos físicos. Cada uno de los elementos antes mencionados: objeto que arde, llama, penacho, capa caliente, paredes del túnel, capa fría inferior, zona de recirculación y regiones de entrada y salida, se supone que son las zonas o módulos en que se divide el fuego, la variación de cuyas propiedades está relacionada con los intercambios de masa, cantidad de movimiento y energía con las zonas circundantes. Este tipo de modelos se ha empleado habitualmente para el estudio de la propagación de incendios en edificios, pero no se ha empleado de forma general en túneles. Sin embargo, si se ha hecho con una variación de este tipo de modelos denominados modelos gaussianos.

2.4 Modelo gaussiano de combustión (Variante del anterior)

Esta variante del modelo zonal se basa en la división del túnel a estudio en dos zonas, aguas arriba y abajo del impacto del penacho con el techo, junto con una zona de transición. Esto permite no tener que tratar todas las ecuaciones que rigen los modelos que tradicionalmente se emplean para la resolución de problemas como el planteado.

En primera aproximación, se considera que el penacho adquiere un movimiento libre, sin que le afecten las paredes del túnel. En esta zona se trabaja con un modelo unidimensional en que los perfiles de las magnitudes fluidas son autosemejantes en planos perpendiculares a la línea media del penacho, con lo que adquiere un movimiento parabólico a lo largo de ella. Por tanto las magnitudes fluidas solo son función de la distancia a lo largo de la línea media. De esta forma, las ecuaciones de conservación en derivadas parciales se convierten en ecuaciones diferenciales ordinarias. Los volúmenes de control empleados en el penacho son troncos de cono que siguen la línea media del mismo. En las secciones perpendiculares a la línea media del penacho se supone que las magnitudes fluidas presentan una distribución gaussiana derivada del perfil top-hat. En dicho perfil, las propiedades fluidas adquieren dos posibles valores uniformes según estén dentro o fuera del tronco de cono calculado en cada posición.

El flujo de la segunda zona, la difusión de gases calientes, se toma como una corriente unidireccional (en el sentido de la ventilación) que ha alcanzado la velocidad de régimen impuesta por los ventiladores.

Posteriormente se resuelve la ecuación de la energía despreciando la disipación viscosa y la difusión en la dirección de avance del viento frente a la variación convectiva en dicha dirección.

La difusión presenta una forma parabólica con condiciones de contorno en techo, paredes, suelo y en la sección perpendicular a la dirección longitudinal del túnel situada en donde impacta el penacho con el techo.

En esta última condición se necesita conocer cuanto vale el área inicial ocupada por los gases calientes.

Para ello se aplica la condición de conservación de la energía con los datos obtenidos una vez resulto la zona del penacho. De esta forma la primera sección de cálculo en esta zona se encuentra dividida en dos: una pegada al techo de área calculada y temperatura uniforme igual a la media de la última sección del penacho, y otra junto al suelo con el resto del área y temperatura igual a la temperatura ambiente.

Los modelos CFD brindan el potencial de estudiar problemas complicados, encontrados en la ingeniería de seguridad contra incendios. Las simulaciones pueden involucrar simplefase o multifase, flujo de fluido turbulento con o sin combustión, etc. Estos modelos ofrecen un medio de optimizar las soluciones de ingeniería de seguridad contra incendios para diseños innovadores. Con CFD se pueden examinar fenómenos como movimiento de aire en recintos cerrados, detección temprana de humo, efectos de sprinkler sobre capas de humo, etc. Se puede usar CFD para ampliar el entendimiento de las consecuencias de diseños alternativos.

CFD es una herramienta predominantemente de investigación que puede ayudar al ingeniero o al diseñador a explorar el impacto de algunos posibles parámetros en su diseño. DEBE ENFATIZARSE que el estado de desarrollo de un CFD *aún no permite utilizarlo como una única herramienta de diseño en un contexto regulatorio.*

En 1993 se realizó una encuesta en PIARC y se obtuvo lo siguiente:

Table 4.5.1 - Examples of numerical programs used in different countries (1993)

| Type of codes | Name of codes | Authors | Users | Remarks |
|-------------------|---------------|-----------------------------|---|-----------------------------------|
| 1D models | VENDIS-FS | INERIS, France | INERIS, France | |
| | MFIRE | US Bureau of Mines, USA | VTT, Finland | |
| | SES | Parsons Brinckerhoff, USA | Parsons Brinckerhoff, USA | |
| Zone models | TUNNEL | TNO, NL | TNO, NL | Out of use (1988) |
| | BRI2 | BRI, Japan | VTT, Finland | |
| | FAST | NIST, USA | NIST, USA | Not used in tunnels |
| | FASIT | University of Leeds, UK | University of Leeds, UK | |
| | CIFI | CSTB, France | CSTB, France | Used in buildings |
| CFD codes 2D & 3D | VESTA | TNO, NL | TNO, NL | Under development |
| | CHAMPION | | Delft Univ. Techn, NL | Out of use |
| | PHOENICS | CHAM, UK | Univ. Graz, Austria INERIS, France VTT, Finland | |
| | JASMINE | CHAM & FRS, UK | Fire Research Station, UK Univ. Lund, Sweden | Developed on the base of PHOENICS |
| | FLOW3D | Atomic Energy Authority, UK | AEA Consultant, UK HSE, UK Mott Mac Donald, UK CETU, France Univ. Graz, Austria | |
| | FLUENT | Fluent Inc, USA | FOA, Sweden | |
| | STORM | ADAPTIVE, USA | SCETAURROUTE, France | |
| | FIRR | AVI, Austria | Univ. Graz, Austria | |
| FURNACE | Australia | Univ. Sydney, Australia | | |

ENSAYOS EN TERRENO

ENSAYOS IN SITU

Como ya hemos visto, los modelos numéricos representan una importante herramienta tanto en el proyecto como la construcción de un túnel.

Por otra parte, los ensayos in situ permiten evaluar de una forma más aproximada lo que será el funcionamiento del túnel, permitiendo, además, validar los resultados obtenidos por los modelos numéricos.

Sin embargo, el alto costo que conllevan los ensayos a escala real de un túnel, así como la dificultad de realizarlos para todos los escenarios estudiados mediante los modelos numéricos, hace que ambas herramientas se complementen con el fin de entender el comportamiento del sistema de ventilación de un túnel.

1 Ensayos sin humos

La imagen que se suele tener sobre los ensayos en túneles suele corresponderse a lo que se conoce como ensayos de fuego. En realidad, una gran parte de los ensayos realizados en un túnel no son más que verificaciones de todos los sistemas que en él existen.

No sólo es preciso comprobar que cada equipo funciona correctamente sino que el conjunto de las instalaciones del túnel trabajan como se espera. Precisamente este tipo de ensayos suele revelar los defectos de mayor trascendencia. La enorme complejidad de cada uno de los sistemas instalados se refleja en la ardua tarea de compatibilizarlos a todos.

Además, este tipo de ensayos debe realizarse periódicamente para asegurar que las labores de mantenimiento no se centran únicamente en los equipos relacionados con el funcionamiento en servicio del túnel sino con las situaciones de emergencia. No hay que olvidar que los sistemas que sólo intervienen en caso de accidente no se utilizan habitualmente pero cuando se emplean suelen involucrar situaciones de riesgo de gran trascendencia por lo que hay que reducir la posibilidad de fallo.

En los sistemas de ventilación longitudinal es necesario comprobar no sólo la correcta instalación de los equipos, sino que las exigencias de caudal previstas son alcanzadas en las situaciones más extremas.

En los sistemas de ventilación semi o transversal las comprobaciones se multiplican. Es necesario verificar que los caudales de soplado y extracción se cumplen (las fugas por los conductos suelen ser elevadas reduciendo la capacidad del sistema), que las trampillas de extracción de humos se abren o cierran correctamente (de forma local o automática). Y por último que el sistema de control puede gestionar todos los sistemas en tiempo real incluso en caso de situaciones críticas con gran número de fallos en el sistema o de situaciones anómalas. En caso de que exista un sistema de ventilación auxiliar para otras dependencias o locales habrá que verificar la capacidad del sistema. Hay que tener en cuenta que en este tipo de sistemas existen dispositivos redundantes para situaciones de emergencia adicionales (ventiladores de reserva para averías de otros, sistemas automáticos de respuesta, etc).

2 Ensayos con humos

Si los ensayos anteriores deben hacerse de una forma periódica, la dificultad que entraña la realización de ensayos con humos así como la necesidad de interrumpir el tráfico a través del túnel durante un tiempo considerable los hace poco habituales, pero no menos importantes.

2.1 Fríos

Los ensayos con humos fríos son empleados habitualmente para verificar la capacidad global de extracción del sistema de ventilación.

Para realizar el ensayo se disponen bandejas con botes de humo frío que mediante un sistema de apertura controlada producen una cantidad predeterminada. Se puede así estudiar el comportamiento de la nube de humos en función de la actuación que se realice sobre el sistema de ventilación.

Sin embargo, la gran desventaja de este tipo de ensayos es que **no se refleja el comportamiento real de los humos de un incendio** en los que la flotabilidad del gas crea una estratificación sobre el aire limpio si las condiciones de ventilación son favorables. Por ello se realizan ensayos de humos calientes.

2.2 Calientes

Si los ensayos de humos fríos son difíciles de realizar e interpretar los de humos calientes requieren una preparación excepcional.

POOL FIRES (Palanganas)

REALES (quemar un auto, un neumático, etc.)

Los objetivos fijados para el ensayo de fuego son los que determinan la dificultad existente y la inversión necesaria. Entre ellos la determinación, para el túnel ensayado, de la capacidad del sistema de ventilación ante la situación de accidente con fuego y la validación de los métodos numéricos empleados.

Sin embargo, una vez que se ha finalizado una construcción de semejante envergadura el ensayo de incendio suele ceñirse a un escenario definido con unas condiciones concretas. Para llevarlo a cabo se protege la estructura frente al fuego, se colocan sensores de temperatura, CO, opacidad y velocidad del aire e incluso cámaras de video para registrar el ensayo y facilitar el posterior análisis de los resultados.

Otro objetivo es la comprobación de los planes de emergencia, la coordinación de los servicios de rescate y la concienciación de las autoridades implicadas en la seguridad del túnel. A otro nivel se encuentran los ensayos de incendio en túneles cuyo objetivo es fijar recomendaciones de carácter nacional o internacional o estudiar de una forma general el problema. Este tipo de ensayos suelen requerir importantísimas inversiones a nivel internacional.

PIARC da algunas recomendaciones para realizar estas pruebas.

A modo de resumen, en general YO recomiendo:

- **Fijar un escenario de incendio para el diseño de la ventilación.**
- **Explorar diversas condiciones o variantes del escenario de incendio definido mediante un modelo computarizado simplificado, con lo cual poder construir el manual de operación de la ventilación.**
- **Realizar una prueba de un incendio con pool FIRE que entregue datos reales sobre la performance del sistema de ventilación, y que permita ocupar dichos datos para validar algún modelo CFD.**
- **Validar y ejecutar un modelo CFD para depurar el manual de operación de la ventilación y colocarse en múltiples casos de incendios, para obtener instrucciones claras sobre que hacer en determinados casos y conocer las limitaciones del sistema.**
- **Por último, es primordial brindar una capacitación o todo el personal que esté relacionado con la operación del sistema de ventilación.**

PRUEBAS EN TÚNEL COSTANERA NORTE

RESUMEN EJECUTIVO

Por requerimientos del Ministerio de Obras Públicas (MOP) del Gobierno de Chile, la Empresa Concesionaria Costanera Norte solicitó al Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales, IDIEM de la Universidad de Chile, la evaluación del funcionamiento del sistema operativo de ventilación y extracción de gases y humos en caso de incendios en el túnel urbano Costanera Norte, previo a su puesta en marcha.

Para este efecto se realizaron pruebas de humos calientes en el tubo norte del túnel, las cuales fueron diseñadas sobre la base de la experiencia y estudios establecidos en la reglamentación europea (World Road Association - PIARC).

Las pruebas consistieron en la generación de dos incendios controlados que resultaron de una potencia de 2,1 MW y 6,7 MW, para lo cual se utilizaron bandejas metálicas rectangulares y combustible ISOPAR C.

Se analizó el comportamiento de parámetros tales como: velocidad de evacuación por extracción forzada de humos, hermeticidad frente al humo de las puertas entre tubos y vías de evacuación, propagación del frente de humos aguas arriba del incendio ("backlayering"), y estratificación de humos.

Para evitar daños al hormigón, equipos y canalizaciones eléctrica, durante el desarrollo de los incendios, la zona del foco se protegió contra el fuego tanto el cielo como los muros en una longitud de 40 metros.

Se instrumentalizó una extensión de 480 m del tubo comprometido, con cámaras de televisión, anemómetros, termopares y termoresistores (PT100). Los datos generados por dichos sensores fueron registrados y monitoreados en tiempo real, a lo largo de la prueba.

El humo generado pudo ser evacuado sin problemas por los sistemas de ventilación y extracción del túnel, superando la velocidad crítica y controlando el efecto inicial de "backlayering". Los caudales y velocidades obtenidas concordaron con los parámetros de diseño de los equipos.

No logró mantenerse la estratificación del humo en el sector amagado por el incendio, debido a la gran distancia que recorrió el humo hasta su salida y la baja velocidad que impuso el plan de ventilación implementado para la prueba.

Se produjo infiltración de humo hacia el tubo adyacente, por falta de hermeticidad de los portones vehiculares de emergencia, perdiéndose la visibilidad en un tramo importante del tubo sur. Además, se produjo infiltración de humo por la puerta de acceso a la salida peatonal de emergencia.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se entregan en este informe directrices generales para optimizar el plan general de emergencia del Túnel Costanera Norte para el evento de incendio.

DESCRIPCIÓN DEL TÚNEL

El túnel forma parte de la carretera urbana Autopista Costanera Norte que cruza SANTIAGO DE CHILE de ORIENTE a PONIENTE. Tiene una extensión de 4000 m aproximadamente. Algunos tramos están construidos por debajo del río Mapocho y otros tramos por el costado del río (TRINCHERA CUBIERTA).

El túnel está compuesto por dos tubos independientes, separados por un muro de hormigón, el cual está provisto por pasadas peatonales y vehiculares cada 100 metros, en forma alternada.

El Tubo Norte canaliza el flujo vehicular de Oriente a Poniente y el Tubo Sur lo canaliza de Poniente a Oriente (Tubo Sur), lográndose un flujo vehicular unidireccional de tres pistas en cada tubo independiente. El túnel tiene una ligera pendiente.

Las longitudes de los tramos por tubo son las siguientes:

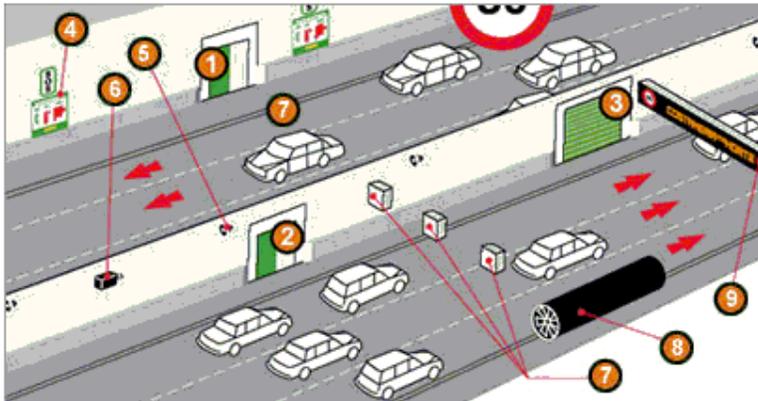
Tramo Lo Saldes - Bellavista, Tubo Norte: 1.760 m

Tramo Lo Saldes - Bellavista, Tubo Sur: 1.272 m

Tramo Bellavista - Vivaceta, Tubo Norte: 4.043 m

Tramo Bellavista - Vivaceta, Tubo Sur: 3.823 m

*El sistema de ventilación es longitudinal con JET-FANS - 90 kW - (en algunos tramos en la pared y en otros en el techo) más estaciones de extracción que están ubicadas a una distancia máxima de 600 m. Las estaciones de extracción están conformadas por dos extractores ventiladores axiales de 430 kW cada uno. **TODOS son REVERSIBLES. La lógica operacional incluye la presurización del tubo contrario al incendio en el tramos del incendio para evitar la propagación del humo hacia el tubo vecino.***



- | | |
|---|--|
| 1 Salidas Peatonales de Emergencia a la Superficie. | 6 Cámaras de TV (cada 150 mts.) |
| 2 Pasadas Peatonales de Emergencia (Cada 200 mts.) | 7 Cartel de información Variable (Señal Aspa-Flecha) |
| 3 Pasadas Vehiculares de Emergencia (Cada 200 mts.) | 8 Ventiladores (cada 250 mts. aprox.) |
| 4 Estación de Emergencia (cada 50 mts.) | 9 Cartel de Información Variable (panel 1x16) |
| 5 Altavoces (cada 20 mts.) | SOS Estaciones de Emergencia (cada 50 mts.) |

El túnel está equipado con variados instrumentos y sistemas de seguridad tales como:

- Sensor lineal de temperatura. (detector de incendios)
- Cámaras de TV
- Estaciones S.O.S. (extintores y teléfonos)
- Carteles de información variable.
- Altavoces.
- Pasadas Peatonales de Emergencia
- Pasadas Vehiculares de Emergencia
- Salidas peatonales de Emergencia
- Sensores de CO
- Opacímetros
- Anemómetros.
- **Moderna sala de control y monitoreo.**

A continuación se muestran una serie de fotografías que describen el equipamiento del túnel. (En Presentación)

A grandes rasgos, las pruebas que se realizaron fueron POOL FIRES (Bandejas rectangulares) con combustible. La superficie de la bandeja metálica determina la potencia del incendio y la cantidad de combustible determina la duración de éste. Se utilizaron las bandejas metálicas que se usan en los ensayos de extintores para la determinación del potencial de extinción. Se realizaron dos pruebas, a 2,1 MW y a 6,7 MW, además de la prueba de vacío para asegurar el correcto funcionamiento del sistema de ventilación antes de realizar la prueba final de 6,7 MW.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Velocidad de evacuación y extracción de humos.
- Hermeticidad entre los tubos y vías de evacuación en lo que respecta al desplazamiento del humo.
- Propagación del frente de humos aguas arriba del incendio, es decir, en el sentido contrario al flujo vehicular, Back Layering.
- Estratificación de humos.
- La evaluación de la lógica operacional del sistema de ventilación en caso de incendio.

PREPARACIÓN

EMPLAZAMIENTO DE LA PRUEBA

Tomando en consideración los objetivos planteados, se seleccionó uno de los **puntos más desfavorables** del túnel como zona de ensayo, tomando en cuenta para este efecto algunos factores de incidencia.

El tramo elegido para la prueba fue Bellavista - Vivaceta, ya que éste es **un tramo cerrado (sin ventanas de techo** como el tramo Lo Saldes - Bellavista), y cuenta con estaciones de extracción conformadas por dos ventiladores de alta potencia que le agregan complejidad al sistema y deben ser evaluadas. Del tramo seleccionado se eligió el Tubo Norte, debido a que por este tubo el tráfico circula en sentido oriente - poniente, en contra de la **pendiente positiva** del túnel. Y como la filosofía operacional de la ventilación normal y de emergencia es impulsar el aire y el humo en sentido del tráfico, la difusión natural del humo se opone a la ventilación forzada del sistema, debido al efecto chimenea que se produce con la pendiente del túnel. En el Tubo Sur la difusión natural del humo (efecto chimenea) ocurre en el mismo sentido que la ventilación forzada (sentido del tráfico vehicular).

El sitio seleccionado correspondió al kilómetro 14.950 aproximadamente, el cual está a **350 m** de la estación de extracción Baquedano, cuya ventana de captación de gases está en la zona interior de una curva, en la parte superior del muro norte.

Para cumplir con los objetivos planteados en el tubo elegido para la prueba, se protegió la estructura y el equipamiento del túnel. Posteriormente se instaló un sistema de adquisición de la información proveniente de los diversos sensores que permitió un registro continuo de medición de temperaturas y velocidad del aire. Además, se evaluó la hermeticidad y visibilidad por medio de cámaras filmadoras (cámaras permanentes del túnel más cámaras adicionales instaladas en forma exclusiva para la prueba).

Cabe hacer presente que no se utilizaron los sistemas de monitoreo de registro permanente de temperatura, velocidad del aire, concentraciones de monóxido de carbono y opacidad con que cuenta el túnel Costanera Norte, por no estar operativos a la fecha de ejecución de la prueba.

PROTECCIÓN:

Para la realización de la prueba, a solicitud del mandante, se protegió la zona para el incendio de prueba con materiales resistentes al fuego en una longitud de unos 30 metros aproximadamente (losa de hormigón y canalizaciones

eléctricas). Las canalizaciones eléctricas se envolvieron con manta cerámica de 50 mm de espesor y se encajonaron con doble plancha de fibrosilicato de 6 mm de espesor cada una. Para proteger las paredes y la losa de hormigón del túnel se colocaron planchas de fibrosilicato de 6 mm de espesor. Para la colocación de las planchas de fibrosilicato se utilizó una estructura de perfiles metálicos. Además, bajo las bandejas metálicas, se protegió el hormigón con lana mineral.

INSTRUMENTALIZACIÓN

La zona instrumentada cubrió una distancia de **435 m aguas abajo y 42 m aguas arriba con respecto al foco del incendio.**

Todos los sensores utilizados fueron instalados en trípodes para parlantes, con una extensión tubular de aluminio, los cuales no interfieren el flujo del aire y humo ni afectan la calidad de los datos adquiridos.

Cabe mencionar la gran cantidad de cable utilizado, convirtiéndose en uno de los mayores gastos o costos de la prueba.

SEGURIDAD

En el desarrollo de estas experiencias, los aspectos de seguridad de la prueba tienen mayor importancia que la preparación técnica de la misma. Las posibilidades de accidentes y el nivel de riesgo debían minimizarse. Por lo tanto, se establecieron medidas de seguridad considerando aspectos tales como: los equipos de seguridad del personal encargado de la ejecución de la prueba, la manipulación del combustible, los equipos de extinción, los equipos de comunicación, la evacuación del túnel, el encendido del fuego, etc. Además, se contó con la participación de Ambulancias, Bomberos y Carabineros para casos de emergencia.

Todo el personal del interior del túnel disponía de máscaras anti-gas y humo, y el personal cercano al foco del incendio disponía de completos trajes reflectantes resistentes a grandes flujos de calor. Todo el personal del interior del túnel disponía de equipos de radio. A su vez, la comunicación con la Sala de Control se realizó vía teléfono celular. En el área cercana al incendio se ubicaron extintores para hacer frente a posibles emergencias. Antes de realizar la prueba se realizó la evacuación total del túnel, manteniéndose al interior del túnel sólo el personal indispensable para la correcta ejecución de la prueba.

El combustible utilizado fue un solvente isoparafínico llamado Isopar C, el cual es un destilado del petróleo con igual poder calorífico que la bencina, pero con menor nivel de riesgo. Además, este combustible genera bajos niveles de material particulado. El vaciado del combustible se realizó manualmente, cubriendo la bandeja metálica con planchas de madera para disminuir la generación de gases inflamables y evitar la producción de chispas. El encendido se realizó a distancia, mediante un sistema de generación de una chispa eléctrica. Ambulancias y bomberos se ubicaron en el exterior del túnel, atentos a los posibles requerimientos que se canalizarían por una sola vía de comunicación, a cargo del Jefe de la Prueba.

Prueba de 2,1 MW

La prueba de 2 MW consistió en la combustión de 50 litros de Isopar C, vertidos en una bandeja metálica de 0,67 m de ancho por 0,67 m de largo, la cual fue colocada sobre otra bandeja metálica de 1,5 m de ancho por 1,5 m de largo.

Esta prueba consideró inicialmente la condición de ventilación normal al interior del túnel producto del efecto pistón que produce el flujo vehicular. Esta condición fue generada con el funcionamiento de un ventilador instalado aguas arriba del incendio, correspondiente al ventilador 40-FAN-2002. Con esto se logró una velocidad inicial de 1 m/s.

El humo fue evacuado completamente y se mantuvo estratificado durante todo el incendio, alcanzando una altura mínima aproximada de 1,5 m desde el suelo.

El caudal total que se extrajo durante el régimen permanente fue del orden de 220 m³/s, de los cuales el 84% lo aportó el flujo de humo y aire proveniente del incendio, y el restante 16% lo aportó el flujo de aire fresco proveniente del poniente de la zona de extracción. No se alcanzó el valor máximo de diseño de 250 m³/s, debido a que no se operó con el 100% de la extracción por defectos técnicos de los equipos que posteriormente fueron corregidos.

Esta prueba sirvió para la puesta a punto de los equipos para la prueba final, ya que se detectaron que algunos dispositivos no funcionaron correctamente, dampers, ventiladores, energía.

Prueba de 6,7 MW

La prueba de 5 MW consistió en la combustión de **200 litros de Isopar C**, vertidos en una bandeja metálica de **1,5 m de ancho por 1,5 m** de largo (2,25 m²), la cual fue colocada sobre otra bandeja metálica de 2,25 m de ancho por 2,25 m de largo (5,1 m²). Esta prueba, al igual que la de 2 MW, consideró inicialmente la condición de **ventilación normal al interior del túnel** producto del efecto pistón que produce el flujo vehicular. Esta condición fue generada con el funcionamiento de un ventilador instalado aguas arriba del incendio, correspondiente al ventilador 40-FAN-2002. Con esto se logró una **velocidad inicial de 1,6 m/s**.

La **estratificación del humo se perdió con relativa prontitud** en toda la longitud entre el foco del incendio y la zona de extracción. Este fenómeno se debió principalmente a la **baja velocidad lograda en la evacuación del humo** y las dimensiones de la sección transversal del Tubo (además de la distancia recorrida del humo que era bastante grande). Cabe mencionar que una mayor velocidad de evacuación del humo se hubiese logrado con el funcionamiento directo del ventilador 40-FAN-3101. Los ventiladores más cercanos a una zona tienen la mayor influencia sobre la velocidad del aire en dicha zona. El ventilador 40-FAN-3103, que estaba ubicado a 55 metros aguas arriba del incendio, no se puso en funcionamiento durante el desarrollo de la prueba para no producir turbulencias en el foco del incendio, lo cual es correcto.

Aproximadamente a los **125 segundos de iniciado el incendio se produjo traspaso de humo hacia el Tubo Sur**, a través de la puerta de acceso vehicular del kilómetro 14.910, 40 metros aguas arriba del incendio. En esta etapa inicial el humo se desplazó aguas arriba del incendio a una velocidad promedio de 0,3 m/s. Posteriormente, el Tubo Sur se llenó de humo en toda su sección una longitud de 350 m aproximadamente.

A los 270 segundos, **a 4 minutos y 30 segundos del inicio, el humo ubicado aguas arriba del incendio alcanzó 70 metros desde el foco del incendio**, la mayor distancia que alcanzaría durante la prueba. Con posterioridad a este evento, el humo ubicado aguas arriba se empezó a acercar hacia el foco del incendio, estabilizándose a 35 metros aguas arriba del foco. El fenómeno de inversión del humo aguas arriba del incendio fue controlado con la puesta en funcionamiento directo del ventilador 40-FAN-2006. Cabe mencionar que para evitar el avance del humo aguas arriba del incendio, aún se contaba con los ventiladores 40-FAN-3101 y 40-FAN-3103.

El caudal de aire y humo que salía por la extracción se mantuvo relativamente estable durante el desarrollo de la prueba. El caudal total fue de **250 m/s** aproximadamente, el cual estaba compuesto por 125 m³/s de humo desde el incendio y 125 m³/s de aire desde aguas abajo de la zona de extracción.

La **salida peatonal de emergencia** de Plaza Baquedano (Tubo Norte), que está ubicada a pocos metros de la zona de extracción **fue afectada por la infiltración de humo**, debido al efecto natural de tiraje a través del perímetro de las puertas de acceso a dicha vía.

Las temperaturas alcanzadas por las diversas zonas medidas fueron menores a las esperadas. La temperatura más alta la registró el sensor ubicado en el centro del Tubo, a 10 m aguas abajo del foco del incendio y a 1 m del cielo, la cual alcanzó un máximo de 115°C.

A 157 m aguas abajo del incendio se registró una temperatura máxima de 67°C a 1 m del cielo. En esa misma sección, a 2,7 m del suelo se registró un máximo de 57 °C y a 1,9 m del suelo un máximo de 35 °C. Esto muestra la estratificación del humo y la temperatura. Sin embargo, el humo inundó toda la sección debido a la acumulación excesiva de humo.

El hormigón del suelo del túnel, ubicado inmediatamente aguas abajo de la bandeja que contenía el combustible, sufrió **desconchamiento** por el efecto de la temperatura del incendio y la **desprotección de dicha zona**.

OBSERVACIONES

En una inspección posterior a la prueba se detectaron algunas falencias relativas a la efectividad de las salidas de emergencia. En particular se pudo apreciar que el accionamiento de las puertas requiere de un gran esfuerzo para lograr levantarlas.

Se observó también que dado el emplazamiento de estas puertas de salida en zonas de estacionamiento de vehículos, existe el riesgo de un bloqueo eventual de estas salidas, de no prever barreras adecuadas.

Debe corregirse la hermeticidad de puertas entre tubos o realizar un manejo efectivo de la sobrepresión en el tubo no afectado en caso de incendio, para asegurar que no ingrese humo al tubo adyacente.

Debe asegurarse la no entrada de humo en las vías de escape.

Es de vital importancia que el sistema de ventilación no sufra cortes de energía por efecto de la temperatura generada en un incendio. Esta situación no fue evaluada en estas pruebas y debe ser evaluada.

A la luz de los resultados, es necesario **realizar un estudio detallado para ajustar o reestructurar los planes de ventilación en caso de incendio**, dependiendo de la ubicación precisa del incendio y la intensidad de éste. Los planes de incendio deben funcionar en forma automática, minimizando al máximo la participación humana. Los planes de incendio actualmente implementados sólo se basan en la ubicación por zonas del posible incendio.

Se emitió un completo informe de las pruebas, con conclusiones y observaciones para considerar en la explotación del túnel, sobre las cuales debían tomarse medidas correctivas.

EXPERIENCIA IDIEM.

La primera experiencia IDIEM fueron los ensayos en el túnel Costanera Norte. Posteriormente se realizaron en 2008 ensayos en el túnel San Cristóbal, donde se incluyó el uso de una cámara termográfica.

Durante el 2009 se han desarrollado dos proyectos de diseño de sistemas de ventilación para dos túneles de la Concesionaria Costanera Norte, en los cuales se ha empleado un software de simulación (CFD):

- Proyecto Conexión ruta 5 Sur: Túnel de 500 m, aprox.
- Proyecto Túnel Bajo Av. Kennedy: Túnel de 1700 m aprox.

DOCUMENTACIÓN

Hay una serie de documentos que deben ser consultados para alguien que se especialice en estos tópicos:

- 1.- PIARC, Fire and Smoke Control in Road Tunnel. 335 páginas en francés e inglés. Es un documento que representa en estado del arte hasta esa fecha 1999 sobre incendios en túneles.
- 2.- The latest PIARC road tunnel fire and smoke control publications. Artículo de 14 páginas donde se indica la información que traen las últimas publicaciones PIARC.
- 3.- Systems and Equipment for Fire and Smoke control in road tunnel - PIARC, 2007. 345 páginas publicadas por PIARC. Este documento viene a complementar el documento de PIARC de 1999. Entrega las lecciones aprendidas sobre los últimos incendios ocurridos.
- 4.- NFPA 502 Estándar for Road tunnels, bridges, and other limited Access highways. Normativa de USA sobre túneles de 37 páginas, su ventilación y su protección contra incendios. Está la versión de 1998 y de 2008.
- 5.- FIT Fire Safe Design INTRO. Documento de 49 páginas de FIT, una asociación europea que trata el tema específico de Fire In Tunnels. Es la introducción de una compilación de guías, regulaciones, normas y buenas prácticas en Europa, Japón y USA, sobre varios aspectos de seguridad en túneles.
- 6.- FIT Fire Safe Design ROAD TUNNELS. 103 páginas donde se materializa lo explicado en FIT Fire Safe Design INTRO. Excelente!.
- 7.- FIT Design Fire Scenarios. Documento de 161 páginas, de FIT, una asociación europea que trata el tema específico de Fire In Tunnels. Recoge todo lo que se comenta en Europa sobre el tema. Muy weno, importante a la hora de simular, responde la pregunta qué simular?
- 8.- FIT Fire Safe Design Road Tunnels – Documentación del mundo 2002. 43 páginas de consulta para encontrar documentos fuentes, Leyes, normas de cada país, etc...
- 9.- Directiva Europea sobre mínimos requerimientos de seguridad en túneles, 2004. 53 páginas en inglés y español, documento legislativo. Algunas cosas importantes.
- 10.- Les dossiers pilotes du Cetu: Una serie de documentos en francés. El que importa es el capítulo de Ventilación del 2003, en el que se muestra en forma muy completa la visión de Francia al respecto. Se indican fórmulas para el diseño, alternativas de sistemas de ventilación.
- 11.- Calculs emissions polluants 2002. 25 páginas en francés, indispensable para el cálculo de la ventilación en fase de explotación.
- 12.- PIARC, Demanda de ventilación por emisiones. Documento del 2004, con 73 páginas en las cuales se indica como calcular la ventilación en fase de explotación en un túnel.
- 13.- Circular del Cetu en inglés, “Technical Instruction relating to safety measures in new road tunnels (design and operation)” 49 páginas sobre temas generales de túneles, con mayor énfasis en temas de seguridad.
- 14.- Modelamiento numérico sobre el comportamiento del humo en túneles, revisión de la literatura. 66 páginas del 2003.
- 15.- Design Fire Curves in Tunnels. PAPER de 7 páginas donde se muestra como modelar un incendio en un túnel, como evoluciona con el tiempo. Además, es actual, 2008.
- 16.- State of the road tunnel safety technology in Japan, 2002. PAPER sobre lo que pasa en Japón. Hasta el 2002. Cultura general de túneles.
- 17.- An Overview of the International Road Tunnel Fire Detection.