

Análisis y evaluación de riesgo de túneles carreteros en explotación

Risk assessment models for road tunnels in operation

Germán Martínez-Montes*, José del Cerro-Grau*, Javier Alegre-Bayo*, Javier Ordóñez-García*

* Universidad de Granada, Granada, ESPAÑA
german00@ugr.es

Fecha de recepción: 20/ 06/ 2007
Fecha de aceptación: 19/ 07/ 2007
PAG. 101 - 110

Resumen

Tras los fatales accidentes en los últimos años, la seguridad en la explotación de túneles de carreteras se ha convertido en una prioridad de la política de transportes a nivel internacional y en especial en la Unión Europea. Esta circunstancia se ha traducido principalmente en 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 analiza el marco conceptual del riesgo en ingeniería, así como las principales opciones metodológicas existentes para el análisis de riesgo en túneles en explotación, deterministas y probabilísticas. La conclusión del estudio es la utilización generalizada de las primeras completadas con un estudio determinístico centrado en aquellos casos cuyas consecuencias presentan unas mayores pérdidas en términos absolutos para la sociedad.

Palabras Clave: Túneles carreteros, seguridad explotación, análisis de riesgo

Abstract

After tunnel fire catastrophes at the end of the 1990's, the safety at road tunnel operations has become a priority on transportation policies at international level especially inside the European Union. This circumstance has required the analysis and risk assessment in those tunnels that for their special characteristics it is highly recommended. This article presents a biographical review in the topic along with a research of risk assessment models for road tunnels. The main conclusion of this study is the need of applying probabilistic models complemented by determinist studies centred in cases which may present biggest losses to the society.

Keywords: Road tunnels, operational safety, risk analysis

1. Introducción

El desarrollo y modernización de las redes de carreteras en los países conlleva necesariamente el alejarse de trazados sumidos y adaptados a la topografía por donde discurren. Las exigencias de mayor velocidad de los proyectos con diversas situaciones 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 (UNECE, 2001).

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 dos longitudes su consideración es

función de otros parámetros como la intensidad de tráfico y mercancías peligrosas, geometría de la vía, etc. (Martínez et al., 2001). En este sentido en la Unión Europea, se ha establecido la longitud de 500 m desde el punto de vista de seguridad (EU, 2004).

Hasta 1999 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, 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 (Knoflacher et al., 2004). Otros incidentes y/o accidentes con fatales resultados se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Listado de accidentes con resultados fatales de los últimos años (Elaboración propia a partir de Krieger, 2006)

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

Estos hechos, con unos costes individuales y sociales elevados, fueron exhaustivamente analizados, especialmente el acaecido en el túnel del Mont-Blanc, de manera que se pueden sacar interesantes conclusiones de las circunstancias que dieron lugar a los mismos para evitar que se vuelvan a reproducir y para poder diseñar medidas de emergencia que minimicen sus efectos. Entre estas se destacan las siguientes (Ministère de l'Interieur et al., 1999; Lacroix, 2001):

- El transporte de mercancías peligrosas a través de grandes túneles debe analizarse con detalle, estableciendo estudios sobre rutas alternativas, tipología y peligrosidad de cargas, etc.
- Los sistemas de detección automática de incidentes deben de incorporarse a la totalidad de los túneles de cierta longitud.
- Las responsabilidades sobre la conservación, explotación y operación de los túneles ha de recaer sobre una entidad, que ha de concentrar toda la información y el centro de toma de decisiones en un único punto.
- La respuesta inmediata (primeros diez minutos) es esencial para la evolución y el desarrollo posterior de cualquier incidente.
- Es completamente imprescindible asegurar un mínimo de energía en el túnel durante los incidentes y en particular las comunicaciones entre túnel y centro de control.
- Deben de desarrollarse planes de emergencia que incluyan protocolos de actuación e incluso simulacros

y pruebas que permitan calibrar la efectividad de las medidas previstas en caso de accidentes y/o incidentes.

Por ello, a partir de este momento se produce una demanda de mayor seguridad por parte de la sociedad, circunstancia que 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 de manera que a la fecha de hoy se está produciendo una revolución en los estándares de seguridad en el diseño, construcción y explotación de túneles carreteros, no sin tener presente que si bien la seguridad absoluta no es posible, esta es un función directa de las inversiones que se realicen en infraestructuras e instalaciones de los túneles (Jonkman, 2003)

A lo largo de este artículo se repasan los conceptos de riesgo ligados a la explotación de túneles carreteros, se analizan los distintos modelos de evaluación de riesgo y se finaliza con las principales conclusiones del estudio.

2. Riesgo. Conceptos básicos

El concepto de riesgo está presente en la práctica, en la totalidad de las actividades que realiza el ser humano, y es importante aclarar el alcance y significado del mismo para poder llevar a cabo un estudio adecuado y consistente de su tratamiento en túneles carreteros (ya que en algunos casos se confunden términos como peligro y riesgo)

El Diccionario de Real Academia Española define los mismos como (RAE, 2007):

- Riesgo: contingencia o proximidad de un daño.
- Peligro: contingencia inminente de que suceda algún mal

Por consiguiente la diferencia esencial entre los dos términos es la inminencia de ocurrencia. Se puede por tanto aseverar que el concepto de riesgo implica dos aspectos:

- La probabilidad de ocurrencia, ya que el hecho no es inminente, cuando se habla de riesgo hay que ligarlo a un concepto estadístico que concrete de manera alguna las posibilidades de ocurrencia.
- La consecuencia. Que podrá ser en uno u otro sentido (perdidas materiales, económicas e incluso humanas)

El concepto de riesgo en la ingeniería es una de las bases fundamentales para el correcto desarrollo de estudios previos, de alternativas e incluso de soluciones constructivas (ISO, 1998; ISO, 2000; ISO/IEC, 1999; ISO/IEC, 2002). Este hecho es tal que existen definiciones de proyecto de ingeniería que suponen la asignación de riesgos para la construcción e instalación entre todos y cada uno de los agentes que intervienen en el mismo (Martínez et al., 2006)

El estudio del riesgo en túneles exige un conocimiento previo del sistema y agentes que participan en el mismo, ya que la complejidad del mismo, en naturaleza y disposición condicionará los distintos métodos y modelos que permitan obtener resultados que se ajusten a la realidad. Los distintos elementos y sus relaciones presentes en túneles en explotación quedan sintetizados en la Figura 1.

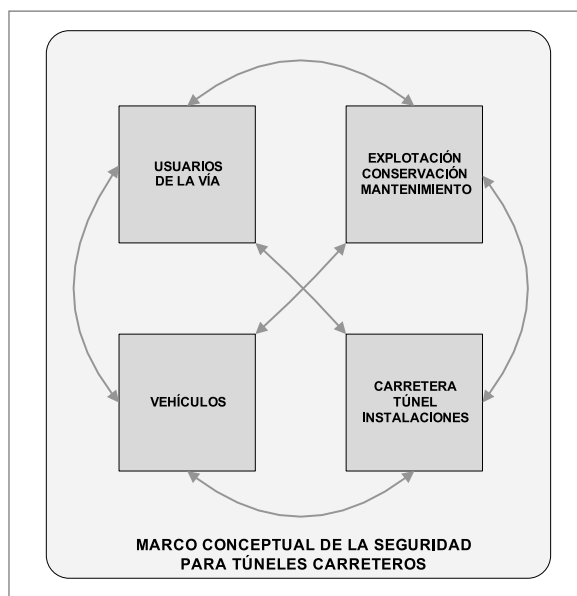


Figura 1. Agentes que participan de la seguridad en túneles carreteros (Elaboración propia a partir de Naciones Unidas, 2001)

La gestión de la seguridad en túneles de carreteras exige acciones antes, durante y después de cualquier accidente e incidentes. Todas las medidas de concepción, diseño, construcción y explotación de que se disponen tienen como primer objetivo evitar la ocurrencia del accidente, si bien hay que disponer de medios para conseguir reducir las consecuencias, y posteriormente llevar a cabo un seguimiento y evaluación de lo ocurrido para así poder aprender de las posibles deficiencias de los sistemas y mejorar no solo el que ha sufrido la contingencia sino el resto de las características similares (Lacroix, 2001; Molag, 2001; Persson, 2002).

Las cadena de acciones posibles para abordar la seguridad en túneles de carreteras presenta las etapas de pro-acción, prevención, reducción, eliminación, seguimiento y evaluación (Meter, 2004)

Existe mucha literatura en relación con las definiciones de riesgo en túneles (Vrouwenvelder et al., 2001; Knoflachner et al., 2004) y criterios para establecer umbrales críticos admisibles (Stewart et al., 1997; Melchers, 1999).

Los riesgos presentes pueden responder a la siguiente clasificación:

- Riesgo Individual (R_{ind}) (Obsérvese que si se considera un agente externo en la formulación de Vrijling, y dado que el factor propuesto es 10^{-2} , el riesgo admisible viene dado por $10^{-4} \cdot 10^{-2} = 10^{-6}$, que coincide exactamente con el propuesto por Lowrance cuando el riesgo es prácticamente no reconocido), 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 (R_{exp}); se expresa en términos de número de muertes por túnel y año.
- Riesgo Social (R_{soc}); corresponde al número de individuos afectados por el incidente y/o accidente. Normalmente se expresa en términos de frecuencia acumulada $F = P(R_m > N)$ de que el número de muertes exceda un número N por unidad de túnel o kilómetro de túnel 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 de manera que a partir del riesgo de muerte por persona y año por exposición la actitud queda perfectamente determinada (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 (Vrijling et al., 1998). La formulación responde a la expresión $R_{ind} < \beta \cdot 10^{-4}$ (por año), en donde el factor β pondera el grado de relación del individuo con la infraestructura evaluada, es el que se detalla en la Tabla 3. (Obsérvese que si se considera un agente externo en la formulación de Vrijling, y dado que el factor propuesto es 10^{-2} , el riesgo admisible viene dado por $10^{-4} \cdot 10^{-2} = 10^{-6}$, que coincide exactamente con el propuesto por Lowrance cuando el riesgo es prácticamente no reconocido).



Tabla 2. Actitudes hacia el riesgo (Elaboración propia a partir de Lowrance, 1976)

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 (este es el caso de electrocución por rayo, etc)

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

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

Para el caso del riesgo social (R_{soc}), como ya se ha apuntado, la mayoría de los autores (Vrouwenvelder et al., 2001; Trojevic, 2003) coinciden en su expresión en términos de frecuencia acumulada $F = P(R_m > N)$ de que el número de muertes exceda un número N por unidad de túnel o kilómetro de túnel a lo largo del año (esta función es conocida como Curva F-N), siendo un ejemplo de la misma la de la Figura 2.

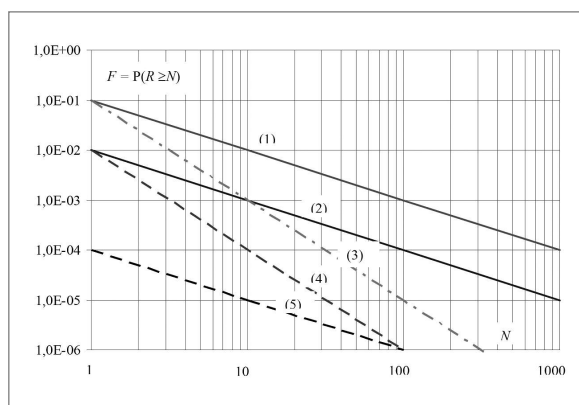


Figura 2. Límites para el riesgo social. (Vrouwenvelder et al. 2001, Trojevic, 2003)

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 $F < F_1 = A \cdot N^{-k}$. 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 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 (Knoflach et al., 2004). 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 el modelo holandés de evaluación de riesgo define el mismo concepto pero modificando las siglas del inglés, hablando de ALARA, que corresponde a As Low As Reasonably Achievable), 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)

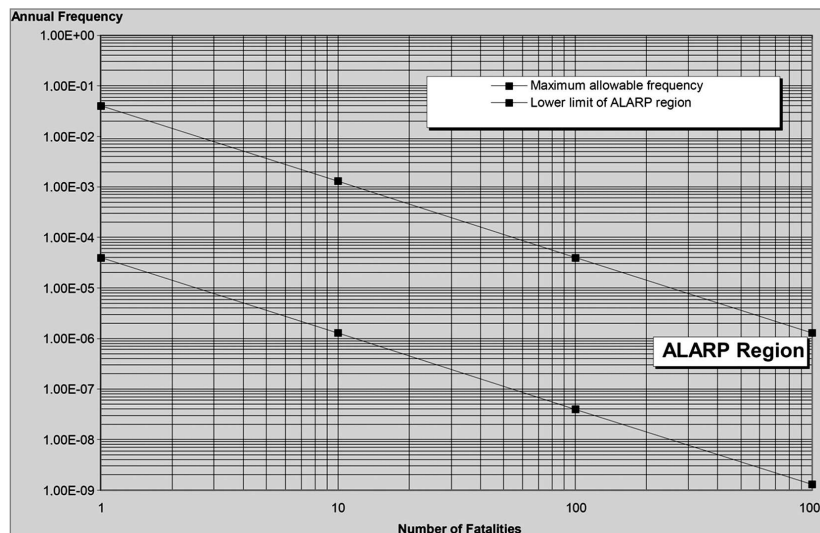


Figura 3. Delimitación de la Región ALARP

3. Evaluación del riesgo en túneles carreteros

La evaluación del riesgo ligado al transporte por carretera y en particular a lo largo de un tramo que discorra por túnel, puede ser abordada siguiendo de forma metodológica seis pasos: definición del sistema, identificación de posibles accidentes y/o incidentes, análisis de consecuencias y probabilidad de ocurrencia, presentación del riesgo y evaluación del mismo. Los aspectos tratados en cada una de las etapas se exponen de forma esquemática en la Figura 4.

En relación con la primera etapa, de identificación y caracterización del sistema, es una obligación que recae sobre el titular de la infraestructura y normalmente no reviste una complejidad importante existiendo hoy aplicaciones basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG), que facilitan la gestión y actualización de todos los datos que pueden ser de interés para el gestor del túnel.

Existen multitud de técnicas que permiten la identificación y cuantificación de posibles accidentes e incidentes (DARTS, 2002), tal y como puede verse en la Tabla 4.

Mediante Checklist se evalúan equipamientos, materiales o procedimientos. Los resultados facilitan e identifican áreas que requieren un estudio más detallado. Los resultados que se obtienen son a nivel cualitativo, normalmente vinculados a los procedimientos estándar. Los métodos "What if Analysis" se basan en la determinación e identificación de las consecuencias derivadas de un posible incidente o funcionamiento defectuoso del sistema.

El método HAZOP (Ramos, 1987) es uno de los más desarrollados y estructurados para la tratamiento de posibles peligros vinculados a infraestructuras del transporte. Trata de identificar todas las desviaciones que se puedan producir del funcionamiento correcto del sistema.

Posteriormente, mediante reuniones en donde, mediante el método de tormentas de ideas (del inglés brainstorming), se identifican junto a las desviaciones, las causas y las consecuencias, concluyéndose con la elaboración de una lista de palabras guía como documento de trabajo. Los resultados de la aplicación del método es un listado cualitativo que incluye:

- Identificación de peligros y problemas de explotación;
- Cambios recomendados relativos al diseño y a los procedimientos de conservación y explotación con objeto de mejorar los estándares de seguridad;
- Recomendaciones para la realización de nuevos estudios y seguimientos.

El método FMECA es que se implementa mediante la ordenación de los datos relativos a los equipamientos de túnel, los distintos modos de fallo, y el establecimiento de un "ranking" relativo de los efectos de cada uno de los fallos posibles (Clement et al., 2006).

El método FTA es un proceso deductivo de análisis que parte de la previa selección de un "suceso no deseado o evento que se pretende evitar", sea éste un accidente de gran magnitud (explosión, fuga, derrame, etc.) o sea un suceso de menor importancia (fallo de un sistema de cierre, etc.) para averiguar en ambos casos los orígenes de los mismos. La explotación de un árbol de fallos puede limitarse a un tratamiento "cualitativo" o acceder a un segundo nivel de análisis a través de la "cuantificación" cuando existen fuentes de datos relativas a las tasas de fallo de los distintos componentes. El método ETA, árbol de sucesos, es una sencilla técnica de análisis cualitativo y cuantitativo de riesgos que permite estudiar procesos secuenciales de hipotéticos accidentes a partir de sucesos iniciales indeseados, verificando así la efectividad de las medidas preventivas existentes. (McGrath, 1990).



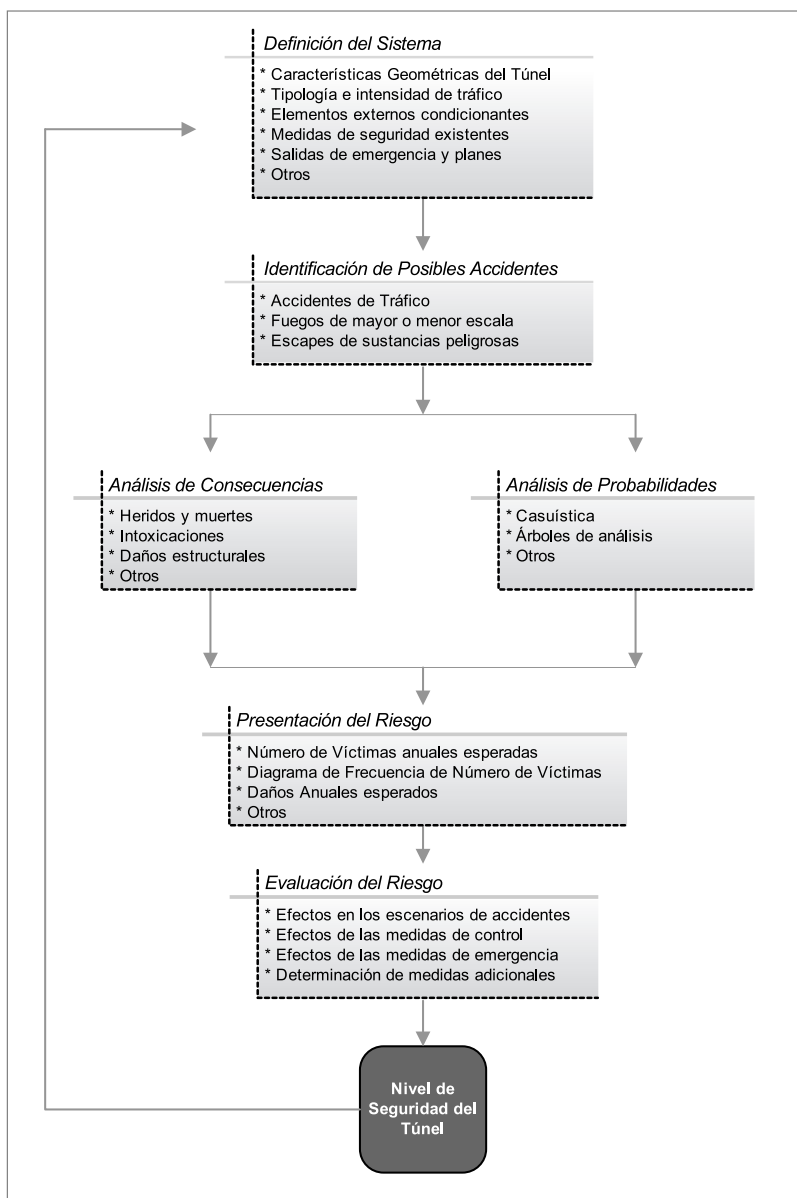


Figura 4. Principales pasos en la evaluación de riesgos en túneles. El análisis de probabilidades no aplica en los métodos de terministas. (Elaboración propia a partir de Molag, 2006; SafeT, 2005)

Tabla 4. Métodos de identificación de riesgos. (Elaboración propia a partir de DARTS, 2002)

Método (términos ingleses)	Método (traducción al castellano)
Checklist	Lista de Comprobación
“What if” Análisis	Análisis “Que ocurre si”
Hazard and Operability Analysis (HAZOP)	Peligro y Análisis de Operación
Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA)	Modo Fallo, Efectos y Análisis Crítico
Fault Tree Analysis (FTA)	Análisis mediante Árbol de Fallo
Event Tree Analysis (ETA)	Análisis mediante Árbol de Sucesos
Cause-consequence Analysis	Análisis Causa - Consecuencia

De todos estos modelos existen unos más adecuados en la fase de explotación y conservación de túneles carreteros (Molag, 2006). A ellos hay que sumar las inspecciones y auditorías de las infraestructuras e instalaciones, que su propia definición y objeto son de gran utilidad en dicha fase. La adecuación de métodos ha sido resumida en la Tabla 5.

Tabla 5. Idoneidad de métodos de identificación de riesgos. (-) No idóneo (*) Aplicable (**) Idóneo. (Elaboración propia a partir de Molag, 2006)

Método	Idoneidad
Checklist	(**)
Análisis "What if"	(-)
HAZOP	(-)
FMECA	(-)
FTA	(-)
ETA	(*)
Análisis Causas - Consecuencias	(-)
Auditorías	(**)
Inspecciones	(**)

En cuanto a los métodos de análisis de riesgo existen dos grandes líneas de trabajo. La determinista y la probabilística (ILF, 2004).

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:

- Modelo de efectos físicos;
- Modelos de daños;
- Modelos de evacuación.

Ejemplo de estos modelos desarrollados es el SIMULEX, es una aplicación informática para simulación de escapes en túneles de carreteras (Lynn Lee et al., 2003). Otros ejemplos de modelos son el SOLVENT+TunnEVAC (Lecointre et al., 2003) y el TNO-trainfire Model (Darts, 2002).

Con un enfoque más general destaca el Método MCA (del inglés Maximun Credible Accident Analysis). Este método procede al cálculo de los mayores daños y

efectos que un accidente puede producir en el túnel objeto del análisis. El accidente considerado en el caso de los túneles de carreteras se vincula al incidente de un transporte de mercancías peligrosas y/o inflamables analizando los efectos en términos de radiación, onda explosiva, intoxicación y fuego. Usando técnicas de modelización física de flujos, evaporación, etc., los efectos son concretan y definen. Finalmente se hace un análisis externo de los estándares de seguridad obteniéndose normalmente resultados conservadores (SafeT, 2005).

El problema de la aplicación de los métodos deterministas es que no consideran en ningún momento la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de los accidentes y/o incidentes que se modelizan, pudiendo estar trabajando en escenarios excesivamente conservadores. Es en este punto cuando se implementan y aplican los métodos probabilísticos, los cuales consideran por igual las consecuencias y la frecuencia de ocurrencia de los distintos escenarios (Charters, 2003). Esto aporta el valor añadido de considerar el nivel de riesgo para un rango de posibles escenarios analizando la efectividad de las medidas de seguridad implementadas así como los procedimientos de gestión. Igualmente son más adecuados cuando se trata de analizar la relación coste-beneficio, ya que permite la simulación del comportamiento del sistema frente a determinadas medidas de seguridad, las cuales pueden valorarse previamente en términos económicos (Worm et al., 1998; Stewart et al., 1997; Cassini et al., 2003).

Los modelos de análisis probabilístico se pueden estructurar en dos grandes partes: el estudio de probabilidades y las conservaciones. Para lograr articular de forma adecuada la primera 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 (SafeT, 2005). Por consiguiente parece razonable la utilización combinada de ambos modelos, consiguiendo con el análisis de escenarios desde el punto de vista determinista mejorar la información sobre las consecuencias de casos específicos de accidentes y/o accidentes que por su gravedad y/o frecuencia de ocurrencia deben ser estudiados de forma adecuada. Este hecho puede comprobarse en la Tabla 6, ya que son muchos los países que así lo aplican en sus metodologías de análisis de riesgo en túneles de carreteras.

Tabla 6. Revisión de diversas prácticas en relación con la evaluación del riesgo en túneles carreteros (Elaboración propia a partir de Molag et al., 2006)

	Canadá	Francia	Gran Bretaña	Dinamarca	Suecia	EEUU	España
Método Aplicado	Análisis cualitativo Análisis determinista	Análisis cualitativo	Análisis cualitativo Análisis determinista de escenarios	Análisis probabilística Análisis determinista de escenarios	Análisis probabilística Análisis determinista de escenarios	Análisis probabilística 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 transporte de mercancías peligrosas	Diseño de un sistema seguro Optimización de las respuestas a incidentes	Aumentar los estándares de seguridad a un precio razonable	Minimizas los daños humanos y materiales. Asegurar las mejores condiciones de evacuación	Minimizas los daños humanos y materiales. Asegurar las mejores condiciones de evacuación
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	Se utilizan diferentes modelos	Se aplican diferentes modelos	Se aplican diferentes modelos

4. Consideraciones finales

A lo largo del presente capítulo se ha dejado patente la sensibilidad social frente a catástrofes ocurridas en túneles carreteros. Frente a esta circunstancia existe en los últimos años una frenética actividad encaminada a mejorar los estándares de seguridad, no solo en túneles e infraestructuras que se construyan a partir de ahora sino en la actualización y mejora de los ya existentes. La magnitud del problema obliga a abordarlo de una forma rigurosa y científica. En el caso de los túneles carreteros en explotación es posible la utilización de instrumentos, herramientas, métodos y modelos suficientes y adecuados para el, la evaluación del riesgo, tanto probabilísticos como deterministas, siendo una utilización conjunta de ellos la solución que se está adoptando por la mayoría de los países que llevan a cabo análisis de riesgo en túneles.

Esta solución obliga al establecimiento de bases de datos históricas de incidentes y accidentes, lo más completas posibles, de manera que puedan llegar a implementarse de forma efectiva en todos los modelos que exijan de dicho análisis estadístico mejorándose la fiabilidad de los mismos.

5. Referencias

Cassini P., Hall R. y Pons P. (2003), Transport of Dangerous Goods Through Road Tunnels Quantitative Risk Assessment Model (Version 3.60), Reference Manual, OECD/PIARC/EU (CD-ROM), February 2003

Charters D. (2003), How can quantitative risk assessment further reduce the risk of tunnel fire accidents?. Fifth International conference on " Safety in Road and Rail Tunnels", p.139-147, 2003.

Clement L.W., Wong A., Tsang H.C. y Chung T.S. (2006), A methodology for availability assessment of tunnel designs. International Journal of Quality & Reliability Management. ISSN: 0265-671X. Volume: 23 Issue: 1 Page: 60 – 80, 2006

DARTS (2002), Identification and quantification of Hazards. Draft document DARTS/4.1. February 2002.

EU (2004), 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 (Diario Oficial de la Unión Europea L 167 de 30 de abril de 2004)

Holický M. y Šajtar L. (2006), Probabilistic risk assessment and optimization of road tunnels. In Safety and Reliability



- for managing Risk Guedes Soares and Zio (eds), Taylor and Francis Group, London, 2006, pp. 297-304.
- 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
- ISO 2394 (1998), General principles on reliability for structures.
- ISO 9000 (2000), Quality management systems – Fundamentals and vocabulary.
- ISO/IEC Guide 51 (1999), Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards.
- ISO/IEC Guide 73 (2002), Risk management – Vocabulary – Guidelines for use in standards.
- Jonkman S.N. y Vrijling J.K. (2003), Evaluation of tunnel safety and cost effectiveness of measures. Safety and Reliability. Bedford & van Gelder (eds). ISBN 90 5809 551 7.
- Knoflach H. y 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
- Knoflach H. y Pfaffenbichler P. C. (2004), A comparative risk analysis for selected Austrian tunnels. 2nd International Conference Tunnel safety and Ventilation. Graz, 2004.
- Lecointre J. y Pons P. (2002), Use of a coupled CFD/evacuation model: application to road tunnels. 5th International Conference on Safety in Road & Train Tunnels, p 481-489, 2003.
- Lowrance W. (1976), F. Of Acceptable Risk: Science and The Determination Of Safety. Los Altos, California, EE.UU. William Kaufman Inc., 1976.
- Lynn Lee S.L. y Bendelius A. (2003), Simulation of escape from road tunnels using SIMULEX. 5th International Conference on Safety in Road & Train Tunnels, p 411-420, 2003.
- Lacroix Didier (2001), The Mont-Blanc Tunnel Fire: What happened and what has been learned. I Curso sobre Incendios en Túneles. S.T.M.R.: Servicios Técnicos de Mecánica de Rocas. Madrid. 18 a 20 de Junio de 2001.
- Martínez G., Oliver J., Alegre J. y Ordóñez J. (2001), El Manual de Explotación de los Túneles Carreteros de Nivel I y II. Actas del XVII Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos. Editorial AEIPRO; Vol 1, pag 233. ISBN: 84-932146-0-4. Murcia, 2001.
- Martínez G. y Pellicer E. (2006), Organización y Gestión de Proyectos y Obras. Editorial McGraw-Hill Interamericana de España. Madrid, 2006
- McGrath P.F. (1990), Using Qualitative Methods to Manage Risk. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 29, 1990.
- Merchers R.E. (1999), Structural reliability analysis and prediction. John Wiley & Sons, 437 p. Chichester, 1999.
- Ministère de l'Interieur; Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (1999), Mission administrative d'enquête technique sur l'incendie survenu le 24 mars 1999 au tunnel routier du Mont Blanc. Rapport du 30 Juin 1999. 30 Juin.
- Molag M. (2001), Safety Cases for Road and Rail Tunnels in Europe, paper presented at the 3rd Annual Conference on Safety Cases, London 25/26 April 2001.
- Molag M. y Trijssenaar-Buhre I. (2006), Risk Assessment Guidelines for Tunnels. Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements. Second International Symposium, Lausanne, 2006.
- Naciones Unidas (2001), Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels. Final Report. Economics Commission for Europe. Inland Transport Committee. TRANS/AC.7/9. 10 December 2001. Naciones Unidas, 2001.
- NS 5814 (1991), Requirements for risk analysis. 1991.
- Persson M. (2002), "Quantitative Risk Analysis Procedure for the Fire Evacuation of a Road Tunnel – An Illustrative Example", Lund University, Sweden, Report 5096, 2002.
- 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.
- RAE - Real Academia Española (2007), Diccionario de la lengua española. 23^a Edición. Editorial Espasa-Calpe. Madrid, 2007.
- Ramos A. (1987), Procedimiento para el análisis de riesgos de operación. Método HAZOP. Publicación de la Comisión Autónoma de Seguridad e Higiene en el Trabajo de Industrias Químicas y Afines, Madrid, 1987
- Saccomanno F.F. y Cassidy K.(1994), "QRA and Decision-making in the Transportation of Dangerous Goods". Transportation Research Record 1430, Washington, D.C., 1994.
- SaFeT (2005), State of the art report on Safety Approach, Safety Management Systems and risk assessment. SaFeT Work package 1. D1.1 report, 2005.
- Stewart M.S. y Melchers R.E. (1997), Probabilistic risk assessment of engineering system. Chapman & Hall, London, 1997, 274 p.
- Trbojevic V. M. (2003), Development of Risk Criteria for Road Tunnels. 5th International Conference – Safety in Road and Rail Tunnels. Marseille, 2003.

UNECE (2001), United Nations Economic Commission for Europe. Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels. Final Report. Ad hoc Multidisciplinary Group of Experts on Safety in Tunnels. TRANS/AC.7/9, Diciembre de 2001.

United Nations Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee (2004), The Dutch Vision on Safety in Road and Rail Tunnels, informal document, available at http://www.unece.org/trans/doc/2004/ac7/Informal_document_Netherlands.pdf, accessed 1 March 2007.

Vrouwenvelder A., Holický M., Tanner C.P., Lovegrove D.R. y Canisius E.G. (2001), CIB Report. Publication 259. Risk assessment and risk communication in civil engineering. CIB, 2001.

Weger D. (2003), "Scenario Analysis for Road Tunnels", Safety and Reliability, ESREL, ISBN 90 5809 551 7, 2003.

Weger D. de, Kruiskamp M.M. y Hoeksma J. (2001), "Road tunnel risk assessment in the Netherlands - Tunprim: a spreadsheet model for the calculation of the risks in road tunnels", Safety & Reliability International Conference ESREL 2001.

Worm E.W. y Hoeksma J. (1998), The Westerschelde Tunnel: Development and application of an integrated safety philosophy, Safety in Road and Rail Tunnels, 3rd International Conference organised by University of Dundee and ITC Ltd., Nice, France, 1998.

