

ANÁLISIS DE RIESGOS EN TÚNELES: EJEMPLO APLICADO A LA AUTOPISTA AP-1

Lulen Iturriaga López

Javier Borja López

1. Introducción

El pasado 22 de mayo de 2009 se inauguraba al tráfico el último de los tramos de la autopista AP-1 Vitoria - Gasteiz - Eibar, con lo que se culmina un trazado total de unos 47km que constituye una de las más importantes infraestructuras de transporte desarrolladas entre Gipuzkoa y Araba e iniciada en el año 1999.

Por la singularidad de su trazado en la parte guipuzcoana, debido a la orografía del terreno, esta autopista discurre a través de numerosos túneles y viaductos, siguiendo el valle del río Deba desde el Norte (Eibar) hasta el Sur, en el límite con el territorio alavés. En concreto, la autopista dispone de once túneles en el tramo guipuzcoano y de uno en el tramo alavés siendo el más largo de ellos el túnel de Isuskitza con una longitud superior a los 3.000 metros y contando entre todos una longitud superior a los 14 km por sentido.

Dentro del marco de la redacción del Manual de Explotación de la autopista AP-1, y correspondiendo con el compromiso de BIDEGI con la seguridad de los usuarios que circulan por la autopista que gestiona, IDOM ha realizado un Estudio Específico de Riesgos con el fin de alcanzar los siguientes objetivos:

- Justificar la importancia de las instalaciones previstas.

- Comprobar la importancia de los tiempos de detección de la incidencia y de los tiempos de reacción de los usuarios y de los equipos de socorro.
- Comprobar la eficacia de los medios y la operativa en caso de incidente.

Con esta perspectiva, esta comunicación presenta los métodos y conclusiones obtenidos por IDOM en el desarrollo de dicho análisis de riesgos.

2. Marco normativo y metodológico

En el artículo 13 de la Directiva Europea 2004/54/CE sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras, se menciona la necesidad de que cada Estado garantice una metodología detallada y bien definida a escala nacional. A día de hoy, aún no existe una metodología estatal definida.

Asimismo, la AIPCR/PIARC, a través de sus distintas publicaciones, tampoco ha publicado ninguna guía metodológica internacional, exponiendo en cambio las distintas metodologías existentes en países como Austria, Francia o Italia y explicando para cada uno de ellos sus objetivos, sus respectivos campos de aplicación así como sus bondades y puntos débiles, así como distintas recomendaciones.

De esta manera, para la realización del presente análisis de riesgos, se ha decidido optar por una adaptación del método utilizado en Francia para la realización de los denominados “Estudios Específicos de Riesgos”, cuya metodología se explica en el documento *“Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers – Fascicule 4: Les études spécifiques de dangers (ESD)”* publicado en septiembre de 2.003 por el CETU (Centre d’études des tunnels) de Francia.

Este método está basado en la definición de una serie de escenarios a estudiar y, de acuerdo con lo expuesto por la AIPCR/PIARC, su flexibilidad permite utilizar diferentes modelos partiendo de unas hipótesis comunes utilizadas como marco del análisis.

3. Metodología empleada en el caso de la AP-1

Tal y como se ha comentado en el capítulo anterior, la metodología utilizada para el desarrollo del presente análisis de riesgos se basa en el método francés para la realización de éstos.

En el presente capítulo se explican todos los pasos aplicados al caso específico de la AP-1.

3.1. Definición de objetivos

El primer paso a realizar en todo análisis de riesgos, y quizás el más importante, es la definición de los objetivos que se quieren alcanzar con el mismo.

Un análisis de riesgos es una herramienta que se puede utilizar para responder a preguntas concretas, como puede ser estudiar la posibilidad de instalar un nuevo equipamiento o nueva tecnología, no previstos en la normativa, en sustitución de otros requeridos que aportan, a priori, menos seguridad a los usuarios del túnel. En el caso concreto de la AP1 los objetivos a alcanzar son los siguientes:

- Justificar la importancia del equipamiento instalado.
- Comprobar la importancia de los tiempos de detección de la incidencia, de los tiempos de reacción de los usuarios y de los equipos de socorro.
- Comprobar la eficacia de los medios y la operativa en caso de incidente.

De esta forma, todo el estudio se centra específicamente en dar respuesta a dichos objetivos.

3.2. Definición de escenarios a analizar

Tal y como se recoge en la guía metrológica del CETU, un escenario se define como un incidente iniciado por un **evento desencadenante** (Accidente, avería, etc...) situado dentro de un **contexto** (situación inicial y elementos agravantes).

De esta forma, la casuística seleccionada para el análisis de riesgos se basa generalmente en la elección de un túnel representativo (Isuskitza, Gallastegui, Zarimutz, San Martzial y Luko en el caso que nos ocupa), una serie de eventos desencadenantes (avería, accidente e incendio) y una serie de elementos agravantes (existencia de un accidente previo, retención, presencia de autobuses e incendio en un TMP).

Estudio estadístico y probabilístico

Para la decisión de qué casos concretamente estudiar, el primer paso es determinar la frecuencia teórica con la que se producen los distintos eventos desencadenantes, para ello se pueden utilizar dos fuentes de datos:

- Datos estadísticos de la propia explotación en caso de que existan.
- Datos probabilísticos “estándar” definidos en documentación de referencia.

En el caso concreto, dadas las características especiales de la autopista, se disponía de información estadística de accidentes y averías acerca de los tramos viarios que estaban

en servicio y se extrapolaron (en función de las longitudes de los tramos, del tráfico esperado, etc...) a los nuevos tramos viarios, de los que no se disponía de información.

Respecto a las probabilidades de incendio y accidentes menos frecuentes, al no existir, afortunadamente, ningún caso, se toman datos probabilísticos de las redes viarias francesa y estatal.

Matriz frecuencia-gravedad

De esta forma, con las frecuencias anteriores, se definió una matriz de frecuencia esperada de los incidentes frente a su hipotética gravedad esperada. Dicha matriz se representa en la siguiente figura:

	I - Menor daños materiales	II - Significativa Heridas leves	III - Crítica <5 muertos	IV - Catastrófica 5 a 10 muertos	V - Catastrofe grave >10 muertos
A <1 año Muy frecuente	-Avería de vehículo ligero -Avería de vehículo pesado -Accidente de vehículo ligero sin heridos	-Accidente de vehículo pesado			
B de 1 a 10 años Frecuente	-Avería de TMP -Avería de autobús	-Incendio de un vehículo ligero pequeño (BMW) -Incendio de un vehículo ligero grande (ISDAV)			
C de 10 a 100 años Ocasional		-Accidente de TMP -Accidente de autobús	-Incendio de vehículo pesado (30 MW)		
D de 100 a 1000 años Rara			-Accidente múltiple con incendio de un vehículo ligero (BMW)	-Accidente múltiple con incendio de un vehículo pesado (BMW)	-Incendio de un vehículo pesado con autobús en el túnel
E de 1.000 a 10.000 años Muy rara			-Incendio de vehículo pesado con carga de alto poder explosivo (100MW)	-Incendio de autobús (OMAV) -Incendio de TMP (200MW)	
F >10.000 años Sistemáticamente rara			-Accidente múltiple con incendio de un autobús	-Accidente múltiple con incendio de un TMP	-Accidente múltiple con incendio de un túnel

Figura 1: Matriz frecuencia-gravedad

Selección de escenarios

La matriz sirve como elemento gráfico para la clasificación de los incidentes y su jerarquización de acuerdo a su binomio frecuencia-gravedad. En base a estos datos, se estudian aquellos casos que se encuentran en la diagonal o en la mitad superior de la tabla, definiendo de esta forma hasta 11 escenarios. Estos escenarios son:

- Escenarios de vehículos ligeros:
 - Escenario A: Avería de un vehículo ligero en el túnel de Luko.
 - Escenario B: Accidente de un vehículo ligero en el túnel de San Martzial.
 - Escenario C: Incendio de un vehículo ligero (8 MW) en el túnel de Gallastegi
 - Escenario D: Incendio de un vehículo ligero (8 MW) en el túnel de Gallastegi, tras una colisión múltiple que ha generado una cola de 100 metros.
- Escenarios de vehículos pesados:
 - Escenario E: Avería de un vehículo pesado en el túnel de Eitza.
 - Escenario F: Accidente de un autobús en el túnel de Isuzkitza
 - Escenario G: Incendio de un vehículo pesado (100MW) en el túnel de Isuzkitza
 - Escenario H: Incendio de un vehículo pesado (30MW) en el túnel de Isuzkitza, con un autobús en el túnel.

- Escenarios de TMP:
 - Escenario I: Incendio de un TMP (200MW) en el túnel de Isuzkitza.
 - Escenario J: Incendio de un TMP (200MW) en el túnel de Isuzkitza, tras una colisión múltiple que ha generado una cola de 100 metros.
- Otros:
 - Escenario K: Incendio de un vehículo pesado (30MW) en el túnel de Zarimutz, suponiendo una fuerte contrapresión con avería de un ventilador en el tubo con pendiente negativa.

3.3. Análisis de escenarios

Cada uno de los escenarios anteriores se analiza de acuerdo a los siguientes pasos:

- Definición de condiciones iniciales.
- Cálculo de la evolución del incendio (en su caso).
- Evolución de la evacuación de las personas (en su caso).
- Estudio del escenario y análisis de las consecuencias.

Definición de condiciones iniciales

En este paso se definen las condiciones iniciales del incidente:

- Condiciones meteorológicas y de ventilación iniciales.
- Ubicación inicial del incidente y del personal de campo de la explotación.
- Tráfico inicial.
- Potencia del fuego.

Tal y como se recomienda en la guía metodológica, se ha intentado no analizar los resultados desde la peor perspectiva posible, sino más bien enfocando el análisis hacia la diversidad de condiciones iniciales, intentando recoger el máximo número de situaciones posibles.

Por ejemplo, se ha considerado que las condiciones ambientales en algunos casos favorecen a la pauta de ventilación prevista, mientras que en otros casos son contrarias a la misma. De esta forma se puede estudiar la sensibilidad del desarrollo de los escenarios ante la variación de las condiciones iniciales.

Asimismo, se han tomado las potencias de incendio, y su evolución temporal, según se estandariza en la guía metodológica del CETU anteriormente mencionada. En la siguiente figura se puede observar la curva de evolución del incendio para un caso de incendio de un vehículo cisterna con 20 Tm de combustible:

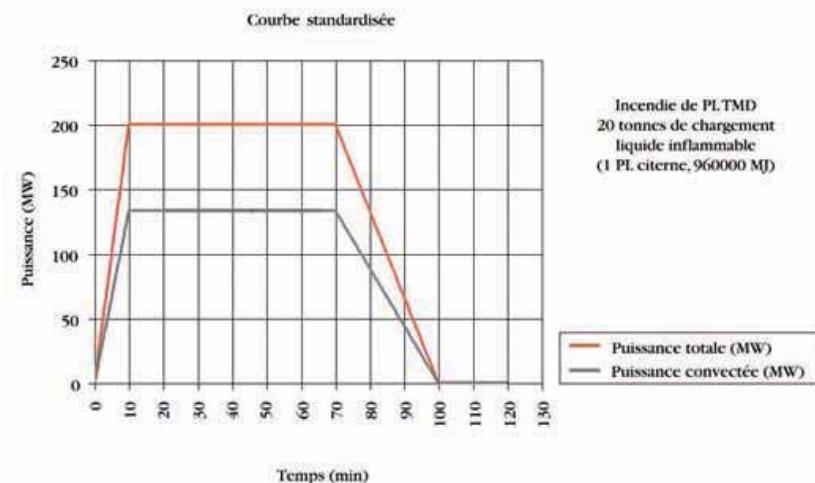


Figura 2: Curva de evolución de incendio de 200 MW de potencia (fuente: referencia 2)

Cálculo de la evolución de los humos

Para realizar un estudio pormenorizado de cada uno de los escenarios, es necesario disponer de información detallada de la evolución de los humos, temperatura y contaminantes a lo largo de toda la extensión del incidente, tanto física como temporal.

Para la obtención de dicha información se utiliza la herramienta SOLVENT, diseñada a partir de los resultados obtenidos a raíz de los ensayos realizados en el “Memorial Tunnel” de Estados Unidos. Esta herramienta es el resultado de la denominada fase IV de dichos ensayos, la cual tenía como objetivo el desarrollo y la validación de una herramienta CFD (Computational Fluid Dynamics) específica para el análisis de la evolución de incendios en túneles.

En las siguientes figuras se pueden observar, en $t=0$, 80, 210, 450 y 630 s, la evolución del campo de velocidad y la opacidad en el centro de la calzada del túnel coincidiendo con el escenario K.

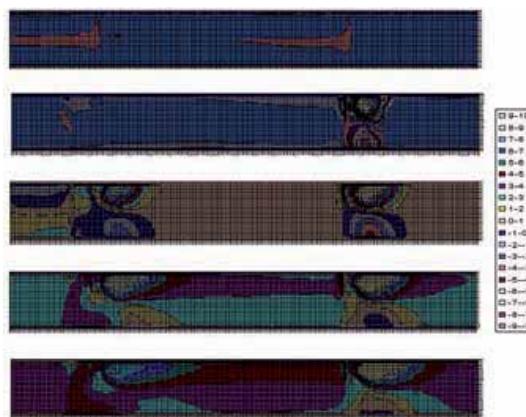


Figura 3: Evolución del campo de velocidades en el túnel

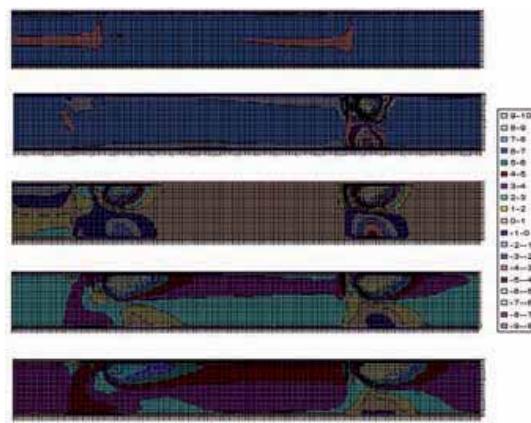


Figura 4: Evolución de la opacidad en el túnel

En base la evolución de las variables físicas anteriores, en cada momento se definen 5 zonas denominadas de peligro:

- **Zona letal:** se define como zona letal aquella en la que en un plazo relativamente corto de tiempo, las condiciones pudieran llevar a la defunción de los usuarios.
- **Zona peligrosa:** se define como zona peligrosa aquella en la que las condiciones de supervivencia son mejores que en la anterior, no obstante, la estancia prolongada en dicha zona puede causar la muerte o heridas graves en los usuarios.
- **Zona incapacitante:** se define como zona incapacitante aquella en la que, si bien los riesgos de defunción o de resultar herido grave no son muy altos en un periodo razonable de tiempo, la capacidad de los usuarios se ve mermada por las condiciones ambientales.
- **Zona no incapacitante:** se define como zona no incapacitante aquella en la que, si bien la zona no está exenta de peligros, se considera que las condiciones no presentan un riesgo inmediato ni impiden la evacuación de los usuarios.
- **Zona segura:** se define como zona segura aquella en la que los usuarios pueden esperar a ser evacuados o se pueden considerar exentos de riesgos a corto plazo, de tal forma que se considera que su evacuación ha concluido (a efectos de evaluación de daños sufridos). Se consideran zonas seguras los siguientes:
 - Galerías de evacuación (sin contar la galería próxima al incendio en caso de que ésta esté muy cerca)
 - Bocas del túnel.

Evolución de la evacuación de las personas

En el presente análisis, se ha optado por realizar los cálculos de evacuación mediante dos procedimientos distintos:

- **Mediante hipótesis sencillas:** tal y como expone el CETU, se toman hipótesis sencillas de evacuación en las que la velocidad de las personas depende directamente de las condiciones de la zona de peligro en la que se encuentran:
 - Parada de vehículos e inicio de evacuación:
 - Cuando ven una señal PMV indicando que paren a la derecha y apaguen el motor.
 - Cuando ven otros vehículos detenidos.
 - Cuando ven personas evacuando.
 - Ocupación media de los vehículos:
 - Vehículos ligeros: 1,5 personas.
 - Vehículos pesados: 1,5 persona.
 - Autobuses: 50 personas.
 - Tiempo de reacción de los usuarios y evacuación de su vehículo:
 - Vehículos ligeros: 90 s.
 - Vehículos pesados: 90 s.
 - Autobuses: 300 s.
 - Velocidad de evacuación de las personas:
 - Zona letal (visibilidad muy reducida o nula): 0,3 m/s.
 - Zona peligrosa (visibilidad reducida): 0,5 m/s.
 - Zona incapacitante (capacidad de los usuarios mermada por las condiciones): 0,7 m/s.
 - Zona no incapacitante o evacuación conducida por agentes: 1 m/s.
 - En este caso se toma siempre una dirección de evacuación contraria la del incendio.
- Mediante la utilización de un software específico de simulación de evacuación “EXODUS”, el cual es capaz de modelizar de una forma mucho más realista las condiciones de evacuación de las personas en un escenario de incendio. En las siguientes imágenes se puede observar algunos ejemplos aplicados al presente análisis:

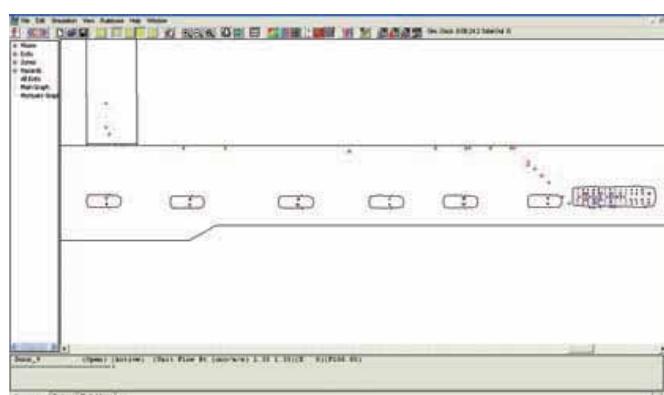


Figura 5: Evacuación de los usuarios de un autobús

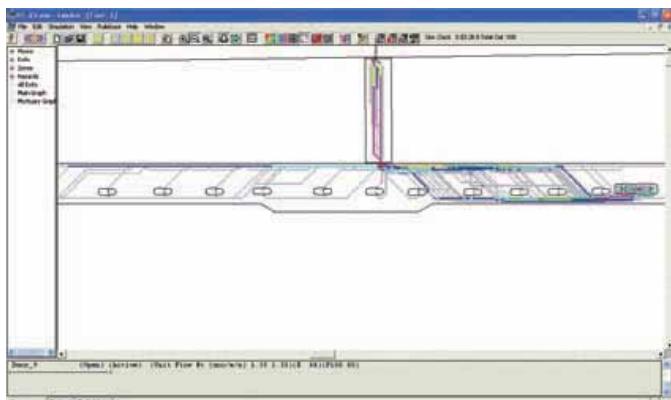


Figura 6: Mapa de densidad de rutas de evacuación

Análisis del escenario

El análisis del escenario se realiza desde dos puntos de vista:

- Calcular la “gravedad” del caso estudiado desde el punto de vista de número de bajas y de heridos teóricos a resultas del incidente.
- Estimar los tiempos de actuación de los intervinientes en el escenario, los tiempos de evacuación de las personas y los tiempos de resolución del incidente.

Determinación de la gravedad

Para determinar la gravedad de los casos de incendio (obviamente no tiene mucho sentido para el caso de averías o accidentes), se calcula la probabilidad de que una persona concreta resulte herida o fallezca como consecuencia de las dosis recibidas de radiación térmica y de monóxido de carbono de la nube de humo resultante del incendio.

Para ello se han utilizado los métodos descritos por el Ministerio de Medioambiente holandés en su “Green Book”, en concreto el denominado “Método Probit”. Este método se basa en la utilización de modelos estadísticos para calcular, en base a las dosis recibidas de ciertas sustancias nocivas, como pueden ser la radiación o el monóxido de carbono, para determinar las probabilidades de fallecimiento o de sufrir heridas graves (como quemaduras de 2º grado en el caso de radiación). El valor de la "variable Probit" se determina por la expresión:

$$PR = K_1 + K_2 \cdot \ln\left(\int_0^T c^n \cdot dt\right)$$

dónde la variable c representa el fenómeno estudiado (radiación térmica en W/m² o concentración de CO en ppm en este caso) mientras que K_1 , K_2 y n son unas constantes dependientes de fenómeno concreto estudiado. A su vez, la variable probit se

relaciona con la probabilidad a través de la “función de error” de la siguiente manera:

$$P = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}} \right] \right\}$$

definiéndose la función de error de la siguiente manera:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Hay que precisar que el cálculo de heridos y/o fallecidos se refiere a aquellos causados por efecto del incendio, no contabilizándose los efectos de otras posibles causas, notablemente los que se podrían dar por efecto directo de accidentes u otras situaciones.

Los tiempos de evacuación y exposición a las zonas de peligro se representan en gráficas que aúnan ambos elementos como la que se presenta a continuación.

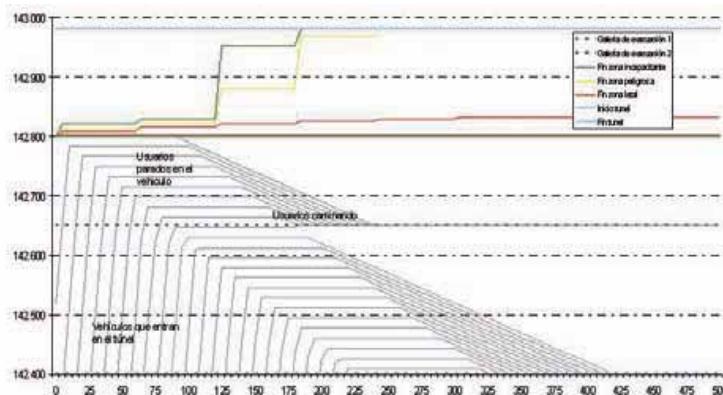


Figura 7: Evolución de las personas y las zonas de riesgo

Es importante resaltar que pese a que los resultados de cada incidente se estiman en número de fallecidos y heridos, los resultados obtenidos se basan en métodos teóricos y estimaciones, de tal forma que no se pueden tomar nunca al pie de la letra. Su fin es determinar la gravedad esperada de una situación, con fines comparativos de tal forma que se puedan alcanzar los objetivos expuestos anteriormente.

Tiempos de actuación

El estudio de los tiempos de actuación se representa en diagramas de Gantt con objeto de observar de forma visual los tiempos de cada una de las actuaciones, así como el tiempo de intervención de los agentes implicados.

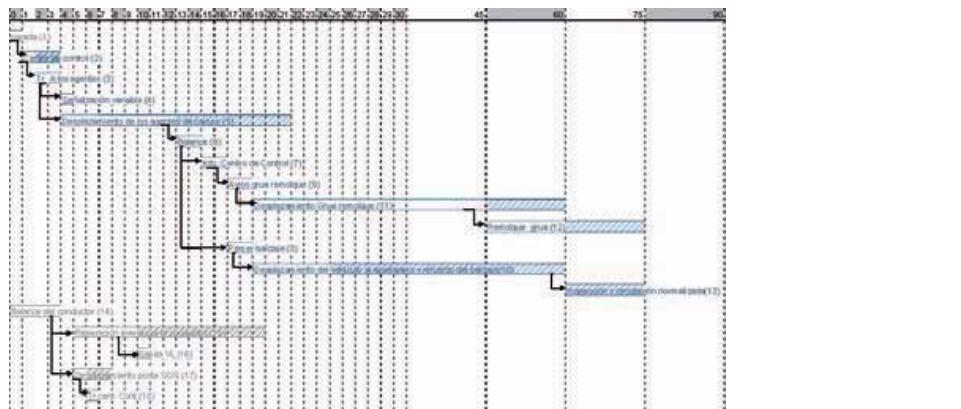


Figura 8: Evolución prevista del incidente

Este estudio es especialmente importante para determinar el tiempo medio (color plano en el gráfico anterior) y el máximo (color sombreado) de resolución de incidentes como averías y accidentes, puesto que constituyen situaciones accidentógenas. Asimismo permite evaluar los tiempos de intervención de los equipos de primera intervención y agentes de campo puesto que pueden llegar a controlar un fuego en sus etapas iniciales o, en su caso, ayudar en la evacuación de las personas, agilizándola y disminuyendo de esta manera las consecuencias del incidente.

4. Conclusiones

Tal y como se ha podido apreciar, un análisis de riesgos es una potente herramienta que permite la determinación de la gravedad teórica de incidentes hipotéticos, generalmente con fines comparativos. De esta forma, mediante el estudio de cada uno de los escenarios anteriormente expuestos, se puede estimar la gravedad teórica resultante, contrastándola con la esperada a priori y dando una imagen visual y numérica de la importancia de las instalaciones de seguridad.

Al incorporar un estudio de evacuación mediante análisis software, permite realizar una estimación del tiempo de evacuación de las instalaciones, así como estudiar posibles puntos “negros” en los caminos de evacuación.

Asimismo, es una herramienta igualmente poderosa para observar los tiempos esperados y máximos de resolución de incidentes que puedan generar otros de un volumen y gravedad mucho mayores, como accidentes leves sin daños personales o averías. Igualmente permite estimar si los tiempos de intervención de cada uno de los actores implicados están dentro de los márgenes esperados, y cuáles son los casos en los cuales la velocidad de actuación se puede ver condicionada por las características concretas de la vía en cuestión.

Por último, tal y como se ha querido reflejar en el presente capítulo, un análisis de riesgos es una herramienta más de la explotación que tiene como objeto:

- Dar respuestas a las preguntas planteadas acerca de la seguridad de las instalaciones.
- Sacar conclusiones que puedan derivar en mejoras de las condiciones de seguridad de los usuarios.

5. Bibliografía

1. Analyse des risques pour les tunnels routiers; Comité technique AIPCR/PIARC C3.3 Exploitation des tunnels routiers; 2008.
2. Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers – Fascicule 4: Les études spécifiques des dangers; CETU; Septiembre de 2.003.
3. Directiva Europea 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 trans-europea de carreteras.
4. Maîtrise des incendies et des fumées dans les tunnels routiers; Comité AIPCR/PIARC de túneles carreteros C5; 1999.
5. Methoden voor het bepalen van mogelijke schade: Aan mensen en goederen door het vrijkomen van gevaarlijke stoffen – PGS 1; Ministerio de Vivienda, Ordenación del Territorio y Medioambiente de Holanda; 2005.
6. MTFVTP – Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program – Phase IV Report; Bechtel/Parsons & Brinkerhoff; 1999.
7. Estudio de accidentes; Dirección General de Carreteras; 2006.
8. Anuario estadístico de accidentes en las carreteras del Estado; Dirección General de Carreteras; 2006.