

EVALUACIÓN DE RIESGO DE TÚNELES CARRETEROS EN EXPLOTACIÓN

Martínez, G.^(p); Alegre, J.; Ordóñez, J.; Jadraque, E.;

Abstract

One of the newest points is the analysis and risk assessment requirements in those tunnels that for their special characteristics it is highly recommended. Along this article, it has been made a compile and a research of risk assessment, analysis and evaluation main models for road tunnels in operations phase at international level.

Keywords: Road Tunnels; Safety; Risk Assessment & Analysis

Resumen

Uno de los puntos más novedosos de la nueva normativa en materia de seguridad de túneles carreteros (Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado), es la exigencia del análisis y evaluación de riesgo en aquellos túneles que por sus singulares características así lo aconsejan. A lo largo del presente artículo se una revisión de modelos y métodos de análisis y evaluación de riesgo en túneles carreteros en la fase de explotación a nivel internacional..

Palabras clave: Túneles carreteros. Seguridad explotación. Análisis de Riesgo

1. Introducción

El desarrollo y modernización de las redes de carreteras en cualesquier país conlleva necesariamente alejarse de trazados sumidos y adaptados a la topografía por donde discurren.

La exigencia de mayores velocidades de proyecto en cualesquier situación orográfica conllevan un mayor número de tramos en viaducto y en túneles.

En la actualidad, el número de túneles existentes en todo el mundo crece día a día y los que superan la longitud de 1000 metros son más que considerables.

En relación con las características y seguridad de los túneles de carreteras, la longitud supone uno de los parámetros que en primer término se consideran. Existe cierto consenso en el hecho de que los túneles son cortos hasta los 500 metros, son largos a partir de los 1.000 metros y entre esas dos longitudes su consideración es función de otros parámetros como la intensidad de tráfico y mercancías peligrosas, geometría de la vía, etc. En este sentido en la Unión Europea se ha establecido la longitud de 500 m desde el punto de vista de seguridad.

Hasta 1.999 la percepción y la sensibilidad social frente a las posibles consecuencias o daños que se pudieran producir en el interior de un túnel eran relativamente bajas hasta el punto de no detectarse una demanda cierta de actuaciones por parte de la sociedad.

Es en este año cuando el 24 de marzo se produce el incendio en el interior del Túnel del Mont-Blanc, de titularidad italo-francesa, cuyas principales consecuencias, además de cuantiosos daños materiales, fueron 39 muertos. A ellos hay que sumar otros grandes accidentes como los de Tauern, también en 1999, donde se produjeron 12 víctimas mortales y ya en el 2002, en el túnel de San Gotardo, 11 víctimas mortales. Otros accidentes de importancia se detallan en la tabla 1.

Año	Nombre	País	Longitud (m)	Muertes
1978	Velsen	Países Bajos	770	55
1979	Nihonzaka	Japón	2.000	9
1982	Caldecott	USA	1.000	7
1983	Pecorile	Italia	600	8
1989	Brenner	Austria	412	2
1995	Pfänder	Austria	6.800	3
1996	Isola delle Femmine	Italia	148	5
1999	Mont-Blanc	Francia-Italia	11.600	39
1999	Tauern	Austria	6.000	12
2001	Gleinalm	Austria	8.800	5
2002	San Gotardo	Suiza	12.600	11
2005	Frejus	Francia-Italia	12.900	2

Tabla 1: Últimos accidentes en túneles de carreteras

A partir de ese momento se produce una demanda de mayor seguridad por parte de la sociedad. Esta circunstancia se ha traducido en la constitución en multitud de paneles de expertos, proyectos específicos de investigación y el desarrollo de un marco legislativo cada vez más exigente.

Se está produciendo una revolución en los estándares de seguridad en el diseño, construcción y explotación de túneles carreteros. Aún teniendo presente que la seguridad absoluta no es posible, ésta es una función directa de las inversiones que se realicen en infraestructuras e instalaciones de los túneles.

2. Respuesta social. Proyectos y estudios realizados

La respuesta de las instituciones y autoridades a la creciente sensibilidad frente al riesgo existente se materializa en distintos instrumentos y herramientas, que finalmente cristalizan, en aquellos puntos en los que así es posible, en normativa de obligado cumplimiento.

En el caso de la Unión Europea y dado que fue en tres de sus estados miembros en donde se produjeron dos de los incidentes con mayores consecuencias fatales, se promovieron acciones de estudio y caracterización de los túneles de carreteras, especialmente dentro del 5º Programa Marco.

Los principales proyectos [1], algunos de ellos coparticipados por instituciones internacionales de la importancia de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, del inglés Organisation for Economic Co-Operation and Development), (OECD, 2001) y la Comisión Económica de Naciones Unidas para Europa (UNECE, del inglés United Nations Economic Commission for Europe), se recogen en la figura 1.

Logo	2001	2002	2003	2004	2005	2006
	Bases de Datos y Guías de Utilidad					
	Optimización de Costes - Diseño Óptimo					
	Medidas de seguridad					
	Gestión Avanzada de Túneles					
	Simulador de Fuegos en Túneles					
	Actualización de Túneles - Innovación					
	Guías Europeas Armonizadas					

Figura 1: Proyectos europeos sobre seguridad en túneles. 5º Programa Marco de la Unión Europea.

Como puede observarse el objeto de los mismos se estudian todos los aspectos relacionados con la gestión del riesgo y la seguridad en túneles carreteros, partiendo de la necesidad de establecer una base de datos adecuada que permita un estudio riguroso y la incorporación al diseño de parámetros derivados de la observación de túneles en explotación.

También incluyen aquellos aspectos relacionados con la gestión avanzada y las medidas de seguridad y su efectividad en términos de disminución de las tasas de riesgo, así como la actualización y medidas complementarias a implementar en túneles en explotación cuya puesta en servicio se produjo cuando los estándares de seguridad eran sensiblemente inferiores a los que en la actualidad se plantean.

Uno de los temas principales que se abordan en todos estos proyectos es el análisis de probabilidades de ocurrencia y consecuencias de fuegos en el interior del túnel. Este hecho, junto con el vertido de sustancias tóxicas y peligrosas constituye la principal contingencia que se puede producir a la que están encaminadas la mayoría de las medidas de seguridad y de respuesta en términos de planes de emergencia [2], [3] y [4]

3. Normativa

A nivel internacional se está produciendo una actualización de los estándares de seguridad y su incorporación a la normativa nacional.

En el caso de España, el Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado, recoge y traslada al ordenamiento jurídico español todas las consideraciones que sobre estos aspectos recoge la Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras

Entre otros aspectos recoge en sus artículos 11 y 12, y en relación con el análisis del riesgo de todos los túneles comprendidos en el ámbito de aplicación del mismo, las siguientes consideraciones:

- Artículo 11. Análisis de riesgo.
 - El análisis de riesgo de un túnel deberá tener en cuenta todos los factores que afectan a la seguridad, en particular, la geometría del túnel, el entorno, el equipamiento, las características del pavimento y el tráfico y el tiempo de llegada de los servicios de emergencia.
 - Los análisis de riesgo serán realizados, cuando resulten necesarios, por un organismo funcionalmente independiente del gestor del túnel. El contenido y los resultados de los análisis de riesgo se incluirán en el manual de explotación que se remita a la autoridad administrativa, para recabar las autorizaciones pertinentes.
- Artículo 12. Metodología de análisis de riesgo.
 - Para todos los análisis de riesgo que puedan realizarse sobre cualquiera de los túneles comprendidos dentro del ámbito de aplicación de este real decreto se seguirá obligatoriamente una metodología detallada y bien definida, en consonancia con las normas de buena práctica disponibles, la cual será objeto de aprobación por la autoridad administrativa.

Todo ello afecta a todo el ciclo de vida del túnel partiendo de su planificación, estudio de alternativas, proyecto de construcción, construcción y puesta en servicio.

Desde la aprobación de la Directiva y la constitución del Comité de Expertos al que hace referencia el artículo 17.2 se han llevado a cabo multitud de estudios e informes que concluyen con la resolución de la Comisión Europea, con fecha de 15 de mayo de 2007. Esta indica que no es necesaria imponer una armonización, en cuanto a los métodos y modelos utilizados para el análisis y evaluación del riesgo [5].

En dicha resolución se apunta que es el ámbito nacional el adecuado para la armonización del análisis y evaluación de riesgo.

Se hace por tanto necesario el estudio y desarrollo de modelos que permitan conocer las condiciones de riesgo y una correcta gestión del mismo en los túneles de carreteras existentes en el territorio español.

4. El riesgo en túneles de carreteras

Existe mucha literatura en relación con las definiciones de riesgo en túneles [6] y [7] y criterios para establecer umbrales críticos admisibles [8] y [9].

Los riesgos presentes pueden responder a la siguiente clasificación:

- Riesgo Individual (Rind)¹; es el que afecta a una persona considerada de forma aislada y corresponde a unas determinadas y específicas condiciones de explotación de la infraestructura.
- Riesgo esperable (Rexp); se expresa en términos de número de muertes por túnel y año.
- Riesgo Social (Rsoc); corresponde al número de individuos afectados por el incidente y/o accidente. Normalmente se expresa en términos de frecuencia acumulada $F = P(R_m > N)$, lo que supone que el número de muertes exceda un número N por unidad de túnel o kilómetro a lo largo del año (esta función es conocida como Curva F-N)

En cuanto a umbrales de aceptación del riesgo, existen publicaciones que vinculan estos a la actitud y aceptación por parte de los individuos y de la sociedad [10].

A partir del riesgo de muerte por persona y año por exposición la actitud queda perfectamente determinada (tabla 2)

Riesgo de muerte por persona y por año	Actitud
10^{-3}	Este tipo de riesgo no es común. Es inaceptable para el público y cuando aparece la sociedad demanda medidas.
10^{-4}	Se está dispuesto a asignar recursos para reducir el riesgo (como por ejemplo limitación de paso de mercancías peligrosas)
10^{-5}	Si bien son algo menores que los anteriores, aún son reconocidos como tales (riesgos por envenenamiento, fuego, etc.)
10^{-6}	No son prácticamente reconocidos como tales. Se es consciente del mismo pero no se estima pueda ocurrirle a uno mismo (éste es el caso de electrocución por rayo, etc.)

Tabla 2 Actitudes hacia el riesgo

¹ El riesgo individual es a su vez clasificado en voluntario o no; si bien esta clasificación no afecta a la propia evaluación del riesgo si que afecta a los umbrales de aceptación por las personas objeto del mismo, tal y como se puede observar en la tabla 2.

Específicamente para el riesgo individual, R_{ind} , destacan las propuestas que tienen en cuenta el hecho de que la actividad sea o no voluntaria así como el beneficio percibido [11].

La formulación responde a la expresión $R_{ind} < \beta * 10^{-4}$ (por año), en donde el factor β es el que se detalla en la tabla 3.

		Agente	β
Interno	Empleados		1
	Pasajeros o usuarios		0.1
Externo	Personas que viven o desarrollan alguna actividad en las inmediaciones del túnel		0.01

Tabla 3: Valores de β para cada uno de los agentes presentes en los túneles

Para el caso del riesgo social (R_{soc}), como ya se ha apuntado, la mayoría de los autores [6] y [12] coinciden en su expresión en términos de frecuencia acumulada $F = P(R_m > N)$ siendo un ejemplo de la misma la de la figura 2.

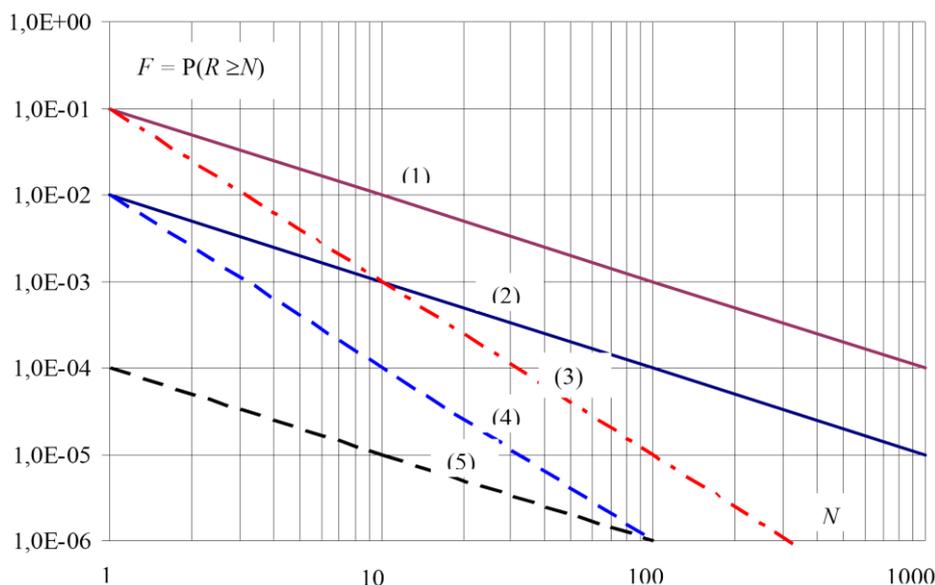


Figura 2: Límites para el riesgo social

En la figura se pueden distinguir diversas áreas de riesgo en función de los valores adoptados de los parámetros A y k de la expresión $F < F_i = A * N^{-k}$. Las áreas quedan definidas por cada uno de los límites dados por:

- (1) Límite más alto moderado; $A=0.1$ y $k=1$
- (2) Límite más alto severo; $A=0.01$ y $k=1$
- (3) Nivel Medio; $A=0.1$ y $k=2$
- (4) Límite más bajo moderado; $A=0.01$ y $k=2$
- (5) Límite más bajo severo; $A=0.0001$ y $k=1$

Existen trabajos en los que las condiciones de riesgo de un determinado túnel, expresadas por la curva F-N podrán quedar enmarcadas en una de las tres áreas delimitadas por los bordes superior e inferior [13].

Por encima del límite superior se encuentra la zona de Riesgo No Admisible, lo que obliga a una reconsideración total del túnel ya que las posibilidades de ocurrencia de una catástrofe son más que ciertas.

Si la curva F-N se encuentra por debajo del límite inferior el túnel se encuentra en la zona de Riesgo Tolerable, por lo que no son necesarias medidas adicionales. Si, por último, la curva se encontrase en la zona intermedia, conocida como ALARP, de sus iniciales en inglés, As Low As Rational Posible, se deberán llevar a cabo medidas adicionales de seguridad de manera que se consiga mejorar el riesgo tanto como razonablemente sea posible (véase figura 3)

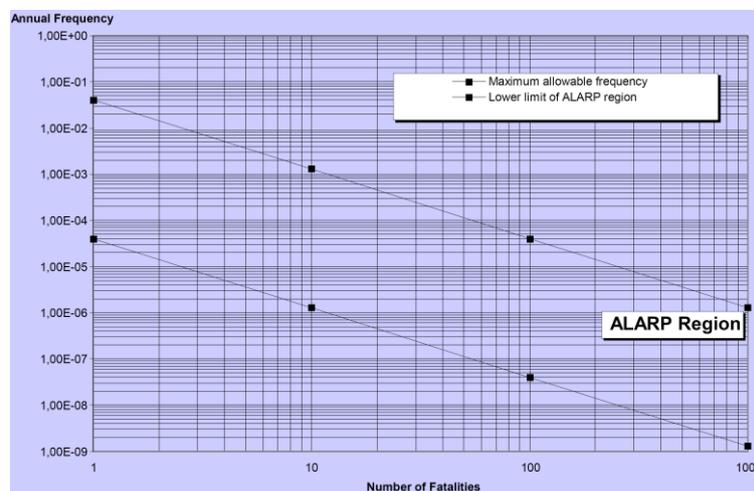


Figura 3: Delimitación de la Región ALARP

5. Análisis de riesgo

En cuanto a los métodos de análisis de riesgo existen dos grandes líneas de trabajo. La determinista y la probabilística.

La primera de ellas considera las consecuencias y la severidad de las mismas en un determinado escenario, que normalmente es considerado el peor de los casos.

Un método determinista consiste en un determinado número de modelos que son utilizados de forma integrada o por parejas. Los modelos usuales son:

- Modelos de efectos físicos
- Modelos de daños
- Modelos de evacuación

Los modelos de análisis probabilístico se pueden estructurar en: el estudio de probabilidades y las consecuencias. Para lograr articular de forma adecuada el primero pueden utilizarse diversas técnicas de cuantificación estadística.

En el caso de las consecuencias se utilizan herramientas similares a las utilizadas para los modelos deterministas, además de incorporar análisis probabilísticos a nivel de detalles. Es razonable la utilización combinada de ambos modelos, consiguiendo con el análisis de escenarios mejorar la información sobre las consecuencias de casos específicos de accidentes y/o incidentes que, por su gravedad y/o frecuencia de ocurrencia, deben ser estudiados de forma adecuada. La situación a nivel internacional se puede ver en la figura 4.

	Canadá	Francia	Gran Bretaña	Dinamarca
Método Aplicado	Análisis cualitativo Análisis determinista	Análisis cualitativo	Análisis cualitativo Análisis determinista de escenarios	Análisis probabilística Análisis determinista de escenarios
Objetivo	Comparación / Ranking	Evaluación de riesgo ligado al Transporte de Mercancías Peligrosas	Riesgo enfocado al diseño. Regulación del TMP	Diseño de un sistema seguro Optimización de las respuestas a incidentes
Modelo Aplicado	"Hecho en casa", no aplican estandar	QRAM	Diferentes modelos en función del objeto	Guía para el análisis de escenarios. Modelo TUNPRIM para QRA
	Suecia	EEUU	España	
Método Aplicado	Análisis probabilística Análisis determinista de escenarios	Análisis probabilística Análisis determinista de escenarios	Análisis probabilística Análisis determinista de escenarios	
Objetivo	Aumentar los estándares de seguridad a un precio razonable	Minimizar los daños humanos y materiales. Asegurar las mejores condiciones de evacuación	Minimizar los daños humanos y materiales. Asegurar las mejores condiciones de evacuación	
Modelo Aplicado	Se utilizan diferentes modelos	Se aplican diferentes modelos	Se aplican diferentes modelos	

Figura 4: Modelos de análisis a nivel internacional

6. Consideraciones finales

Las singularidades que presentan los túneles de carreteras, tanto desde el punto de vista de la infraestructura como del posible comportamiento de los usuarios de los mismos, obliga a dedicar recursos importantes al estudio, análisis y gestión de los riesgos inherentes a la propia naturaleza de los túneles.

Existen posibilidades de estudio desde los puntos de vista cualitativo y cuantitativo, si bien a la vista de las realizaciones internacionales la utilización conjunta de los mismos enriquece el resultado final y ajusta los resultados a la realidad de la explotación de una infraestructura tan compleja por los entes implicados en la misma.

Referencias

- [1] Peter, N (2004). Guidelines for fire safe design compare fire safety features for road tunnels. Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements. First International Symposium, Prague 2004.
- [2] Ruffin E., P. Cassini P. and H. Knoflachner (2005) Transport of hazardous goods. See chapter 17 of Beard A and Carvel R (2005). The Handbook of Tunnel Fire Safety. Thomas Telford Ltd, London, 2005.
- [3] Knoflachner H., Pfaffenbichler P. C. (2001), A quantitative risk assessment model for road transport of dangerous goods, Proceedings 80th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, January 2001
- [4] ILF (2004), "Analysis of Standard Risks in Road Tunnels' in Austria – Abbreviated Presentation of Methodology", ILF Consulting Engineers, Linz, Austria, RVS 9.261 – Update, 19.01.2004
- [5] Lacroix, Didier (2007). Road Tunnel Risk Assessment: Regulatory and other Developments. Workshop "Assessment of the Safety of Tunnels". Parlamento Europeo. Bruselas, 2007.
- [6] Vrouwenvelder A., Holický M., Tanner C.P., Lovegrove D.R., Canisius E.G. (2001) CIB Report. Publication 259. Risk assessment and risk communication in civil engineering. CIB, 2001.
- [7] Knoflachner H., Pfaffenbichler P. C. (2001), A quantitative risk assessment model for road transport of dangerous goods, Proceedings 80th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, January 2001
- [8] Stewart M.S. & Melchers R.E. (1997) Probabilistic risk assessment of engineering system. Chapman & Hall, London, 1997, 274 p.
- [9] Merchers, R.E. (1999). Structural reliability analysis and prediction. John Wiley & Sons, 437 p. Chichester, 1999.
- [10] Lowrance, W (1976). F. Of Acceptable Risk: Science and The Determination Of Safety. Los Altos, California, EE.UU. William Kaufman Inc., 1976.
- [11] Vrijling, J.K., Hengel, W. van, Houben, R.J. (1998) Acceptable risk as a basis for design, Reliability Engineering and System Safety 59, p. 141–150.
- [12] Trbojevic V. M. (2003) Development of Risk Criteria for Road Tunnels. 5th International Conference – Safety in Road and Rail Tunnels. Marseille, 2003.

[13] Knoflach H., Pfaffenbichler P. C. (2004), A comparative risk analysis for selected Austrian tunnels. 2nd International Conference Tunnel safety and Ventilation. Graz, 2004.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Germán Martínez Montes.
AREA DE PROYECTOS DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE GRANADA
Campus Universitario Fuentenueva
Avenida de Severo Ochoa, s/n
18071 GRANADA
Teléfono +34 958 24 94 40
FAX +34 958 24 94 41
E-mail: gmmontes@ugr.es
URL: <http://www.ugr.es/~gmmontes>