

El camino desde el túnel seguro hasta el túnel excelente. Evolución de la normativa de seguridad en túneles¹

Juan Ramón López Laborda
Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
IDOM Ingeniería y Consultoría, SAU

Javier Borja López
Ingeniero Industrial
IDOM Ingeniería y Consultoría, SAU

Una de las principales consecuencias de los trágicos accidentes de finales de los años 90 fue la mayor atención de las políticas públicas en el problema de la seguridad en los túneles, lo que condujo a la puesta en marcha de nuevas acciones tanto a nivel europeo como mundial. Entre estas acciones cabe destacar la creación de grupos de trabajo, el desarrollo de proyectos de investigación y el desarrollo de nuevas normas y recomendaciones.

La interpretación que se hizo en un primer momento de estas nuevas normas y recomendaciones condujo a que los proyectistas, influenciados por las graves tragedias mencionadas, se centrasen sobre todo en el equipamiento de seguridad de los túneles, pasando por alto otros aspectos de notable importancia. Esto dio lugar en algunos casos a grandes inversiones y túneles sobre equipados, lo que no necesariamente implicaba túneles más seguros.

Durante estos últimos quince años la experiencia adquirida ha llevado a todos los agentes relacionados con la seguridad, a reconsiderar algunos de los planteamientos inicialmente realizados, resaltando la importancia de aspectos como los económicos, la explotación del túnel o el comportamiento de los usuarios. Adicionalmente, el desarrollo metodológico y de determinadas aplicaciones informáticas, ha permitido la aplicación de los análisis de riesgos en el ámbito de la seguridad en túneles; los análisis de riesgo son una herramienta de apoyo al proyectista que permiten adaptar las medidas de seguridad a las condiciones particulares de cada túnel.

Por otro lado, el desarrollo tecnológico de estos últimos años permite dotar a los túneles de unas instalaciones de seguridad cada vez más eficientes y fiables (iluminación basada en lámparas LED, detección por infrarrojos, sistemas automáticos de control y vigilancia, etc.).

Este artículo presenta, de forma general, esta evolución en las normas y criterios de diseño ligados a la seguridad en los túneles, describiendo con mayor detalle aquellas nuevas herramientas, medidas y equipos que permiten convertir un túnel seguro en un túnel excelente.

Situación de partida: evolución hacia el túnel seguro

En el año 2005, el IV Simposio de Túneles de la Asociación Técnica de la Carretera (ATC) se desarrolló bajo el lema general «¿Por qué son seguros los túneles?» Ninguno de los quinientos especialistas que nos reunimos en ese evento puso en duda la afirmación que la pregunta lleva implícita y las más de cincuenta ponencias que sobre la seguridad en los túneles se presentaron sirvieron para apoyar esa aseveración, convertida en dogma desde entonces. Quizá valga la pena, como ejercicio intelectual, preguntarnos si realmente los túneles son seguros y, en caso afirmativo, desde cuando lo son. Por lo tanto, debemos preguntarnos: ¿desde cuándo son seguros los túneles?, ¿son más seguros por tener más equipamientos?, ¿es suficiente el marco normativo?, ¿qué papel juega el

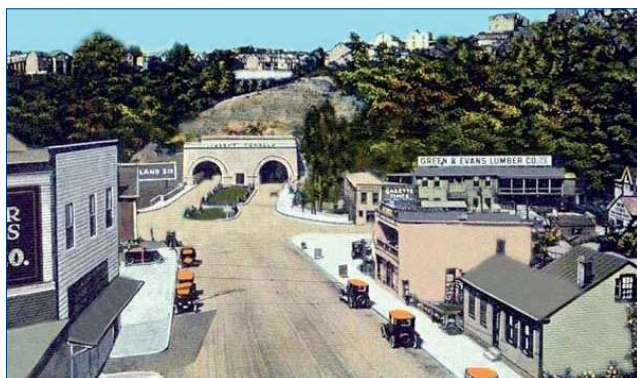
¹ Comunicación presentada al VI Simposio de Túneles de Carreteras, celebrado en Zaragoza del 11 al 13 de marzo de 2015.

usuario? Por último, nuestra obligación es avanzar desde conceptos más “pasivos” o “prescriptivos” ligados a la seguridad hacia la búsqueda de elementos que logren el objetivo de la excelencia de nuestros túneles. Para ello hay que partir de la premisa fundamental que no se puede suponer un comportamiento humano ideal en un túnel bien construido o, expresado de otra manera, cómo lograr que los agentes involucrados en el diseño y gestión, ayudemos a que los usuarios conviertan un túnel seguro en un túnel excelente. Este debe ser el reto para los próximos años.

Se ha dividido esta exposición en tres etapas: evolución hacia el túnel seguro (1920-2004); periodo de incertidumbre (2004-2010) y el camino hacia la excelencia (2010-2016?). Las fechas indicadas no se pueden tomar como valores absolutos, sino como intervalos temporales en los que se producen los principales acontecimientos. Se invita al lector a recorrer este camino hacia el túnel excelente desde sus primeros tiempos.

Los primeros túneles para la circulación de automóviles datan de 1920-30 y durante esa época, en EEUU y en algún país europeo como Francia o Reino Unido, se empieza a estudiar los problemas asociados a su explotación.

El *Liberty Tunnel*, (Pittsburgh, EEUU) se abrió al tráfico en enero de 1924 y en su momento se consideró el túnel para vehículos de motor más largo del mundo, distinción que todavía hoy en día se discute con el *New York's Holland Tunnel*, bajo el río Hudson. En cualquier caso ambos túneles están considerados como los primeros de la “Edad del Motor” en los que se planteó la necesidad de colocar un sistema de ventilación, aunque todavía se conocía poco sobre los efectos nocivos de los gases de combustión.



El túnel está formado por dos tubos de casi 1800 m, separados aproximadamente 20 m entre sí, con dos carriles de circulación para cada sentido. El sistema de ventilación previsto era una variante del método Saccardo pero cálculos posteriores demostraron que el sistema era insuficiente y durante la ejecución de la obra se planteó una modificación: el nuevo diseño incluía una estación de ventilación intermedia con pozos de ventilación para la extracción de humos e impulsión de aire.



Sin embargo, retrasos en el diseño y ejecución del nuevo sistema de ventilación y otras presiones para la apertura del túnel llevaron a que se pusiera en servicio sin que la ventilación estuviera en servicio. Vale la pena recordar, las declaraciones el prestigioso ingeniero Clifford Holland recogidas en el *Pittsburgh Press* del 11 de diciembre de 1923 asegurando que no había razones suficientes para mantener el túnel cerrado y que la ventilación natural era suficiente para mantener los adecuados niveles de seguridad; aseveraciones que en este caso al poco tiempo se demostrarían equivocadas.

«There is no reasons of the world why these tunnels of yours in Pittsburgh should not be opened for traffic at once»
«the natural ventilation in tunnels such as is safe and asserts that similar tunnels in England have been used for 25 years without artificial ventilation!»

Finalmente el túnel se abrió a principios de 1924 sin haber puesto en funcionamiento la ventilación.

Aunque el túnel conectaba con una zona por desarrollar y por lo tanto en condiciones normales el tráfico era bajo, el 10 de mayo de ese mismo año una huelga del transporte público aumentó el volumen de tráfico provocando un fuerte atasco en el interior del túnel sin que los conductores apagaran sus motores, lo que convirtió rápidamente el aire en irrespirable causando el pánico, la intoxicación e incluso el desmayo de los conductores atascados en el túnel y también de los policías que acudieron a atender la emergencia [1].





Figura 4. Crisis del monóxido (10 de mayo de 1924)

Los efectos del monóxido de carbono al combinarse con la hemoglobina eran ya entonces bien conocidos, ya que esa combinación desplaza al oxígeno pudiéndose producir la muerte por asfixia. Como consecuencia de ello, en función de la concentración y del tiempo de exposición se producen sus conocidos efectos: dolor de cabeza, náuseas, inconsciencia y hasta la muerte con concentraciones superiores a 6400 ppm y 10-15 minutos de exposición. En el incidente de Pittsburgh se midieron concentraciones de carboxihemoglobina, suficientes para causar náuseas, vómitos, cefaleas y dolores torácicos.

Son varias las lecciones aprendidas de este incidente y no es fácil encontrar a un responsable: ¿el ingeniero que diseñó un sistema de ventilación que fue necesario modificar en obra?, ¿el constructor que no cumplió con los plazos comprometidos?, ¿aquellos que forzaron la apertura de un túnel inacabado?, ¿los técnicos que apoyaron esa idea?, ¿los usuarios que no apagaron sus motores?, ¿la coordinación de los servicios de emergencia?, ¿el escaso conocimiento sobre la contaminación producida por los humos de los vehículos?...

En cualquier caso, la principal lección aprendida es que en el concepto seguridad se incluyen muchas variables, no todas ellas previsible ni fácilmente cuantificables, y por lo tanto las medidas que se adopten para reforzarla cambiarán de una época a otra y en la misma época de un lugar a otro.



Figura 5. Holland Tunnel en Nueva York (1927)

Al poco tiempo del incidente descrito se puso en funcionamiento el *Holland Tunnel* en Nueva York (1927) con un sistema de ventilación transversal.

Los estudios más detallados sobre la ventilación y los efectos del monóxido de carbono se realizan en EEUU a partir de la primera guerra mundial, muchos de ellos en cooperación con el *Bureau of Mines*; también en Francia y otros países europeos. Sin embargo el conocimiento sobre la contaminación de los humos emitidos por los vehículos era mucho menor; hecho que se complica según se produce la evolución de los motores de gasolina y la producción en serie de los primeros vehículos diésel.

La aparición de organismos como la IRF (1948) o la creación del Comité de Túneles de Carretera (1957) de la PIARC, actualmente presidido por el español Ignacio del Rey, supusieron importantes hitos en el desarrollo de la seguridad. Las inquietudes iniciales de este Comité son fijar los umbrales de CO, estudiar su contenido en los gases de los humos de los vehículos y definir, en consecuencia, el caudal necesario para su dilución. El aumento de la velocidad, la implantación de los vehículos diésel y el desarrollo de la reglamentación medioambiental obligarán a la disminución en la emisión permitida a los vehículos. En su primer informe (Congreso de Río de 1959) el Comité de Túneles se pregunta: ¿a partir de que longitud y tráfico un túnel debe tener ventilación artificial?, ¿es más eficaz a partir de una determinada longitud transportar los vehículos por otros medios? Actualmente podemos responder a la primera pregunta indicando que de acuerdo con la normativa europea en túneles interurbanos la ventilación es obligatoria para aquellos de longitud mayor de 1000 m y en la española para los de 500 m. Quizá las denominadas autopistas ferroviarias o ferroustage sean la respuesta que esperaban los especialistas hace más de medio siglo cuando se planteaban transportar los vehículos por otros medios.

Mientras tanto en España, aunque no se participe en el Comité de Túneles hasta 1975, representados por F. Pérez Loza, el Túnel de Guadarrama (1963) demuestra que se conoce en profundidad el estado del arte de la seguridad. Guadarrama fue el primero túnel español en el que se estudiaron con profundidad los problemas de ventilación e iluminación. El sistema de ventilación diseñado fue el semitransversal aunque con posibilidad de cambio a transversal sin interrupción del tráfico. Así mismo, se dotó al túnel de un sistema de iluminación a base de fluorescentes con refuerzo en bocas, ajustándose a las normas IES (*Illumination Engineering Society*), siendo la primera vez en Europa que un gran túnel se ajustaba a ellas [2]. Se instalaron además un pulsador de alarma cada 60 m y cada 120 m un extintor y un teléfono conectados con un Centro de Control. En 1972 se puso en servicio el segundo túnel. El 14 de agosto de 1975 se incendió en este segundo tubo un camión que transportaba resina de pino. Los daños

que sufrió el túnel obligaron a su cierre durante casi un mes. Se dañaron medio millar de luminarias, cámaras de televisión y postes SOS junto con unos ciento cincuenta metros de falso techo. La existencia del túnel I permitió que se desviara el tráfico durante el periodo de cierre del tubo dañado; no hubo ningún daño a las personas. En 2007 se puso en servicio un tercer tubo.

Se considera que el primer incendio grave en un túnel fue en el ya citado *Holland Tunnel* en el año 1949; las importantes consecuencias en pérdidas económicas de los primeros accidentes con fuego llevan a que en las décadas siguientes se realicen los primeros ensayos con fuego. Se quiere además conocer las prestaciones reales de los diferentes sistemas de ventilación artificial: transversal, semitransversal y longitudinal, todos ellos con sus diferentes variantes.

En 1965, se realizan una serie de ensayos [3] en el túnel ferroviario fuera de uso de Ofenegg (Suiza), en los que además de su mérito de pioneros, se muestran los problemas de la pérdida de estratificación al utilizar la ventilación longitudinal; además se realizaron pruebas de extinción con *sprinklers* que muestran que bajo determinadas circunstancias el uso de los mismos podía ser contraproducente. Ambos debates siguen abiertos cincuenta años después.

Una década después (1975), se desarrollan en Austria otras pruebas de cuyas conclusiones hay que resaltar las recomendaciones sobre la importancia crítica de la detección precoz del incendio.

A principios de los años ochenta se realizan en Japón nuevos ensayos y en los noventa nueve países europeos asociados en el marco del proyecto EUREKA finalizan el proyecto FIRETUN. Se realizaron 21 ensayos, utilizando vehículos de metro, tren, coches y otros vehículos pesados con diferentes tipos de combustible para conseguir diferentes potencias de incendio. Se obtuvieron significativas conclusiones sobre la influencia del material de los vehículos, temperaturas alcanzadas en el incendio o desarrollo del incendio, lo que abrió un debate sobre la curva que mejor representaba ese comportamiento.

En la misma época, se realizan los ensayos del *Memorial Tunnel* que junto con los mencionados de FIRETUN significan un punto de inflexión en el conocimiento del comportamiento de un incendio en el interior de un túnel.

Alguno de estos debates sobre la potencia de cálculo y la curva de fuego siguen hoy en día sin que exista una solución única, tanto en el ámbito de los túneles carreteros como en los de metro o ferrocarril. Por ejemplo, aunque en España la normativa refleja una potencia calorífica de 30 MW, en los últimos años se extendió el uso de 100 MW y en casos extremos 200 MW, valor que sólo debería considerarse en situaciones muy singulares y estudiando cuidadosamente las repercusiones técnicas y económicas que está elección conlleva. Respecto la evolución en el tiempo de la potencia de incendio o calor liberado, tampoco existe



Figura 6. Túnel de Guadarrama [Fuente: ABERTIS]

una opción única aunque la metodología de análisis de riesgos del Ministerio de Fomento recoge unos escenarios de incendio con diferentes tipos de curva.

Recientemente, en nuestros trabajos en el campo de los metros, hemos “sufrido” esta misma falta de acuerdo, agravado por el diferente comportamiento del material móvil de los fabricantes, no tanto en el pico que se alcanza sino en el tiempo que se tarda en llegar a ese máximo. Las implicaciones económicas y las estrategias de actuación son muy diferentes ya que afecta tanto al volumen de humos generados como al tiempo disponible para la evacuación segura de los usuarios y la actuación del sistema de ventilación y los servicios de emergencia.

Tras más de 70 años se llega al final de esta situación de partida: evolución hacia el túnel seguro y se alcanza el momento en el que se produjeron los terribles accidentes alpinos que cambiarán nuestras concepciones sobre la seguridad de los túneles.

Hemos repasado algunos de los puntos en los que los expertos se detuvieron pero ¿qué pasó durante este tiempo con los usuarios de los túneles? La mayor parte de los túneles, especialmente los interurbanos, estaban escasamente equipados, quizá con una iluminación básica. Los conductores analizaban las condiciones del nuevo entorno



Figura 7. Túnel de Guadarrama

en el que circulaban, más hostil que al aire libre, percibían el mayor riesgo al que se enfrentaban y adaptaban su circulación disminuyendo su velocidad, aumentando la concentración o la distancia entre vehículos.

Según las características y el nivel de conservación de la carretera al aire libre, la adaptación a la circulación en el túnel era más o menos difícil. En un principio, la menor calidad de las carreteras al aire libre implicaba que el conductor fuera menos autómatas en su circulación y por lo tanto su concentración fuera mayor y la adaptación al medio más hostil del túnel fuera más sencillo. Parece contradictorio, pero es evidente que la situación global era más segura que posteriormente en el que las carreteras mejoran sus características geométricas pero se conduce de forma más automática y se hace más complejo el cambio de comportamiento dentro del túnel.

En unos túneles escasamente equipados, inicialmente era el usuario el que de forma casi inconsciente está aportando un plus de seguridad y eso a pesar de que los expertos casi no se ocupaban de ellos. Su comportamiento respondía a lo que en los modelos de comportamiento se denomina comportamiento basado en el conocimiento [3] frente al basado en las competencias o en las reglas establecidas.

Como consecuencia de los trágicos accidentes alpinos, se produce en el periodo 1999-2004 un fuerte impulso a los temas relacionados con la seguridad, como por ejemplo el Informe del Comité de Túneles de PIARC *"Fire and Smoke Control in Road Tunnels"* (1999) o los ensayos desarrollados en los túneles de Benelux (año 2000, Holanda), Somport (año 2002, España) o Runehammar (año 2003, Noruega).

En el año 2001, el Comité de expertos de la UNECE [4] propuso una serie de 43 medidas sobre seguridad en túneles relacionadas con cuatro vértices: infraestructuras, explotación, vehículos y usuarios. En opinión de los autores de este artículo, hasta esa fecha este tetrápodo estaba en un desequilibrio evidente al que se había llegado por la necesaria inversión en equipamientos básicos de

seguridad, relegando a un segundo plano el papel de los usuarios y especialmente la percepción que éstos tienen sobre el túnel por el que circulan.

Periodo de incertidumbre y reflexiones

El citado informe UNECE, junto con determinadas normas nacionales como la Circular Interministerial francesa nº 2000-63, de 25 de agosto de 2000 [5], o la Instrucción española IOS-98, de noviembre de 1998 [6], fueron la antesala para la publicación en abril del año 2004, de la Directiva Europea 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la Red Transeuropea de Carreteras [7].

La preocupación por el aumento de la frecuencia de los accidentes en túneles de carretera, la obsolescencia de determinados túneles europeos, el incremento del nivel de tráfico y el hecho de que los túneles de carretera fueran infraestructuras estratégicas condujo a las instituciones europeas a tomar medidas para mejorar las condiciones de seguridad en estas infraestructuras.

Hasta ese momento, en los distintos estados europeos había túneles que se habían construido siguiendo unos criterios que en muchos casos habían quedado anticuados y, en general, había pocos mecanismos legales para forzar a los gestores de los túneles a mejorar el nivel de seguridad de los mismos una vez que éstos entraban en servicio, por lo que en aquel momento, esta Directiva supuso una auténtica revolución.

Esta Directiva estableció un conjunto de requisitos de tipo organizativo, técnico y operativo, para todos los túneles de longitud superior a 500 metros incluidos dentro de la Red Transeuropea de Carreteras: por un lado, esta norma propuso armonizar la estructura organizativa de cada túnel, definiendo una serie de figuras (Autoridad Administrativa, Organismo de Inspección, Gestor del Túnel, Responsable de Seguridad) y precisando el papel y las responsabilidades de cada una de ellas; de igual manera, esta norma estableció el procedimiento para autorizar la apertura del túnel

al tráfico, destacando la importancia de reunir y actualizar toda la documentación de seguridad (Manual de Explotación) y destacando la importancia de realizar inspecciones y simulacros periódicos, así como de registrar los incidentes más relevantes; por otro lado, esta norma estableció una serie de requisitos mínimos de infraestructura con los que el túnel debería contar, en función de su longitud, nivel de tráfico y carácter unidireccional o bidireccional, relacionados tanto con la obra civil como con los equipamientos de seguridad; de igual manera, la Directiva estableció una serie de medidas relacionadas con el funcionamiento del túnel (necesidad de preparar un plan de emergencia, condiciones para el tránsito de vehículos de mercancías peligrosas, determinadas normas de circulación, etc); por último, esta norma menciona, aunque muy brevemente, la necesidad de organizar periódicamente campañas de información sobre la seguridad en los túneles dirigidas a los usuarios de los mismos.

De cualquier manera, los requerimientos que la Directiva introducía no se podían cumplir de manera inmediata, dado que implicaba una transformación profunda de los criterios adoptados hasta esa fecha. La propia Directiva estableció unos plazos para llevar a cabo de forma progresiva las actuaciones necesarias para dar cumplimiento a la misma.

Así, se fijó un plazo de dos años (abril de 2006) para incorporar al derecho nacional de cada Estado miembro las disposiciones de la Directiva y para definir la Autoridad Administrativa de cada túnel; se estableció un plazo de tres años (abril de 2007) para valorar el grado de cumplimiento de la Directiva en los túneles en servicio, y establecer el correspondiente calendario de actuaciones; se fijó un plazo de cinco años (abril de 2009) para que cada Estado miembro informara de la metodología de análisis de riesgo empleada; se fijó un plazo de diez años (abril de 2014), que se amplió a quince (abril de 2019) en los Estados con más túneles, para completar las actuaciones necesarias para adecuar los túneles de tal modo que cumplieran con las disposiciones de la Directiva.

La publicación de la Directiva abrió un periodo de incertidumbre y reflexiones, en el que estaba claro que había que actuar para mejorar la seguridad de los túneles y que era necesario actuar sin demora; pero los distintos responsables no tenían claro la mejor forma de proceder. Algunas de las prácticas que la Directiva proponía no eran habituales en el ámbito de los túneles de carretera, y había que llevar a cabo un esfuerzo desde las distintas administraciones y especialistas para desarrollar guías y metodologías de diseño, procedimientos de actuación, etc. Se necesitaba tiempo para desarrollar estos trabajos y adquirir experiencia pero, además, había que encajar al usuario en este nuevo marco de seguridad y se necesitaba mucho dinero no sólo para equipar los túneles sino para mantenerlos.

Sin embargo, este trabajo de normalización discurrió en paralelo al de revisión del estado de los túneles en servicio y al de propuesta de medidas para su adecuación, de tal modo que en un primer momento, evaluadores y proyectistas trabajaron sin pautas homogéneas. Además, la interpretación que se hizo en un primer momento de la nueva reglamentación condujo a que éstos se centrasen sobre todo en las medidas de la infraestructura, pasando por alto otros aspectos de notable importancia. Esto dio lugar en algunos casos a grandes inversiones y túneles sobre equipados, lo que no necesariamente implicaba túneles más seguros.

En España la Directiva, se transpuso mediante el RD 635/2006 con unos criterios más exigentes que la Directiva, sin valorar, en nuestra opinión, adecuadamente el coste que de esa decisión se derivaba, ni el escaso beneficio marginal, en términos de seguridad, que se obtenía. Hubiera sido más prudente cumplir estrictamente los requisitos de la Directiva y posteriormente, en función de sus resultados, elevar esos requisitos. Posteriormente se planteó modificar el Real Decreto, pero criterios ajenos a los técnicos impidieron su cambio.



Figura 8. Boca española del túnel internacional franco

En aplicación de la Directiva, el Ministerio de Fomento puso en marcha el plan para la mejora de la seguridad de los túneles; en el año 2008 se preveía que faltaba adecuar 280 túneles con una inversión de 360 millones de euros. Recientemente una noticia describía que Noruega necesitaba casi 1000 millones de euros.

En los años inmediatamente anteriores y posteriores al de la publicación de la Directiva Europea 2004/54/CE proliferaron los proyectos de investigación relacionados con la seguridad en túneles (SIRTAKI, VIRTUAL FIRES, DARTS, UPTUN, FIT, SAFET, SAFE TUNNEL, EUROTAP, etc.) [8, 9], que de alguna manera trataban de profundizar en el estudio de los distintos elementos involucrados en la seguridad del túnel y llenar el vacío metodológico mencionado.

Por el mismo motivo, durante esos años se constituyeron nuevos comités y grupos de trabajo internacionales, como el ITA-COSUF; de igual manera, otros organismos internacionales existentes, como el mencionado Comité de explotación de Túneles de Carretera de la PIARC, tuvieron durante estos años su etapa más productiva (desde 2004, se han publicado más de 20 informes técnicos relacionados con distintas materias: mantenimiento, explotación, análisis de riesgos, diseño del sistema y de las estrategias de ventilación, el factor humano, etc.). En ese sentido, en el año 2005 se inauguró el Centro de Ensayos de Fuegos y Ventilación en Túneles de San Pedro de Ares (España), una instalación permanente para el ensayo de distintos sistemas de seguridad en túneles.

Como se observa, la Directiva y su transposición propició un esfuerzo notable en investigación de nuevas tecnologías, en especial de todas aquellas que tenían que ver con la protección contra incendios y con el sistema de ventilación, además de implicar un trabajo a nivel administrativo para el desarrollo de normas nacionales, llevar a cabo revisiones de túneles existentes y para adaptar las estructuras organizativas. Sin embargo, el estudio de la influencia del factor humano en la seguridad quedó relegado a un segundo plano. En 2008 se publicó el informe de PIARC *"Human factors and road tunnel safety regarding users"* [10] que fue quizás el primer documento que abordaba este aspecto tan relevante de forma detallada.

El camino hacia la excelencia

Aunque la implantación del Real Decreto fue un proceso lento, poco a poco los objetivos que esta norma marcaba se fueron cumpliendo: el cambio de las estructuras organizativas, la revisión del estado de los túneles existentes, el desarrollo de manuales de explotación, el desarrollo de inspecciones periódicas y simulacros, la recopilación de datos sobre incidentes y accidentes, etc.

En 2008, entraba en vigor la Orden Circular del Ministerio de Fomento sobre inspección de túneles y se licitaban los primeros contratos de Responsables de Seguridad a nivel nacional. Un año más tarde se celebró el primer Foro Europeo de Responsables de Seguridad, con objeto de



Figura 9. Túnel Juan Carlos I de Vielha

compartir las experiencias y las dudas que la aplicación de esta nueva figura había generado. En España, transcurridos unos años desde su aplicación, el Comité de Túneles de la ATC puso en marcha un grupo de trabajo para poner en común las experiencias adquiridas. Este Grupo ha entregado recientemente un informe que contribuye eficazmente a aclarar no sólo las dudas que inicialmente planteaba su figura sino sobre todo a facilitar sus labores y por lo tanto a mejorar la seguridad global.

En 2010 comenzó la inspección de túneles de la red de carreteras de Estado, para lo cual se dividió España en tres grandes zonas. A fecha de hoy se han concluido las inspecciones de las zonas 1 y 2, lo que supone casi un 60 % de los túneles. Dentro de las actividades iniciales de estos contratos estuvo el desarrollo de una aplicación informática BIT (Base de datos de inventario, incidencias e inspecciones en túneles de la RCE) en el que además de los datos principales de los túneles se introducen las incidencias que se producen, informes de los responsables de seguridad y de las inspecciones y otras informaciones relevantes.

Por último y para reflejar la ingente actividad que se ha realizado, en el año 2013 se celebró el primer curso impartido por la Asociación Técnica de Carreteras para la formación de operadores de Consola.

También en algunas comunidades autónomas se desarrolló una intensa actividad normativa, en la que la colaboración entre los técnicos de las empresas privadas y los de las administraciones estatales y autonómicas puede considerarse un ejemplo que permitió que el conocimiento se transmitiera sin dificultades.

Todo esto ha permitido acumular una experiencia con la que anteriormente no se contaba y ha llevado a todos los agentes relacionados con la seguridad, a reconsiderar algunos de los planteamientos inicialmente realizados.

Por un lado, la adecuación de los túneles existentes ha supuesto el equipamiento (y en ocasiones un equipamiento excesivo) de los mismos con una instalaciones de seguridad que antes no tenían, haciendo de ellos infraestructuras más complejas, con unos costes de explotación más elevados, y más difíciles de operar y mantener por el personal de explotación que llevaba a cabo dicha actividad. Esta circunstancia ha derivado por un lado en que los proyectistas vayan prestando cada vez más atención a los aspectos económicos, tratando de optimizar los proyectos buscando soluciones más eficientes, y por otro en que se reconozca cada vez más la importancia del manual de explotación y operación. Las administraciones se están implicando igualmente en la formación de los agentes involucrados en la seguridad de los túneles.

El periodo posterior a la implantación de la Directiva se caracterizó por las incertidumbres que su aplicación significaba; pero muchas veces es en la incertidumbre donde se crean oportunidades y tanto en la norma europea



Figura 10. Túneles de la Variante Sur Metropolitana de Bilbao (España)

como en su transposición española se pueden encontrar algunas: el concepto de Seguridad Equivalente y el análisis de riesgo es en nuestra opinión la mayor de ellas.

En efecto, hasta ese momento las normas relacionadas con la seguridad en los túneles de carretera eran desarrolladas por expertos, que establecían un listado de requisitos que el túnel debía cumplir; se suponía que estos requisitos se habían estudiado cuidadosamente durante el proceso de elaboración de cada norma, de tal modo que las medidas prescritas eran las más ventajosas desde el punto de vista coste-beneficio. El proyectista se limitaba a comprobar que todos estos requisitos se cumplían para considerar el túnel seguro; generalmente, estas normas no permitían plantear medidas alternativas, por lo que la repercusión económica de la adecuación de un determinado túnel podía ser muy significativa, por ejemplo, cuando fuera necesaria la construcción de nuevas salidas de emergencia.

En el diseño por prestaciones se define un nivel global de seguridad que el túnel debe alcanzar, pero sin prescribir concretamente cómo. Para ello, generalmente se lleva a cabo una evaluación del nivel de seguridad del túnel y se compara con los objetivos de seguridad establecidos (criterio de aceptación del riesgo).

La Directiva adoptó un planteamiento mixto: definió el nivel mínimo de seguridad a alcanzar en los túneles de una manera prescriptiva, pero permitiendo a la Autoridad Administrativa aceptar medidas alternativas en caso de que alguno de los requisitos prescriptivos no pudiera cumplirse o sólo pudiera llevarse a cabo con un coste desproporcionado. Este planteamiento más flexible involucraba en mayor medida al proyectista, y permitía ajustar el proyecto a las condiciones particulares de cada túnel. En este sentido, el camino elegido por la Directiva está en la línea de todas las orientaciones marcadas desde hace tiempo por los expertos en todos los ámbitos de la seguridad contraincendios que abogan por olvidar los viejos códigos prescriptivos por códigos basados en las prestaciones.

La Seguridad Equivalente nos permite fijar nuestro punto de atención en otros aspectos más allá de la infraestructura:

- Comportamiento del usuario;
- gestión de la explotación hacia modelos menos complejos;
- gestión de las operaciones de emergencia;
- eficiencia energética;
- aplicaciones de simulación de mecánicas de fluido;
- optimización de la vida útil del equipamiento.

En los últimos años se ha llevado a cabo el desarrollo metodológico requerido por la Directiva Europea en relación con los análisis de riesgos. Efectivamente, si bien no se dispone de una metodología armonizada para toda Europa, muchos de los Estados miembros de la Comunidad Europea han ido publicando sus respectivas guías metodológicas. El informe PIARC "Análisis de Riesgo en túneles de carretera" [11] resume alguna de estas metodologías. En España, el Ministerio de Fomento publicó en 2012 su "Metodología de Análisis de Riesgo en Túneles de la Red

de Carreteras del Estado" [12] que complementa las metodologías y recomendaciones existentes y que augura la formación en poco tiempo de un canon en la seguridad de túneles.

Estas circunstancias, unida al hecho de que ya se dispone de un volumen relevante de datos sobre incidentes e incendios en túneles, ha proporcionado a los diseñadores una base firme para la aplicación de la herramienta del análisis de riesgo, lo que ha permitido identificar los riesgos inherentes a cada túnel, valorarlos y minimizarlos seleccionando la mejor opción para su equipamiento desde el punto de vista técnico y económico.

Igualmente, el desarrollo en los últimos años de aplicaciones informáticas cada vez más sofisticadas de simulación de mecánica de fluidos ha permitido a los proyectistas la aplicación de las metodologías de análisis de riesgo. Estas aplicaciones permiten reproducir el progreso de los humos en un incendio en un túnel, y deducir así las consecuencias del mismo en términos de usuarios afectados.

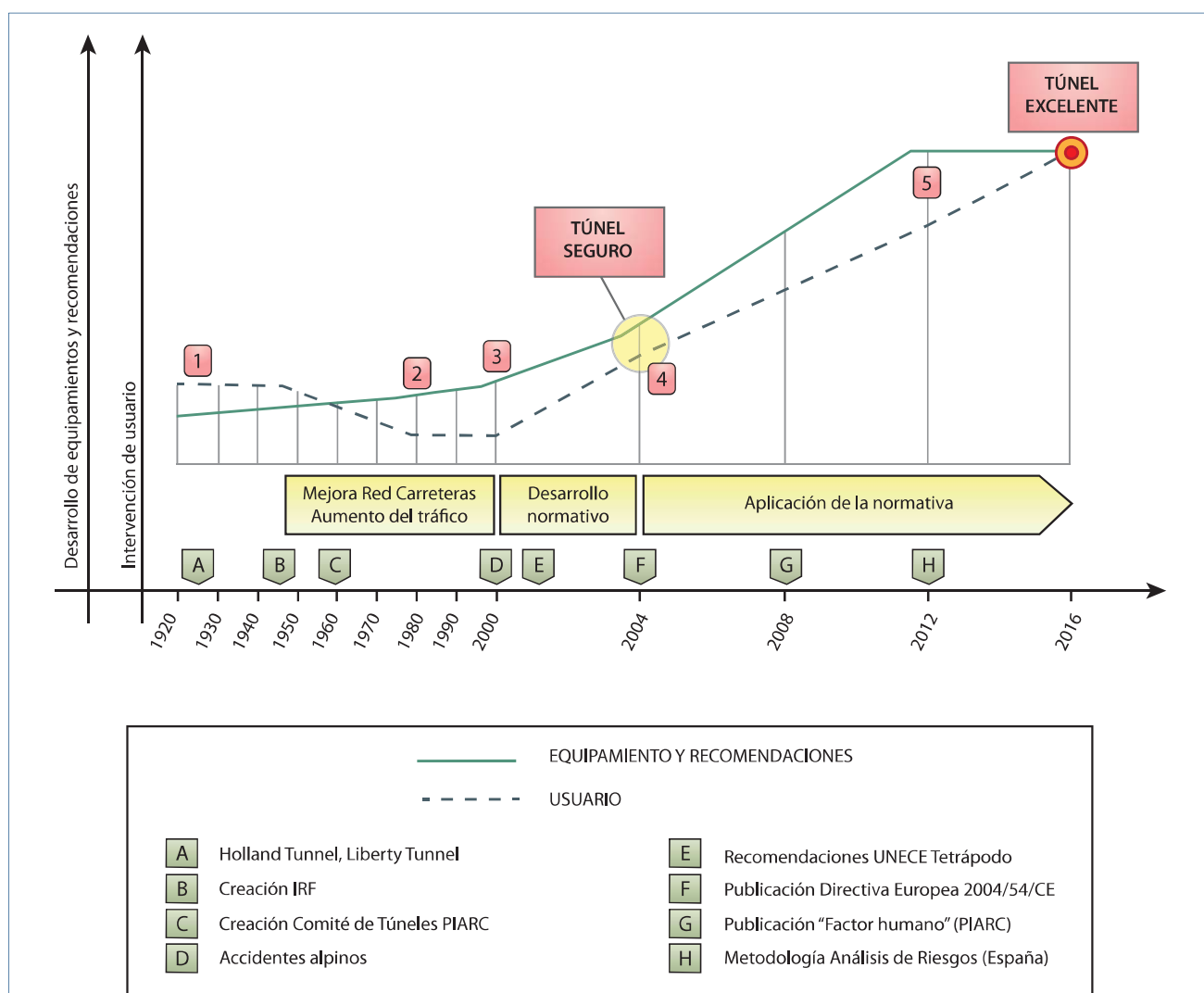


Figura 11. Evolución de la seguridad en los túneles



Figura 12. Túnel de Petralba (Huesca) [Fotografía de Alfonso Calza. Copyright IDOM]

Por otro lado, durante estos últimos años se ha producido un avance tecnológico importante en determinadas instalaciones de seguridad relacionadas con los túneles, de tal modo que éstas son cada vez más eficientes y fiables: es el caso de la aplicación de la tecnología LED para la iluminación de los túneles, que permitirá, en un futuro cercano, un ahorro energético; o el uso de cámaras de vídeo que trabajan en el espectro infrarrojo para la detección de incidentes (especialmente para la detección precoz de incendios). También ha habido un desarrollo importante en el *hardware* y *software* ligados al sistema de control de túneles, lo que ha mejorado su fiabilidad y velocidad de proceso. Igualmente ha habido un desarrollo metodológico notable en los procedimientos de actuación de la ventilación en caso de incendio.

Conclusiones

Las reflexiones realizadas en este artículo pueden representarse en una gráfica (Figura 11), cuya primera versión se realizó en el año 2005 [13].

La gráfica incluye por un lado la intervención del concepto “usuario” en la seguridad y por el otro lado el desarrollo de los equipamientos de seguridad y la normativa. La línea asociada al “usuario” refleja la percepción que éste tiene del túnel y por lo tanto su comportamiento;

los expertos deben hacer que ésta sea comprensible y sólo con esta condición debe convertirse ese conocimiento en reglamentación.

La distancia entre ambas líneas es una medida del grado de seguridad cualitativo alcanzado, de tal manera que a menor distancia entre líneas mayor es la seguridad y en su intersección encontraremos el túnel excelente. La posición relativa entre ambas líneas representa, de forma otra vez muy subjetiva, cuál de los dos conceptos, usuario o equipamientos, aporta más a la seguridad del túnel.

La primera etapa (el camino hacia el túnel seguro) se caracteriza por túneles escasamente equipados y poca o nula reglamentación. Aunque la información hacia el usuario es casi inexistente, el reducido tráfico y el estado de las carreteras obliga a una conducción al aire libre menos automática por lo que el conductor se adapta con cierta facilidad a las nuevas condiciones de circulación en el interior del túnel. Por esta razón, ambas líneas están próximas con un nivel de seguridad adecuado a ese momento y a las características de los túneles existentes (punto 1). La línea del usuario está por encima ya que relativamente es la que más aporta a la seguridad global.

Sin embargo, el importante aumento del tráfico y la mejora de las carreteras cambian las condiciones de circulación al aire libre y dificulta la transición hacia un comportamiento menos automático en el interior de los

túneles. La mejora de equipamientos y el esfuerzo normativo que se realiza lleva, en un primer momento, a que ambas líneas se separan llegando a un nivel de seguridad (puntos 2 y 3) inferior al anterior, coincidiendo con los primeros accidentes mortales graves a partir de los años setenta.

Entre 1999 y 2004 se produce un periodo de “reflexiones” que conduce a un considerable desarrollo reglamentario, incluyendo el papel del usuario como se indicó con el famoso tetrápodo de UNECE. El nuevo nivel de seguridad alcanzado (punto 4) es superior al obtenido anteriormente.

Sin embargo, posteriormente la aplicación de las directivas y las normas nacionales se realiza con criterios excesivamente rigurosos, especialmente en la actualización de túneles existentes, lo que lleva en algunos casos a túneles con exceso de equipamientos y a incorporar tecnologías no contrastadas por efecto de un “modernismo tecnológico”. Todo esto además de suponer un coste económico muy importante, en algunos casos no previsto con anterioridad, lleva a una explotación más compleja del túnel. Aunque se avanza de forma significativa en la consideración del usuario como elemento clave en la seguridad, la balanza se desequilibra hacia los equipamientos. Por lo tanto, ambas líneas se separan y conducen a una situación (punto 5) más desfavorable que las anteriores, donde no se aprovechan todas las posibilidades que las magníficas infraestructuras aportan, obteniendo un escaso beneficio marginal en términos de seguridad. En algunos casos las condiciones favorables de gálibos, anchos de carriles, iluminación etc., en el interior del túnel llevan a una confianza excesiva del conductor que olvida que está en un medio totalmente diferente al del aire libre.

Finalmente, nuestra propuesta es que se avance en la reflexión ya iniciada en muchos foros, sobre qué equipamientos son realmente necesarios en cada túnel, evitando recetas prescriptivas y estudiando el túnel “caso a caso”. Para ello la reglamentación actual nos facilita una herramienta, el análisis de riesgo, que debe convertirse en el eje sobre el que se basen las decisiones de los proyectistas y otros agentes. Para ello debería disponerse de metodologías comparables y si es posible de una metodología general para toda Europa. Además, el “usuario” en su concepción más global debe adquirir un protagonismo real más allá de ser un mero receptor de información o foco de estudios científicos de difícil aplicación real. Por último, las consideraciones económicas y energéticas es otro de los ejes en los que basar ese camino hacia el túnel excelente.

Los responsables de cada país deben estudiar en que zona de la gráfica se ubican de acuerdo con su estado actual y, por lo tanto, intensificar sus esfuerzos e inversiones

en las infraestructuras o en el “usuario” en su camino hacia el túnel excelente, del cual en España tenemos magníficos ejemplos que siguieron el camino iniciado por el primer túnel de Guadarrama.

Referencias

- [1] Fieldner, A.C.; Yant, W.P; Satler Jr, L.L.; *Natural Ventilation in the Liberty Tunnels*; Engineering News Records; 1924.
- [2] Colegio Profesional de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; *Túnel de Guadarrama*; Revista de Obras Públicas nº 113, tomo I (2998), pp. 87-88; 1965.
- [3] Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels, Borås, Sweden, 1994. SP Swedish National Testing and Research Institute.
- [4] Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE); *Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels*. Final report; 2001.
- [5] Ministère de l'Intérieur, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement; *Circulaire Interministérielle n° 2000-63, du 25 août 2000, relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national*; 2000.
- [6] Ministerio de Fomento; *Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS-98)*; Boletín Oficial del Estado del 1/12/1998, pp. 39242-39354.
- [7] Comisión Europea; *Directiva Europea 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la Red Transeuropea de Carreteras*; Diario Oficial de la Unión Europea L167 30/04/2004.
- [8] Lacroix, D. ; *Vers une véritable gestion de la sécurité des tunnels routiers: l'expérience française et internationale*. IV Simposio de Túneles; Asociación Técnica de Carreteras; pp. 79 a 99; octubre 2005.
- [9] Del Rey, I.; Espinosa, I.; Fernández, S.; Grande, A.; Alarcón, E.; (2005). *Enfoque global del sistema de ventilación*. IV Simposio de Túneles; Asociación Técnica de Carreteras; pp. 939 a 970; octubre 2005.
- [10] Comité Técnico 3.3 Explotación de Túneles de Carretera; *Human factors and road tunnel safety regarding users*; PIARC; París, 2008.
- [11] Comité Técnico 3.3 Explotación de Túneles de Carretera; *Risk analysis for road tunnels*; PIARC; París, 2008.
- [12] Ministerio de Fomento, 2012; *Metodología de análisis de riesgo en túneles de la red de carreteras del Estado*; 2012.
- [13] López, J.R.; *El diseño de túneles y su relación con el comportamiento humano ante una incidencia*; Jornadas Técnicas sobre explotación de túneles de carretera; Asociación Técnica de Carreteras; 2004. ♦