

5. MÉTODO DE MERCANCÍAS PELIGROSAS

5.1 INTRODUCCIÓN

En lo referente al transporte de mercancías peligrosas (TMP) por el interior de un túnel de carretera, el Real Decreto 635/2006 en el punto 3.7 de su anexo I establece que dentro del ámbito de esta disposición estará prohibido su tránsito por los mismos, con excepción de aquellos túneles incluidos dentro de los itinerarios recomendados para el transporte de mercancías peligrosas (Red de Interés de Mercancías Peligrosas o RIMP), salvo que se demuestre que no hay alternativa más favorable mediante un análisis de riesgo. En los túneles pertenecientes a la RIMP, pese a no ser preceptivo, es muy recomendable realizar un análisis de riesgo del paso de TMP por los mismos.

Es por ello por lo que se expone a continuación el Método de Mercancías Peligrosas, como parte de la Metodología de Análisis de Riesgo en Túneles de la RCE, desarrollado con el fin de permitir evaluar el nivel de riesgo de un túnel de carretera, en fase de proyecto o de explotación, provocado principalmente por el paso de vehículos pesados que transportan mercancías peligrosas (MP).

El Método de Mercancías Peligrosas para el análisis de riesgo en túneles de carretera se basa en un modelo cuantitativo de evaluación del riesgo, desarrollado por la OECD/OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) y la PIARC/AIPCR (Asociación Mundial de la Carretera), que se denomina DG QRAM (*“Dangerous Goods Quantitative Risk Assessment Model”* – Modelo Cuantitativo de Evaluación del Riesgo de Mercancías Peligrosas), al que se han incorporado una serie de particularizaciones para tener en cuenta las características propias de los túneles de carretera españoles.

El DG QRAM basa su análisis en el cálculo del denominado riesgo social del túnel para cada uno de los escenarios analizados, que se define como el número de individuos afectados por el incidente y/o accidente, expresándose normalmente en términos de frecuencia acumulada (F) de que el número de muertes exceda un determinado número (N) por unidad de longitud de túnel (normalmente por km) a lo largo de un año. De esta forma, el riesgo social se obtiene para cada escenario en función de:

- Probabilidad o frecuencia de ocurrencia del escenario (F)

- Consecuencias del escenario, medida por el número de víctimas (N)

Esto da como resultado una serie de curvas denominadas curvas F/N (frecuencia / nº de víctimas posibles), que muestran la relación entre la frecuencia del accidente y la severidad del mismo.

5.2 MODELO DG QRAM

5.2.1 PROCESO DE APLICACIÓN DEL MODELO

Este modelo se basa en la utilización de una serie de datos que, por una parte son proporcionados por el técnico que realiza el análisis de riesgo y, por otra son facilitados por el propio modelo.

Para analizar el riesgo en un túnel empleando el modelo DG QRAM se deberá en primer lugar introducir los datos de entrada necesarios ("*input data*") para particularizar el estudio. Los datos que se deben introducir se pueden agrupar en aquellos que caracterizan el túnel (geometría, estructura, sistema de ventilación forzada, sistema de drenaje, etc.), los relativos al tráfico (intensidad y composición), datos de accidentalidad y otros datos como medidas de mitigación del riesgo, etc. En esta primera fase se deberán seleccionar los escenarios que se van a analizar tal como se describe más adelante.

Una vez definidos los datos de entrada y los escenarios a considerar, se aplicará el modelo DG QRAM, del que se obtendrán una serie de curvas F/N para cada uno de los escenarios contemplados en el análisis de riesgo. Estas curvas F/N se compararán con los criterios de aceptación del riesgo establecidos para el Método de Mercancías Peligrosas, comprobando así si es asumible el riesgo que supone el tránsito de MP por el interior del túnel, si son necesarias medidas compensatorias adicionales o si no es asumible el riesgo del TMP, teniendo que prohibirse su circulación por el túnel, lo que implicaría la búsqueda de un itinerario alternativo más adecuado para el paso de las MP o, en su caso, la aplicación de medidas excepcionales como la circulación aislada, en convoyes o en determinadas franjas horarias exclusivas.

5.2.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo DG QRAM permite determinar principalmente el riesgo social asociado a una serie de escenarios en los que se ven involucrados los TMP.

El procedimiento empleado para aplicar el modelo consiste fundamentalmente en el análisis de un determinado número de escenarios en los que se implican una serie de MP, estudiando simultáneamente sus consecuencias y probabilidad de ocurrencia, lo que permitirá evaluar cuantitativamente el citado riesgo social.

5.2.2.1 Análisis de los escenarios

Los escenarios a analizar son aquellos que se consideran más representativos o con mayor probabilidad de ocurrencia en el conjunto de túneles de la Red de Carreteras del Estado.

Se han determinado teniendo presentes las siguientes premisas:

- En el accidente analizado se vea implicado al menos un vehículo de transporte pesado con capacidad de originar un incendio de media o elevada potencia (20 ó 100 MW).
- Se analicen además los escenarios que impliquen la presencia de determinados vehículos de mercancías peligrosas con un tipo de carga representativo del conjunto de los transportes por la RCE.

A este respecto hay que poner de manifiesto que la clasificación de los distintos tipos de transporte de mercancías peligrosas y la posibilidad de transportes combinados de diferentes cargas y características de las mismas, ocasiona un gran número posible de escenarios teóricos recogidos en las clasificaciones realizadas en el ADR (*“European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road”* – Acuerdo europeo para el transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera).

Se establecen como obligatorios en todo análisis de riesgo siguiendo este método el estudio de los escenarios 1 a 4 y el escenario 9, definidos a continuación siguiendo la nomenclatura del modelo DG QRAM, pues presentan unos índices de probabilidad de ocurrencia más elevados. El resto de escenarios contemplados por el modelo DG QRAM

deberán estudiarse en los casos en que por el túnel analizado discurran vehículos que transporten las mercancías que contempla cada escenario. Será por tanto deber del analista determinar qué escenarios se analizarán teniendo en cuenta el tipo de tráfico de mercancías peligrosas que circula o circulará por el túnel y, considerando en todo caso los escenarios definidos como obligatorios. En cualquier caso, la autoridad administrativa podrá exigir el estudio de escenarios en el análisis de riesgo que no hubieran sido estudiados inicialmente por el analista.

Escenarios 1 y 2 (E1 y E2)

Accidente de un vehículo pesado (VP) sin intervención de mercancías peligrosas

1. Accidente de un VP que provoque un fuego de hasta 20 MW de potencia en los que no se vea implicado ningún vehículo de transporte de mercancías peligrosas o inflamables a excepción de la contenida en los propios depósitos de combustible.
2. Accidente de uno o más vehículos pesados que provoquen un fuego de hasta 100 MW de potencia en los que no se vea implicado ningún vehículo de transporte de mercancías peligrosas o inflamables.

Escenarios 3, 4 y 5 (E3, E4 y E9)

Accidente de VP cuyo transporte incluye mercancías peligrosas

3. Explosión tipo BLEVE (*“Boiling Liquid Expanding Vapour Explosión”*) – Explosión de vapores en expansión de un líquido en ebullición) de GLP (Gases Licuados del Petróleo) transportado en cilindros de 50 kg de capacidad.
4. Incendio de un charco de carburante derramado de una cisterna de 28 toneladas de capacidad con una brecha de 100 mm que provoca una pérdida del combustible de 20'6 kg/s.
9. Incendio en antorcha de GLP transportado a granel en cisterna de 18 toneladas con una brecha de 50 mm y una fuga de 36 kg/s.

Otros escenarios posibles (E5 a E8 y E10 a E13)

Tal y como se ha comentado, existen otros escenarios posibles para este tipo de transporte pero con unas frecuencias de ocurrencia, según las estadísticas europeas, bastante menores. No se establece como obligatorio el análisis de estos escenarios de menor frecuencia de ocurrencia si bien, a juicio del autor del análisis de riesgo o a exigencia de la autoridad administrativa, puede ser necesario analizar estos escenarios u otros que, en cada caso, se pueda estimar conveniente:

5. Explosión del tipo VCE (*"Vapor Cloud Explosion"* – Explosión de nube de vapor) de carburante transportado en cisterna de 28 toneladas con una brecha de 100 mm por la que se salen 20'6 kg/s de combustible.
6. Vertido de cloro transportado en una cisterna de 20 toneladas de capacidad por una brecha de 50 mm y con una pérdida de 20'6 kg/s.
7. Explosión de tipo BLEVE de una cisterna de transporte a granel de GLP de 18 toneladas.
8. Explosión del tipo VCE de una cisterna de transporte a granel de GLP con una brecha de 50 mm y una pérdida de combustible de 36 kg/s.
10. Vertido de amoníaco transportado en una cisterna de 20 toneladas de capacidad con una grieta de 50 mm y una pérdida de 36 kg/s.
11. Vertido de acroleína transportada a granel en un tanque de 25 toneladas de capacidad por una brecha de 100 mm y con una pérdida de 24'8 kg/s.
12. Vertido de acroleína transportada en una cisterna de 100 litros por una brecha de 4 mm y con una pérdida de 0'02 l/s.
13. Explosión tipo BLEVE de un gas no inflamable (CO₂) transportado en una cisterna de 20 toneladas de capacidad.

5.2.2.2 Descripción de los escenarios

Vehículos pesados sin mercancías peligrosas (E1 y E2)

En estos escenarios, las cuestiones que se plantean inicialmente son las siguientes:

- Potencia que el incendio puede llegar a alcanzar en función de la inflamabilidad de la sustancia que se esté quemando, de su capacidad térmica y de su carga.
- La probabilidad de ocurrencia de cada uno de los incendios tipo que pueden llegar a desarrollarse.

Atendiendo a su poder calorífico, se pueden considerar dos tipos de vehículos:

- Vehículos pesados no de mercancías peligrosas parcialmente cargados (o vehículos pesados que contengan mercancías no inflamables) que podrían conducir a un **fuego de aproximadamente 20 MW (E1)**.
- Vehículos pesados no de mercancías peligrosas cargados con materiales inflamables que podrían conducir a un **fuego de 100 MW (E2)**.

Transporte de GLP en cilindros (50 kg) (E3)

Con respecto a esta clase de mercancías peligrosas y según condiciones, el escenario más probable que conduce a consecuencias importantes es una BLEVE (explosión de vapores en expansión de un líquido en ebullición)

Una explosión tipo BLEVE comprende dos fases en su desarrollo: una expansión física una vez roto el recipiente (efectos de sobrepresión y generación de misiles) y una reacción química si la mercancía peligrosa es inflamable. Ambas consecuencias se deben tener presentes en el modelo de cálculo.

Para evaluar los efectos de la BLEVE hay dos parámetros de gran importancia:

- La masa implicada en el fenómeno.
- La duración de la bola de fuego, que tiene influencia directa en el tiempo de exposición de las personas en las cercanías.

Para fijar el escenario 3, se calculará:

- BLEVE de un único cilindro que contiene 50 kg de propano.

- BLEVEs sucesivos de 3 cilindros. Los efectos en este caso son del mismo orden de magnitud, por ello en una simple aproximación se puede considerar para el escenario 3, el BLEVE de un simple cilindro.

Las consideraciones físicas precedentes permiten establecer algún supuesto sobre esos parámetros:

- La masa del GLP a considerar en el escenario 3 habrá de ser toda la masa de un único cilindro (puesto que BLEVEs simultáneos son muy improbables).
- La duración total de la bola de fuego no puede exceder a la duración de dos o tres bolas de fuego que pudieran ocurrir sucesivamente (una secuencia larga de sucesivos BLEVEs es muy improbable).

Derrame por brecha en tanque de gasolina (E4)

La probabilidad de incendio para este tipo de mercancía peligrosa es importante. Puede comenzar con un derrame de líquido sobre la calzada, por medio de una brecha en el tanque a consecuencia de un accidente o con el tanque aún intacto. En ese último caso, un incendio fuera del tanque lo debilitaría y, posiblemente abriría una brecha pudiendo el fuego llegar a la carga.

Si se ha agujereado el tanque, el líquido se derramará y producirá un charco, que será parcialmente absorbido por el sistema de drenaje. Con el resto de combustible se plantean dos posibilidades:

- Que se produzca la ignición del charco derramado

Entonces, es probable que se genere un incendio muy importante. En realidad, suponiendo un rango de posibles tamaños de rotura, poderes de radiación relativos comparados con los poderes convectivos del fuego, el poder calorífico total del incendio de un gran derrame de gasolina probablemente no será menor que 100 MW y, en algún caso podría exceder de 1.000 MW (E4).

En un túnel, existe un número limitado de parámetros que pueden tener influencia en la extensión del charco. Esos son, principalmente, gradiente, inclinación y tasa de drenaje del túnel, que deben ser considerados en el modelo, para calcular directamente el poder calorífico del fuego, conociendo las características del túnel.

- Que no haya ignición del combustible derramado

Si no hay una ignición inicial, se vaporizará y se producirá una nube de vapor.

Este segundo supuesto no se contempla como obligatorio en el presente método de análisis de riesgo.

Si la temperatura de ignición de la MP está por debajo de la temperatura ambiente se desarrollará una atmósfera inflamable y ocurriría una ENV tan pronto como una fuente de ignición aparezca en la atmósfera inflamable.

VCE (“Vapor Cloud Explosion” – Explosión de nube de vapor) de carburante (E5)

Si se vierte carburante por una brecha en la cisterna que lo transporta, si no se produce la ignición del mismo se producirá una nube de vapor. Se producirá una VCE en cuanto una fuente de ignición entre en contacto con esta atmósfera inflamable.

Vertido de cloro (E6)

Se considera una fuga continua de cloro por una brecha producida en la cisterna que lo transporta.

GLP a granel (E7, E8 y E9)

Con respecto al transporte de GLP (Gases Licuados del Petróleo) a granel, se han considerado tres escenarios por sus graves consecuencias, que se describen a continuación:

- **BLEVE.** Descrito en el Escenario 3 (E7).
- **VCE** (“Vapor Cloud Explosion” – Explosión de nube de vapor) posterior a una fuga continúa a través de una brecha o de un diámetro dado (E8).
- **Incendio en antorcha** posterior a una liberación continua a través de una brecha de un diámetro dado (E9).

Vertido de amoníaco (E10)

El amoníaco es un gas incoloro de olor muy penetrante. Además, es una sustancia corrosiva y los efectos principales de la exposición al amoníaco ocurren en el sitio de

contacto directo (por ejemplo la piel, los ojos, la boca y los sistemas respiratorio y digestivo).

El escenario que se presenta consiste en una fuga continua de amoníaco de un tanque de 20 toneladas a través de una brecha de 50 mm de diámetro. Esto producirá un caudal másico de 36 kg/s durante 9'3 minutos.

Vertido de acroleína (E11 y E12)

La acroleína (IUPAC: 2-propenal) es un líquido incoloro o amarillo de olor desagradable. Se disuelve fácilmente en agua y se evapora rápidamente cuando se calienta. También se inflama fácilmente.

La exposición a la acroleína provoca daños en las vías respiratorias: produce ardor de la nariz y la garganta y, puede dañar los pulmones. El humo de cigarrillo y los gases del tubo de escape de automóviles, contienen acroleína.

En lo que respecta al transporte de materiales tóxicos, los sistemas de drenaje aplicados en los túneles no son efectivos sobre las consecuencias de la liberación de un gas tóxico. Por el contrario, si son eficientes en el caso de derrame de líquidos tóxicos.

- Vertido de acroleína transportada a granel (E11)
- Vertido de acroleína transportada en cilindros (E12)

Explosión BLEVE de un gas no inflamable CO₂ (E13)

Las sustancias que se consideran como mercancías peligrosas se pueden clasificar en varias categorías:

- Gases inflamables
- Gases tóxicos
- Gases ni inflamables ni tóxicos (oxidantes o no)

Todas esas sustancias pueden conducirnos hasta una BLEVE, pero por diferentes caminos.

En el caso de producirse una BLEVE se generan tanto efectos térmicos (bolas de fuego) como efectos de presión.

En general, cuando se calculan los efectos en las personas, los efectos térmicos son predominantes por lo que en principio podría ser apropiado considerar solamente un escenario de una BLEVE con un producto inflamable. Sin embargo, al considerar los riesgos sobre las estructuras de los túneles, se deben tener presentes los efectos de presión en la estructura del túnel.

Se considera por lo tanto posible tener presente un escenario especial en el que se pueda producir una **BLEVE sin mercancías inflamables** (E13).

Para este caso se ha considerado un producto neutro respecto a la oxidación, toxicidad e inflamabilidad: dióxido de carbono presurizado y refrigerado (CO₂).

Cabe puntualizar finalmente que el CO₂ presenta otros efectos letales ya que al mezclarse con el aire reduce la concentración de oxígeno. Sin embargo, este riesgo se ha considerado despreciable comparado con los efectos destructivos de la presión de la BLEVE y, por lo tanto no se tendrá presente en la modelización.

Por último, se incluye una tabla resumen con todos los escenarios de accidente descritos anteriormente:

| Escenario | Descripción | Capacidad de cisterna | Tamaño de la brecha (mm) | Caudal de la fuga (kg/s) |
|-----------|------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| E1 | Fuego de 20 MW con VP | - | - | - |
| E2 | Fuego 100 MW con VP | - | - | - |
| E3 | BLEVE de GLP en cilindros | 50 kg | - | - |
| E4 | Incendio de charco de gasolina | 28 t | 100 | 20'6 |
| E5 | VCE de carburante | 28 t | 100 | 20'6 |
| E6 | Vertido de cloro | 20 t | 50 | 45 |
| E7 | BLEVE de GLP a granel | 18 t | - | - |
| E8 | VCE de GLP a granel | 18 t | 50 | 36 |
| E9 | Incendio en antorcha de GLP a granel | 18 t | 50 | 36 |
| E10 | Vertido de un tanque de transporte de amoniaco | 20 t | 50 | 36 |

| | | | | |
|-----|------------------------------------------------|-------|-----|------|
| E11 | Vertido de acroleína transportada a granel | 25 t | 100 | 24'8 |
| E12 | Vertido de acroleína transportada en cilindros | 100 l | 4 | 0'02 |
| E13 | BLEVE con tanque de CO ₂ | 20 t | - | - |

Tabla 29. Características de los escenarios críticos de trabajo

BLEVE = Explosión de vapor en expansión de un líquido en ebullición.

VCE = Explosión de nubes de vapor.

GLP = Gases licuados del petróleo.

5.2.2.3 Frecuencia de accidentes en carretera

Un dato muy importante para determinar el riesgo por el paso de mercancías peligrosas por un túnel es la accidentalidad o frecuencia de accidentes en el mismo. Esta accidentalidad se mide a partir del Índice de Peligrosidad (*IP*) que es el número de accidentes con víctimas en un tramo de carretera (en este caso el túnel) por cada millón de vehículos-kilómetro (también puede expresarse en número de accidentes con víctimas por cada cien millones de vehículos-kilómetro).

Al analizar el riesgo en un túnel lo deseable es poder analizar la tasa de accidentalidad que existe en el mismo pudiendo particularizar según los tipos de vehículos implicados. En los casos en los que no se pueda realizar este estudio por no disponer de suficientes datos, lo que será habitual, se emplearán la accidentalidad determinada para los túneles de la RCE.

Para determinar este Índice de Peligrosidad en los túneles españoles se han analizado los datos de accidentes en los túneles de la red de carreteras del Estado durante los años 2003, 2004, 2005, 2006, 2007 y 2008. Se ha diferenciado entre túneles unidireccionales y bidireccionales, por ser este un parámetro fundamental en la accidentalidad en las carreteras.

Los Índices de Peligrosidad obtenidos son los siguientes:

- Túneles unidireccionales: $IP = 0'086$ ACV/Mvehxkm
- Túneles bidireccionales: $IP = 0'140$ ACV/Mvehxkm

5.2.2.4 Transporte de mercancías peligrosas por carretera

El transporte de mercancías peligrosas está regulado por el Acuerdo europeo sobre el transporte internacional de mercancías peligrosas por carreteras (ADR) que clasifica las mercancías peligrosas y establece las condiciones que se deben cumplir en todas las operaciones necesarias para su transporte por carretera.

Según el ADR las mercancías peligrosas se clasifican en:

- Clase 1. Materias y objetos explosivos
- Clase 2. Gases
- Clase 3. Líquidos inflamables
- Clase 4.1. Materias sólidas inflamables, materias autorreactivas y materias explosivas desensibilizadas sólidas
- Clase 4.2. Materias que pueden experimentar inflamación espontánea
- Clase 4.3. Materias que en contacto con el agua desprenden gases inflamables
- Clases 5.1. Materias comburentes
- Clase 5.2. Peróxidos orgánicos
- Clase 6.1. Materias tóxicas
- Clase 6.2. Materias infecciosas
- Clase 7. Materias radioactivas
- Clase 8. Materias corrosivas
- Clase 9. Materias y objetos peligrosos diversos

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los posibles escenarios analizados se deben tener en cuenta tanto la proporción de vehículos pesados y de mercancías peligrosas en el tráfico, así como la proporción de cada tipo de mercancías peligrosas que circulan por el túnel. Dado que algunos de estos valores puede ser complejo de determinar para el túnel analizado por falta de datos se han obtenido los siguientes valores medios.

La proporción media de mercancías peligrosas respecto al tráfico total que circula por la RCE, según datos del mapa de tráfico del Ministerio de Fomento de 2007 a 2010, es de un 0'7%. Por otro lado, la proporción media de cada clase de mercancía peligrosa en las carreteras españolas, obtenidas a partir de las toneladas transportadas por carretera en el estado español entre los años 2007 y 2010, es la siguiente:

| Clase de MP | Porcentaje respecto al total de MP |
|-------------|------------------------------------|
| Clase 1 | 0'816% |
| Clase 2 | 2'656% |
| Clase 3 | 91'805% |
| Clase 4.1 | 0'043% |
| Clase 4.2 | 0'015% |
| Clase 4.3 | 1'302% |
| Clase 5.1 | 0'103% |
| Clase 5.2 | 0'014% |
| Clase 6.1 | 0'147% |
| Clase 6.2 | 0'020% |
| Clase 7 | 0'005% |
| Clase 8 | 1'108% |
| Clase 9 | 1'968% |

Tabla 30 Porcentaje de cada clase de mercancía peligrosa transportada en las carreteras españolas

Para obtener, dentro de una determinada clase, la proporción de la mercancía peligrosa específica que interviene en un escenario (p.e. %GLP dentro de la clase 3) o la proporción de mercancía peligrosa transportada de un determinado modo (p.e. a granel o en cilindros) se pueden extrapolar la proporciones que se dan en otros países (p.e. Francia).

5.2.2.5 Evaluación de consecuencias

A los incendios que se producen en el interior de los túneles se les asocian distintos tipos de peligros, como pueden ser las altas temperaturas, el calor de radiación, la baja concentración de oxígeno, la baja visibilidad y los diferentes tipos de gases letales, tóxicos o corrosivos emitidos desde el foco. Todos esos fenómenos físicos, algunos de los cuales se pueden calcular con exactitud, son peligrosos para las personas, los vehículos, los materiales de construcción y el equipamiento del túnel.

En los modelos de cálculo existentes, las distancias de los efectos que causan los escenarios (distancias de daños) se calculan directamente mediante la ayuda de los modelos físicos de consecuencias.

Se describen a continuación, de forma resumida, los modelos de evaluación de consecuencias incluidos en esta metodología correspondiente al modelo DG QRAM.

Para determinar los daños que los distintos escenarios puedan causar sobre los usuarios del túnel, se considerarán los siguientes efectos:

- Calor
- Alta concentración de monóxido de carbono
- Alta concentración de dióxido de carbono
- Baja concentración de oxígeno
- Radiación directa de calor de las llamas (para incendio de un derrame)

El tipo de consecuencias que cabe esperar de cada uno de los escenarios accidentales considerados serían las indicadas en siguiente tabla.

| Escenario de accidentes | | Principales peligros |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| E1 | Incendio de VP de 20 MW (descargado o parcialmente cargado con material combustible) | Fuego y humos |
| E2 | Incendio de VP de 100 MW (cargado con material combustible) | Fuego y humos |
| E3 | BLEVE de GLP. Cilindro de 50 kg | Efectos térmicos y de presión |
| E4 | Incendio de charco de combustible. Cisterna de 28 t | Fuego y humos |

| Escenario de accidentes | | Principales peligros |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| E5 | VCE de combustible. Cisterna de 28 t | Efectos térmicos y de presión |
| E6 | Vertido de cloro. Cisterna de 20 t | Gas tóxico |
| E7 | BLEVE de GLP. Cisterna de 18 t | Efectos térmicos y de presión |
| E8 | VCE de GLP. Cisterna de 18 t | Efectos térmicos y de presión |
| E9 | Incendio en antorcha de GLP. Cisterna de 18 t | Efectos térmicos y de presión |
| E10 | Vertido de amoníaco. Cisterna de 20 t | Gas tóxico |
| E11 | Vertido de acroleína transportada a granel. Cisterna de 25 t | Líquido tóxico |
| E12 | Vertido de acroleína. Cilindros de 100 litros | Líquido tóxico |
| E13 | BLEVE de CO ₂ licuado. Cisterna de 20 t | Efectos de presión |

Tabla 31 Escenarios de accidentes y sus posibles efectos

En el campo de los efectos producidos por una inhalación tóxica, se puede decir que hay dos parámetros principales a considerar para analizar los efectos sobre los seres vivos: la concentración de la materia que se analiza y la duración de la exposición. Esos parámetros se consideran en el modelo para cada escenario.

Para estimar el margen de tiempo hasta que comiencen a producirse muertes entre los usuarios del túnel como resultado de inhalar una dosis mortal de tóxicos, se tendrá presente el concepto de Dosis Fraccional Efectiva (DFE). DFE considera la contribución de los distintos tóxicos para causar el daño (en este caso la muerte), teniendo en cuenta la concentración y la duración de la exposición. Entonces, las DFE de los distintos tóxicos se pueden sumar durante el tiempo de exposición hasta que se alcance el valor 1'0. Este punto supondrá el límite que los seres humanos pueden tolerar.

5.2.3 DATOS DE SALIDA DEL MODELO

5.2.3.1 Curvas F/N

El modelo cuantitativo de análisis de riesgo en túneles descrito, permite estimar para cada uno de los escenarios analizados el riesgo social que supone. El riesgo social se mide a través de dos variables:

1. La probabilidad de ocurrencia del escenario
2. Las consecuencias del escenario acaecido

El método más comúnmente utilizado para describir el riesgo social es calcular las curvas F/N . Estas curvas ilustran la relación entre la frecuencia de ocurrencia del accidente contemplado en el escenario (F) y la gravedad del mismo, medida por el número de víctimas del accidente (N). En el eje de abscisas se representa el número de víctimas (personas fallecidas, heridas o ambas), variable N , en una escala logarítmica. En el eje de ordenadas se representan las frecuencias anuales de ocurrencia de accidentes con N víctimas, función $F(N)$. Para cada situación dada (población, tráfico, tipo de mercancía peligrosa, escenario, etc.) se obtiene una curva F/N que representa el riesgo social para cada túnel y para la situación de explotación que le corresponda.

En el Método de Mercancías Peligrosas, al introducir en el modelo DG QRAM valores del índice de peligrosidad, se deberán considerar como consecuencias (eje de abscisas) tanto las víctimas mortales como los heridos.

A continuación se adjunta el gráfico de las curvas F/N obtenidas de un análisis concreto:

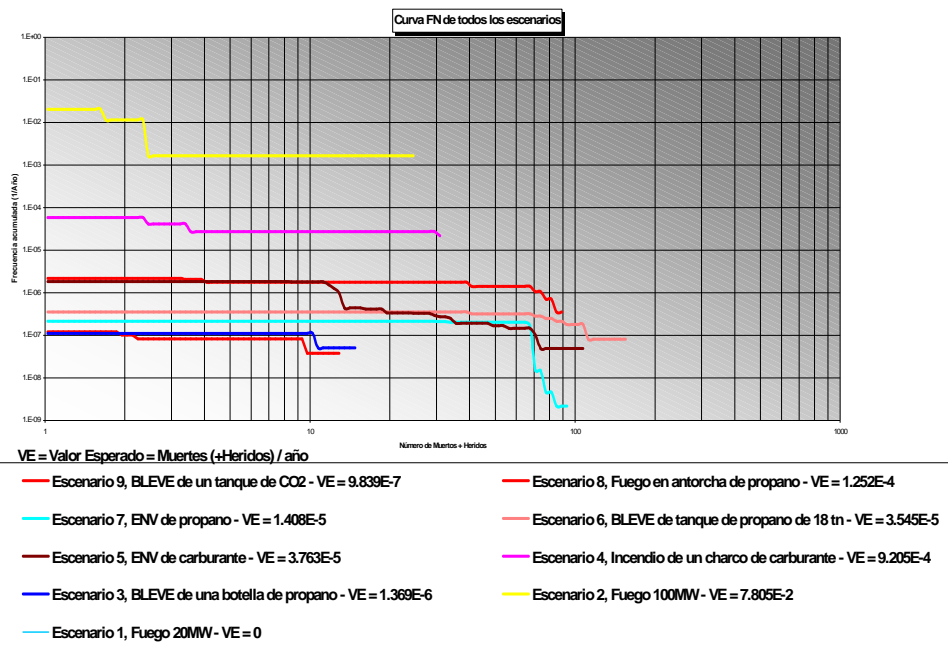


Ilustración 10. Curvas F/N de diferentes escenarios de accidentes de TMP

Del estudio realizado se obtienen los siguientes valores que nos permiten realizar el siguiente análisis:

- Esperanza matemática específica del escenario analizado, correspondiente por lo tanto al tipo de mercancía peligrosa considerado y al tipo de accidente modelizado.
- Esperanza matemática conjunta de todos los escenarios analizados, teniendo presente el paso de todas las mercancías peligrosas contempladas en los escenarios planteados en el método.

5.2.3.2 Niveles de aceptación

Una vez obtenidas las curvas F/N representativas del túnel objeto de estudio es necesario comparar los resultados obtenidos con los criterios de aceptabilidad del riesgo establecidos. El objetivo será determinar si es posible asumir la explotación del túnel permitiendo el paso de mercancías peligrosas por el mismo sin medidas adicionales de regulación específica del tráfico o, por el contrario, se hace necesario establecer determinadas restricciones, regulaciones o prohibir completamente el paso de MP por el túnel.

Las condiciones de riesgo de un túnel, expresadas por la curva F/N (resultado del sumatorio de las curvas F/N del túnel, obtenidas para cada uno de los escenarios

analizados), representan el riesgo social existente en la explotación de la citada infraestructura. Este valor corresponde al número de individuos afectados (fallecidos y heridos graves) por los accidentes registrados. Se expresa en términos de frecuencia acumulada de que el número de víctimas exceda un determinado valor (N) por túnel a lo largo de un año.

Los límites a estos valores se establecen a través de una serie de rectas que responden a la expresión:

$$F(N) = A \times N^{-k}$$

Siendo:

$F(N)$ \equiv Frecuencia anual de ocurrencia de accidentes con N víctimas. Eje de ordenadas

N \equiv Número de víctimas (fallecidos y heridos graves). Eje de abscisas en escala logarítmica

A \equiv Parámetro

k \equiv Parámetro

En función de los valores que se consideren para los coeficientes A y k se obtendrán unas rectas de pendiente negativa que determinan los siguientes límites:

- Recta límite superior

Es la recta que determina la frontera entre un riesgo social no admisible y unas condiciones de explotación aceptables.

Por encima del límite superior se encuentra la zona de riesgo no admisible, lo que obligaría a una reconsideración total del diseño o equipamiento del túnel, ya que las posibilidades de ocurrencia de una catástrofe superarían los límites de riesgo social admisible.

Por debajo del límite se encuentra la zona de condiciones de explotación aceptables.

- Recta límite inferior

Es la recta que determina la frontera entre unas condiciones de explotación aceptables y un riesgo social admisible.

Por encima se encontraría la zona de explotación aceptable, aunque con condiciones posiblemente mejorables a un coste razonable.

Por debajo se encuentra la zona de explotación en condiciones de riesgo tolerables sin necesidad de establecer ningún tipo de medidas adicionales para el túnel.

Estas dos rectas determinan tres áreas o zonas, como muestra la siguiente figura:

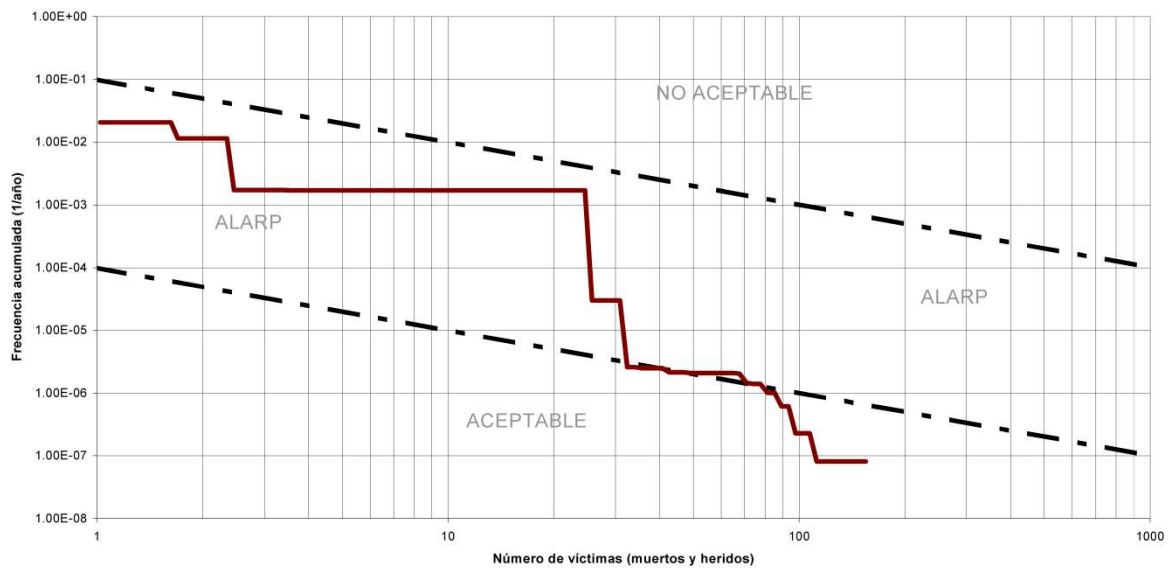


Ilustración 11. Representación del sumatorio de curvas F/N y áreas de aceptabilidad

- Zona de riesgo no aceptable o no asumible socialmente: debe reconsiderarse el diseño del túnel y de su equipamiento.
- Zona intermedia, conocida con el nombre de ALARP (*“As Low As Rational Possible”* – Tan bajo como razonablemente sea posible): representa la zona en la que es posible la explotación del túnel en condiciones aceptables, si bien se deberían llevar a cabo medidas adicionales de seguridad de manera que se consiga reducir el riesgo tanto como razonablemente sea posible.
- Zona de riesgo aceptable o asumible socialmente: la explotación del túnel no hace necesaria la implantación de medidas adicionales de seguridad.

Por tanto, la interpretación de la curva F/N de cada túnel será la siguiente:

- Si la curva F/N rebasa la recta límite superior, es decir, invade la zona de riesgo no aceptable, el túnel no se considera apto para su explotación. Es obligatorio la adopción de medidas importantes que reduzcan el nivel de riesgo.
- Si la curva F/N supera la recta límite inferior pero no la recta límite superior, se encuentra en la zona ALARP, por lo que el túnel es seguro, si bien podría incrementarse el nivel de seguridad mediante la adopción de medidas adicionales razonables (técnica y económicamente) para reducir los niveles de riesgo.
- Si la curva F/N del túnel está por debajo de la recta límite inferior, es decir, se encuentra en la zona de riesgo aceptable, el túnel es seguro y no es necesario adoptar medidas de seguridad adicionales.

Las rectas límite establecidas para el Método de Mercancías Peligrosas tienen en consideración que las consecuencias (N) son las personas fallecidas y los heridos graves:

Recta límite superior: Nivel de no aceptabilidad

Se establece como recta límite superior la que se obtiene de los siguientes valores:

$$\left. \begin{array}{l} A = 0'1 \\ k = 1'0 \end{array} \right\} \rightarrow F(N) = \frac{0'1}{N}$$

Recta límite inferior: Nivel de aceptabilidad

Se establece como recta límite inferior la que se obtiene de los siguientes valores:

$$\left. \begin{array}{l} A = 0'001 \\ k = 1'0 \end{array} \right\} \rightarrow F(N) = \frac{0'001}{N}$$

Ambas rectas se representan en el gráfico que se incluye a continuación:

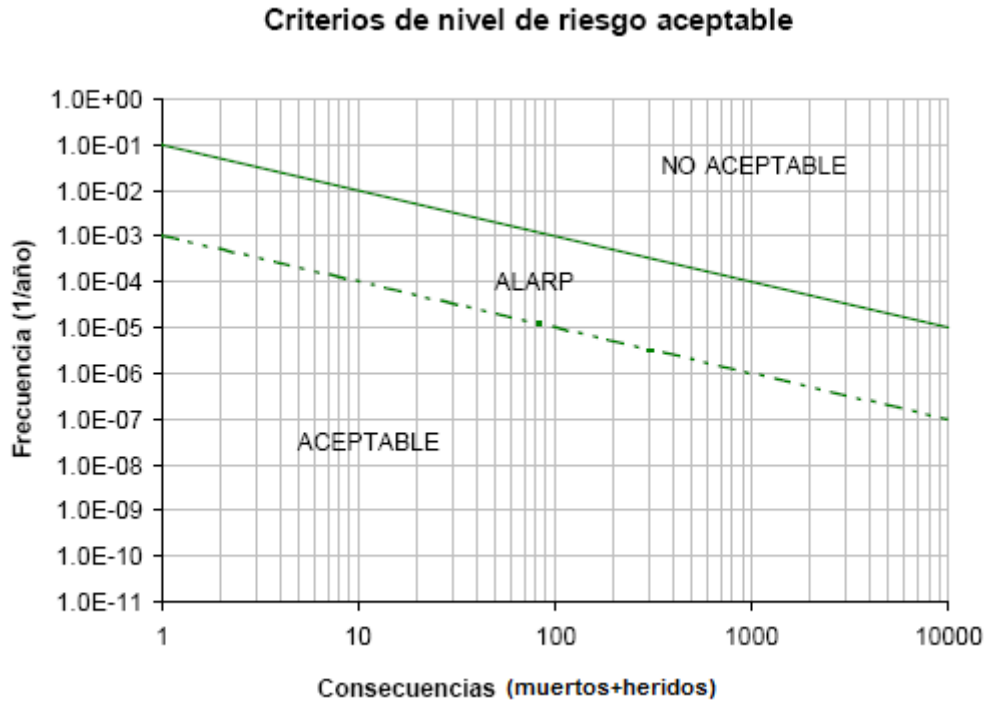


Ilustración 12. Rectas límite de aceptabilidad de riesgo

5.3 PASO DE MERCANCÍAS PELIGROSAS POR EL TÚNEL

Es necesario remarcar en primer lugar que, un análisis de riesgo constituye una herramienta que, en la medida de lo posible, intenta objetivar un fenómeno con una alta componente subjetiva, para facilitar así la toma de decisiones. Por lo tanto, **será en todo caso la Autoridad Administrativa competente la que, teniendo en cuenta los resultados de los análisis de riesgo y de otros posibles estudios realizados, deberá decidir si por un túnel pueden o no circular vehículos que transporten mercancías peligrosas.**

5.3.1 TÚNELES NO PERTENECIENTES A LA RIMP

Del análisis de riesgo la autoridad administrativa podrá tomar las siguientes decisiones:

1. Permitir el paso de mercancías peligrosas por el túnel.

Se debe determinar, en caso de ser necesaria, la franja horaria del día en que dicho paso se permite o establecer otras limitaciones en la explotación.

- Si se establecen restricciones horarias: se deberá rehacer el análisis de riesgo empleando la *IMD* representativa del periodo horario en el que se permita el paso de MP.
- Si se establece la formación de convoyes o circulación aislada de los TMP: se deberá repetir el análisis de riesgo teniendo en cuenta las víctimas potenciales de cada escenario a través del valor de *IMD* que corresponda.
- Si se prohíbe el paso de determinadas MP: se deberá realizar el análisis de riesgo eliminando los escenarios correspondientes a dichas MP.
- Se deberá delimitar en el estudio la obligatoriedad de revisar las restricciones y/o prohibiciones según la evolución de la *IMD* prevista.

2. No permitir el paso de vehículos de mercancías peligrosas.

5.3.2 TÚNEL PERTENECIENTE A LA RIMP

En el caso de que el túnel pertenezca a la RIMP se debe permitir el paso de mercancías peligrosas por interés nacional, aunque es muy recomendable que se estudie el riesgo que esto supone mediante el correspondiente análisis de riesgo siguiendo esta metodología. Además es conveniente:

- Determinar la *IMD* hasta la que el túnel es o no seguro.
- Establecer a pesar de ello a partir de que *IMD* es conveniente la formación de convoyes, circulación aislada, restricciones horarias o prohibición de determinados tipo de MP.
- En caso de que el túnel no tuviese un nivel de seguridad adecuado, se deberá definir el equipamiento adicional o las medidas de explotación adecuadas para que el riesgo de paso de vehículos de mercancías peligrosas por el túnel sea asumible.

5.3.3 DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA A APORTAR

5.3.3.1 Túneles con paso permitido de mercancías peligrosas

Desde el punto de vista de la seguridad, los túneles por los que se permita el paso de mercancías peligrosas se encontrarán dentro de uno de los siguientes supuestos:

- a) Túneles pertenecientes a itinerarios incluidos en la RIMP, por los que por motivos estratégicos sea aconsejable permitir el paso de mercancías peligrosas.
- b) Túneles que aunque se encuentren en itinerarios no pertenecientes a la RIMP, no dispongan de una ruta alternativa entre el punto origen del transporte de mercancías peligrosas y su punto final de destino, una vez que se ha agotado la posibilidad de circular por las vías habilitadas para tal fin (RIMP) dentro de la Red de Carreteras del Estado.
- c) Túneles que se encuentren en itinerarios en los que a pesar de existir una ruta alternativa para el tránsito de vehículos de mercancías peligrosas, el tránsito por la citada ruta comporte unos niveles de riesgo mayores a los correspondientes al paso de los vehículos de mercancías peligrosas por el interior del túnel.

Teniendo en cuenta lo anterior se deberá incorporar en el documento de análisis de riesgo realizado la siguiente documentación justificativa:

Caso a:

- Descripción de la vía e itinerario en el que se encuentra el túnel poniendo de manifiesto claramente que se prevé el paso de mercancías peligrosas por el túnel considerado al pertenecer a un itinerario incluido en la RIMP.

Caso b:

- En el caso de que no exista una ruta alternativa a la del túnel entre el punto origen del transporte y el punto final de destino, se documentará este hecho y se reflejará en el documento de análisis de riesgo que el diseño contempla el paso de mercancías peligrosas por el túnel por ser la única ruta posible.

Caso c:

Corresponde al caso de existencia de una ruta alternativa que presente un mayor grado de peligrosidad en su tránsito. En este caso se aportarán los siguientes estudios complementarios al análisis de riesgo del propio túnel.

- Estudio de riesgo de la ruta alternativa a cielo abierto.

Se documentarán al menos los siguientes puntos:

- Población expuesta en el citado recorrido en comparación con la que resultaría afectada por un accidente en el interior del túnel.
- Existencia de puntos conflictivos en la ruta a cielo abierto tales como intersecciones, incorporaciones, glorietas u otros condicionantes de trazado que conlleven un incremento en los índices de accidentalidad.
- Posible influencia de factores meteorológicos adversos que influyan sobre los índices de accidentalidad del citado trayecto alternativo. Se trata de evaluar el tránsito a través de puertos de montaña con climatología adversa u otros accidentes orográficos que modifiquen las condiciones de circulación habituales por la ruta, de manera estacional o periódica.
- Otros factores puntuales o periódicos que alteren las condiciones de circulación y que sean previsibles y evaluables por parte del autor del análisis de riesgo. Puede tratarse de concentraciones periódicas ante eventos deportivos,

actividades culturales, etc. que conlleven un incremento del riesgo sobre el trayecto en túnel.

5.3.3.2 Túneles con paso prohibido de mercancías peligrosas

En el caso de que a partir de los resultados del análisis de riesgo realizado la Autoridad Administrativa decida prohibir el paso de mercancías peligrosas por el interior del túnel analizado, se complementará el estudio realizado con la siguiente documentación:

- Estudio de riesgo de la ruta alternativa a cielo abierto.

Se documentarán al menos los siguientes puntos:

- Ausencia o número muy reducido de población expuesta en el recorrido a cielo abierto en comparación con la que resultaría afectada en un accidente en el interior del túnel que pudiera presentar intensidades de circulación elevadas.
- Ausencia de puntos conflictivos en la ruta a cielo abierto tales como intersecciones, incorporaciones, glorietas u otros condicionantes de trazado que pudieran conllevar un incremento en los índices de accidentalidad.
- Otros factores puntuales o periódicos que alteren las condiciones de circulación en el interior del túnel y que sean previsibles y evaluables, tales como ausencia de equipamiento básico, deficiente mantenimiento o ausencia del mismo, trazado muy deficiente, falta de gálibo, presencia continua de filtraciones, etc.