Una metodología de Análisis de Riesgos en túneles de carretera

En la búsqueda de mayor seguridad en los túneles de carretera, bajo la dirección de Juan Manuel Sanz Sacristán y Constantino Gago Fernández, la empresa Euroestudios ha finalizado un proyecto de I+D+i orientado a desarrollar una metodología de análisis de riesgos que tenga en cuenta de manera fiable todos los factores implicados, permitiendo así determinar soluciones alternativas que presten el nivel de seguridad deseado en cada caso. Para ello, se han analizado la influencia de los paráme-tros de diseño del túnel (longitud, número de tubos, número de carriles, geometría de la sección transversal, pendiente longitudinal, alineamiento vertical y horizontal, trafico unidirec-cional o bidireccional, volumen y tipo de tráfico, etc.), además de otros factores del entorno, como climatología, velocidad o tiempo de acceso de los servicios de emergencia.

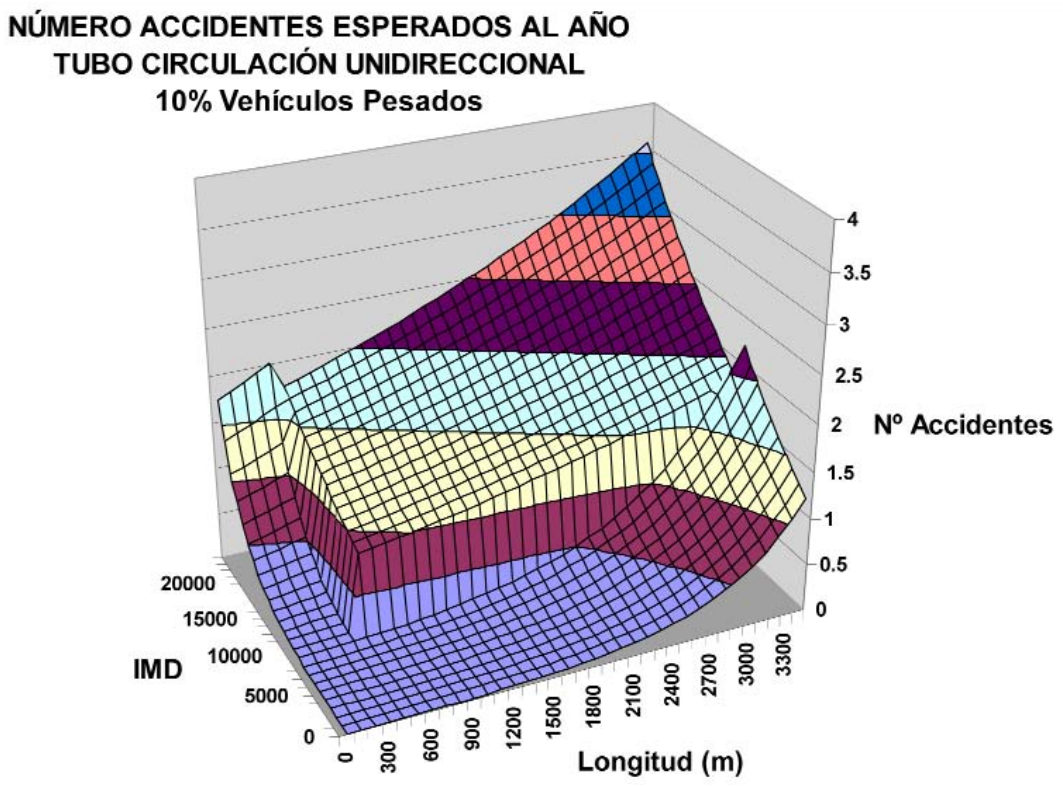
La seguridad en los túneles ha sido siempre un factor de preocupación destacado entre las infraestructuras viarias, principalmente tras una serie de accidentes graves que tuvieron lugar a finales de los años 90 y principios de la década siguiente en Montblanc o San Gotardo.

Debido a ello, la Unión Europea se puso manos a la obra y en 2004, el **Parlamento Europeo aprobó la Directiva 2004/54/CE sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles** de la red transeuropea de carreteras, en la que se cita en reiteradas ocasiones la necesidad de realizar un análisis de riesgos de los túneles y destacan los supuestos de: "verificación de que las medidas alternativas dispuestas en un túnel, en caso de desviaciones respecto a los requisitos mínimos de la norma, garantizan un nivel equivalente de seguridad"; en caso de que un túnel tenga "unas características especiales respecto a los parámetros geométricos de diseño o del entorno donde se encuentre"; y "al decidir si se permite el transporte de productos peligrosos, basándose en un análisis de los riesgos correspondientes, se tendrá en cuenta si en los túneles existentes no se pueden cumplir tales requisitos o sólo se pueden cumplir con costes desproporcionados".

En mayo de 2006, **el Ministerio de Fomento publica en el BOE el Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras** del Estado, con el traspone la norma europea.

De este modo, deducida la necesidad de establecer un análisis de riesgos para el transporte de mercancías peligrosas –resuelto ya mediante el software QRAM- y otro para la valoración de alternativas en el diseño y equipamiento de túneles y para garantizar la seguridad de los usuarios, Euroestudios se hizo cargo de este proyecto, ya que no existía una metodología para este segundo supuesto y en el desarrollo de su trabajo diario necesita realizar estos analisis de riesgos.

Así, tras presentar el **proyecto de Investigación, Desarrollo e Innovación al Ministerio de Fomento,** con cuyo apoyo técnico y suministro de información contaría a lo largo de su desarrollo, **Euroestudios inicia el trabajo bajo la dirección de Juan Manuel Sanz Sacristán, jefe de la Sección de Instalaciones del Transporte de Euroestudios**, y **Constantino Gago Fernández, jefe de la Sección de I+D+i**. Además, ha contado con la colaboración de la Cátedra de Estadística de la Escuela Técnica Superior



de Ingnieros Industriales de la UPM y del Centro Tecnológico de Automoción de Galicia, así como el apoyo del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y la cofinanciación de los Fondos FEDER.

Desarrollo del Proyecto

En una primera fase del mismo, se procedió a la **recopilación de información** relativa a la configuración y registro de accidentes de la Red de Carreteras del Estado y en su parametrización.

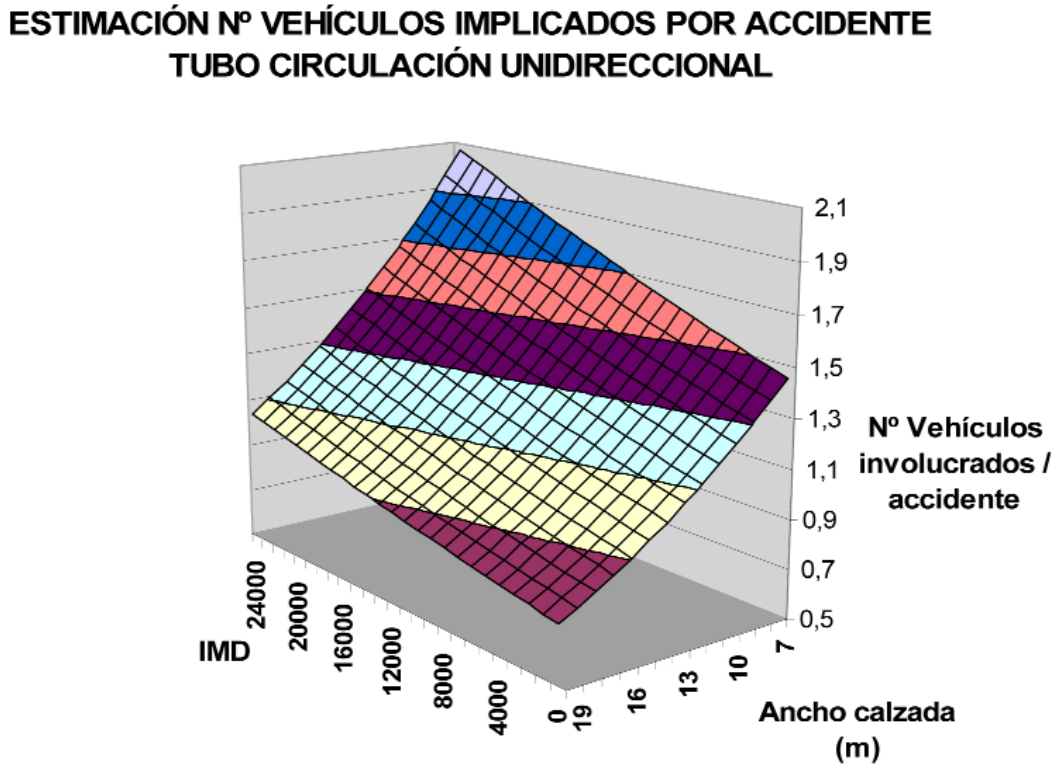
Igualmente se hizo con la normativas y metodologías existentes en diversos campos y países. Fueron igualmente imprescindibles las **visitas a distintos túneles y consultas a responsables** de explotación y la consiguiente **identificación de elementos** que intervienen en el riesgo de accidente de un túnel, para finalmente establecer una metodología que permitiese ponderar la influencia en el conjunto de cada parámetro de riesgo. De este modo, se han obtenido diversas **fórmulas matemáticas** para establecer el **número previsible de accidentes y vehículos implicados** en un determinado periodo de explotación.

A partir de este punto, se procedió al análisis de algunos de los parámetros implicados mediante el simulador de conducción del CTAG, atendiendo a su efecto, localizando elementos modificadores de las consecuencias de un accidente y estableciendo la metodología de evaluación de la influencia en las consecuencias de cada medida adoptada.

Algunos parámetros fueron incorporados al modelo mediante la propia experiencia de Euroestudios, la opinión de expertos consultados o resultados de simulaciones informáticas.

Tras contrastar que el **Programa de Análisis de Riesgos QRAM, utilizado para el análisis del transporte de mercancías peligrosas, no es válido para aplicarlo indiscriminadamente al ámbito de los túneles**, se desarrolla un modelo estadístico propio que predice las incidencias en un túnel.

El modelo de regresión binomial negativa fue determinado como el más adecuado para el número de accidentes esperados al año mientras que el de regresión de Poisson para el número de vehículos implicados en esos accidentes.



Para una mayor precisión se han dividido los túneles en dos zonas estableciendo una ecuación estadística para cada una de ellas, lo que es debido principalmente a la configuración habitual de los túneles en España (los túneles bidireccionales suelen tener muy baja circulación de vehículos o, en caso contrario, tienen una longitud muy pequeña).

Sin embargo, no se ha localizado ninguna modelización estadística para el número de victimas en relación con los parámetros geométricos o de explotación, lo cual es normal debido al reducido número de ellas en toda la base de datos de trabajo y en la propia realidad de los túneles.

El Simulador de Conducción del CTAG sirvió asimimo para analizar variables como la longitud, pendiente, sección abovedada-rectangular, y anchos de arcenes y aceras (valores difíciles de analizar o variar en la realidad). La influencia de estos parámetros en la seguridad del túnel se evalúan a través de diversos parámetros del conductor y de las respuestas producidas: velocidad, freno, movimientos oculares, frecuencia cardiaca, y posición respecto al eje de la calzada, entre otros.

Además se realizaron diversas encuestas de evaluación y focus group para obtener más opiniones.

A esto, hay que añadir, que las consecuencias de los accidentes han sido analizadas, además de por el número de vehiculos implicados esperados en cada accidente, por diversas simulaciones del comportamiento de humos y de la evaluación de los túneles.

Conclusiones

Este proyecto de investigación para la elaboración de una metodología de análisis de riesgos en túneles de carreteras ha permitido localizar fórmulas directas de la influencia de diversos factores en la seguridad de un túnel (a través del número de accidentes esperados y de los vehículos medios implicados en ellos) como es la IMD, la longitud, el carácter unidireccional o bidireccional, el % de vehículos pesados y el ancho de la calzada – número de carriles. Sobre otros parámetros se ha profundizado en la influencia sobre la seguridad, aunque no se haya localizado una fórmula matemática que la reproduzca, a través de encuestas, opinión de expertos, simulador de conducción, simulaciones informáticas,etc.

MODELO ESTADÍSTICO OBTENIDO POR EUROESTUDIOS

ZONA 1:
IMD≤10.000 veh/día

ó

(IMD≥10.000 veh/día & longitud≤500 m).

$$\mu_1 = \exp(-6.384 + 2.446 \cdot 10^{-4} \cdot IMD + 1.627 \cdot 10^{-3} \cdot L + 2.903 \cdot Bi + 0.1064 \cdot P - 5.212 \cdot 10^{8} \cdot IMD \cdot L)$$

ZONA 2:
IMD≥10.000 veh/día y longitud≥500 m.

$$\mu_2 = \exp(-0.6882 + 4.664 \cdot 10^{-5} \cdot IMD + 2.496 \cdot 10^{-4} \cdot L)$$

AMBAS ZONAS:

$$Veh = \exp(0.736195 - 5.22176 \cdot 10^{-2} \cdot AC + 1.48567 \cdot 10^{-5} \cdot IMD)$$

Donde:

μ : número esperado de accidentes al año
Veh: número esperado de vehículos implicados por accidente
IMD: Intensidad Media Diaria del tráfico (variable cuantitativa, en veh/día)
L: Longitud (variable cuantitativa, en metros)
Bi: Bidireccional (=1 túnel bidireccional, =0 túnel unidireccional)
P: Tanto por ciento de vehículos pesados (variable cuantitativa)
AC: Ancho Calzada (variable cuantitativa, en metros)

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGOS DESARROLLADA POR EUROESTUDIOS, INGENIEROS DE CONSULTA

De ahí que, Euroestudios mantiene la necesidad de seguir mejorando en el registro y análisis de las incidencias con el fin de mejorar los conocimientos en relación con la seguridad de los túneles, poder ajustar las fórmulas obtenidas y localizar nuevas funciones de influencia.

Asimismo, es **destacable que la longitud y la IMD tienen una relación directamente exponencial en la seguridad** y que no se puede, o no se debe, contemplar por clasificaciones discretas o como si fueran lineales.

Finalmente, Euroestudios desarrolló una completa metodología de Análisis de Riesgos en la que se propone la aplicación de las fórmulas de probabilidad y consecuencias obtenidas para el túnel en estudio. Dichos valores se modificarán en función del resto de parámetros de influencia. Las consecuencias del accidente se obtendrán a partir del número de vehículos implicados, del número de personas que previsiblemente se encontrarán en el túnel y de las condiciones de control de humos y de evacuación. La valoración de las consecuencias se ajustará en función del resto de equipos e instalaciones dispuestos. Los valores resultantes se compararán con los obtenidos para el mismo túnel cumpliendo estrictamente el RD 635/2006, verificando si las medidas alternativas o de compensación dispuestas obtienen un nivel de seguridad igual o mayor que el exigido.

La metodología alcanzada, que Euroestudios quiere seguir desarrollando en colaboración con todos los organismos y técnicos implicados en el diseño, construcción y explotación de los túneles, es una herramienta útil en la toma de decisiones que impliquen la mejor solución técnica y económica a cada uno de los casos. Además está considerada una aportación útil a la Metodología de Análisis de Riesgos de Túneles de Carreteras que se debe aplicar a nivel nacional y de la Unión Europea.