

### 3. COLISIONES EN TÚNELES DE CARRETERA

#### 3.1. ANTECEDENTES

Como se ha indicado en el *punto 1.2*, la definición exacta de lo que se considera un incidente significativo cambia de un país a otro en función de sus propios requisitos normativos. En el Apéndice 1 se muestran ejemplos de incidentes considerados como relevantes en diferentes países.

En todos ellos, las colisiones y los incendios son considerados incidentes significativos ya que pueden conllevar unas consecuencias de gran gravedad. Este capítulo trata sobre colisiones en túneles. De forma análoga, se pueden tener en cuenta otro tipo de incidentes según los aspectos descritos para éstas. Los incendios, por su parte, son analizados en el Capítulo 4.

En este capítulo se describen los factores que influyen en las colisiones en túneles de carretera y se analizan los parámetros relevantes de las mismas y de otro tipo de incidentes, incluyendo, por ejemplo, las características del túnel, del accidente, del conductor y del vehículo, así como el comportamiento de las personas involucradas.

Asimismo, en este capítulo se proporciona una lista completa de los datos que se deben recoger en las colisiones en túneles, la evaluación de los datos estadísticos sobre tasas de colisiones de vehículos en diferentes países y su posible aplicación.

#### 3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS COLISIONES EN LOS TÚNELES DE CARRETERA

Un túnel puede considerarse como un tramo especial de carretera confinado en un espacio restringido con límites laterales y verticales. Las diferencias existentes entre las colisiones en los túneles y las ocurridas en carreteras a cielo abierto vienen determinadas por ciertas características propias de los túneles que pueden resumirse del siguiente modo:

- Los túneles son estructuras confinadas en un espacio limitado, que en ciertos usuarios puede provocar ansiedad y comportamientos particulares en caso de colisión (esto puede aparecer con personas que estén tanto directa como indirectamente involucradas en la colisión).
- Normalmente, en los túneles hay pocos (o ningún) cruces o intersecciones, y tampoco existe tráfico hacia, o desde, vías adyacentes.
- El acceso de peatones y vehículos de movimiento lento (como ciclomotores, motocicletas, tractores agrícolas u otros equipos) está habitualmente prohibido.
- La proximidad a obstáculos fijos (como la boca del túnel, señalización de la vía, el cerramiento superior o los hastiales del túnel) puede influir en el comportamiento de los conductores.
- Las medidas de protección habituales en tramos de carreteras a cielo abierto (como barreras de seguridad metálicas u otros sistemas para absorber energía) no están presentes en todos los túneles de carretera.
- En muchos túneles de autopista/autovía, a diferencia de los tramos de carreteras a cielo abierto, no hay carriles de emergencia.
- Los usuarios de los túneles necesitan percibir, analizar y entender que se encuentran en un ámbito de conducción diferente.
- Las situaciones de riesgo en túneles de carretera pueden requerir que los conductores tomen decisiones rápidas en unas condiciones diferentes de las que están acostumbrados.

- Si la calidad del aire no está controlada y no se mantiene en unos límites adecuados, puede afectar al comportamiento de los usuarios.
- Las condiciones ambientales están más controladas en el interior de los túneles (ausencia de lluvia, nieve, hielo, niebla y superficie de la carretera menos deslizante), pero se pueden producir cambios bruscos en las bocas del túnel.
- Normalmente, los túneles están iluminados de forma permanente, pero pueden aparecer cambios repentinos de iluminación al entrar o salir de ellos.
- El ambiente monótono de los túneles largos puede entrañar una pérdida de atención por parte del conductor.
- Las condiciones del túnel pueden provocar que los conductores evalúen de forma errónea el trazado en planta y perfil del túnel, así como de la distancia de seguridad a otros vehículos y obstáculos.

A la luz de estas consideraciones, es razonable que las colisiones en los túneles difieran de aquellas que ocurren en tramos de carreteras a cielo abierto según los siguientes aspectos:

#### **Ocurrencia de los incidentes:**

- Determinados tipos de colisión no pueden ocurrir en túneles, como las colisiones ocasionadas por el viento, lluvia, nieve u otras causas relacionadas con las circunstancias ambientales.
- Hay menos probabilidades de que algunas colisiones ocurran en túneles: colisiones en movimientos de cambio de carril o giros, paso de peatones o animales en libertad o colisiones debidas a calzadas deslizantes.
- Hay más probabilidades de que en los túneles ocurran ciertos tipos de colisión, por ejemplo, choques con obstáculos fijos como la pared o la boca del túnel.
- Hay tipos de incidentes que únicamente pueden darse en túneles, como por ejemplo, que se empañe repentinamente el parabrisas generando una disminución de la visibilidad o que aparezca una inundación rápida en túneles sub-acuáticos.

#### **Consecuencias de los incidentes:**

- Algunas colisiones pueden tener mayores consecuencias si ocurren en un túnel, sobre todo a causa de las limitaciones de espacio, como pueden ser colisiones con los laterales del túnel (en vez de con la barrera de seguridad) o colisiones que provocan incendios, explosiones o vertidos de sustancias peligrosas.
- La respuesta de los servicios de emergencia puede entorpecerse debido a la dificultad de acceso hasta la escena del incidente.

### **3.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS COLISIONES EN TÚNELES DE CARRETERA**

Los aspectos tratados en el capítulo anterior, que son particulares de túneles de carretera, pueden influir tanto en la frecuencia como en las consecuencias de las colisiones. En una primera aproximación, se identifican a continuación y se analizan cualitativamente los factores que pueden ser relevantes. A continuación, se analizan detenidamente los factores más importantes en base a los resultados de diversos estudios detallados sobre colisiones en túneles de carretera. Hay pocas evidencias que sostengan que la influencia de cada uno de estos factores pueda ser tratada de forma individual, y tan sólo para unos pocos es posible realizar un enfoque cuantitativo.

Los factores identificados se describen a continuación (sin tratar de ser ésta una lista exhaustiva):

- Configuración básica del túnel – túnel unidireccional o bidireccional: presenta una influencia significativa en lo que respecta al tipo de colisión, tanto por su frecuencia como por sus consecuencias; en este caso se dispone de información detallada para su evaluación cuantitativa (ver el capítulo 3.5).
- Trazado en planta: un trazado desfavorable o poco claro (por ejemplo, curvas con radios bajos), puede disminuir la distancia de visibilidad en un túnel, favoreciendo así las colisiones con obstáculos en la carretera (como pueden ser las retenciones de vehículos).
- Perfil longitudinal: una fuerte pendiente ascendente puede ralentizar de forma significativa los vehículos pesados, lo que genera que exista una mayor diferencia de velocidad entre vehículos pesados y turismos, lo que a su vez puede distorsionar la percepción de las distancias.
- Número de carriles: un número suficiente de carriles, que tenga en cuenta la carga de tráfico prevista, facilita la fluidez del tráfico (en la mayoría de los casos “suficiente” se corresponde con un número de carriles igual al existente a cielo abierto). Sin embargo, un número mayor de carriles en cada sentido de tráfico aumenta la frecuencia de las maniobras de cambio de carril, las cuales crean interferencias en el tráfico de los carriles vecinos.
- Anchura de los carriles: un carril más estrecho puede interferir en el tráfico del carril adyacente.
- Distancia entre el carril y el hastial del túnel: un hastial demasiado cercano al carril puede influir en la posición lateral de los vehículos y en su velocidad.
- La existencia de apartaderos o carriles de emergencia, y la distancia entre los mismos: las colisiones tras una avería pueden evitarse si el vehículo afectado no bloquea el carril de circulación.
- Longitud del túnel: se han documentado diversas experiencias al respecto, como que “un túnel más largo puede tener influencia en la concentración del conductor”, de forma que la tasa de colisiones puede aumentar con la longitud del túnel o del tipo “la mayor parte de las colisiones suceden dentro de las zonas de entrada o de salida y por ello los túneles más largos podrían reflejar, en valores medios, una tasa menor de colisiones”.
- Zonas de los túneles: los tipos de colisiones y la frecuencia de las mismas son diferentes según la zona del túnel en la que ocurran (por ejemplo, en la zona de entrada se supone que habrá un mayor número de colisiones debido a la lenta adaptación de los ojos al ambiente oscuro del túnel).
- Densidad del tráfico, composición y características del mismo: la densidad total del tráfico así como sus características específicas, que incluyen las horas punta de tráfico y congestión, tienen una influencia en la frecuencia y también en las consecuencias de las colisiones; la proporción de tráfico pesado también tiene su influencia en las tasas de colisión (debido por ejemplo a la diferencia de velocidad entre los vehículos pesados y los turismos) y particularmente, también sobre sus consecuencias.
- Velocidad: la velocidad tiene una importante influencia en las consecuencias; por ello la supervisión del tráfico y la incorporación de medidas de control de la velocidad pueden influir en las consecuencias de las colisiones.
- Cruces y rampas: la existencia de rampas de entrada o de salida, o de cruces, puede tener una notable influencia en las tasas de colisión.
- Iluminación del túnel: el nivel de iluminación del túnel y otras características de la iluminación, como el brillo de la pared o la adaptación a la iluminación del mismo en la zona de entrada, pueden ser parámetros influyentes.

- Guiado visual para los conductores: el guiado de los conductores mediante señales luminosas LED en la calzada o en el arcén, o cualquier otra medida similar, puede ser relevante, sobre todo en el caso de determinados trazados singulares.
- Sistemas de información al conductor y sistemas de gestión del tráfico: pueden ser importantes en túneles complejos y túneles urbanos con una densidad alta de tráfico.
- Estándares técnicos de los vehículos: pueden influir tanto en la frecuencia como en las consecuencias de las colisiones.
- Factores culturales: los hábitos de conducción y el mantenimiento del vehículo pueden tener una influencia significativa tanto en la frecuencia como en las consecuencias de las colisiones.

La influencia conjunta de todos esos parámetros es compleja y por ello la cuantificación de la influencia de cada parámetro de forma individual es difícil. Sin embargo, se dispone de algunos estudios que aportan información al respecto.

Uno de los primeros estudios sobre colisiones en túneles de carretera lo llevó a cabo el Comité Técnico C5 de túneles de carretera de la asociación Mundial de la Carretera (PIARC) con el Informe Técnico sobre "*Seguridad en los Túneles*", en 1995 [8]. Este informe técnico concluyó que la seguridad en los túneles es mayor que en los tramos de carretera a cielo abierto, excepto en el caso de fallos en el diseño geométrico. Los túneles unidireccionales de autopistas ofrecen mejores condiciones de seguridad que los túneles bidireccionales. Sin embargo, el informe antes mencionado tiene ya más de 20 años y debido a la mejora en el proceso de registro y evaluación de datos, ahora se dispone de mayor información sobre las colisiones en túneles. En base a ello, se han llevado a cabo varios estudios en los que se estudian algunos de los parámetros de influencia mencionados anteriormente, individualmente y con respecto a su interacción. Además, se dispone de datos cuantitativos completos de varios países que se pueden utilizar para calcular las tasas de colisión de tipos concretos de túneles (ver capítulo 3.5).

En un estudio suizo sobre seguridad del tráfico en túneles de autopistas de 2004 [35] se llevó a cabo un análisis estadístico multi-parámetro de colisiones en túneles, considerando varios túneles y distintos parámetros de tráfico. Se pudo identificar una correlación entre cinco de estos parámetros y la frecuencia y consecuencias de las colisiones:

- Túnel unidireccional o bidireccional: los túneles unidireccionales presentan un menor riesgo de colisión.
- Longitud del túnel: los túneles más largos presentan una tasa menor de colisiones.
- Densidad de tráfico – IMD<sup>4</sup>: los túneles con una densidad alta de tráfico presentan un mayor riesgo de que se produzcan colisiones.
- Tráfico de vehículos pesados: un porcentaje mayor de vehículos pesados aumenta el riesgo de colisiones (consecuencias más graves).
- Distancia entre el carril y la pared del túnel: una distancia mayor reduce las tasas de colisión.

En los estudios de análisis de riesgo, la existencia de rampas de entrada o de salida suele considerarse con frecuencia como un importante factor de riesgo adicional.

---

<sup>4</sup> Intensidad Media Diaria en un túnel concreto

En un estudio austriaco sobre seguridad en el tráfico en túneles de autopista [34] que cubre el periodo entre los años 1999 a 2009, se estudiaron las tasas de colisión con respecto a las diferentes zonas de un túnel; se definieron 5 zonas:

- Zona anterior a la boca del túnel: 250 m anteriores
- Zona de la boca del túnel: 10 m anteriores y posteriores a la boca del túnel
- Zona de entrada: 10 m - 150 m dentro del túnel
- Zona interior: a más de 150 m de ambas bocas del túnel
- Zona de salida: hasta 250 m más allá del túnel

Las tasas de colisión más altas aparecieron en la zona de la boca del túnel, seguida de la zona de entrada, mientras que el interior muestra una tasa significativamente menor.

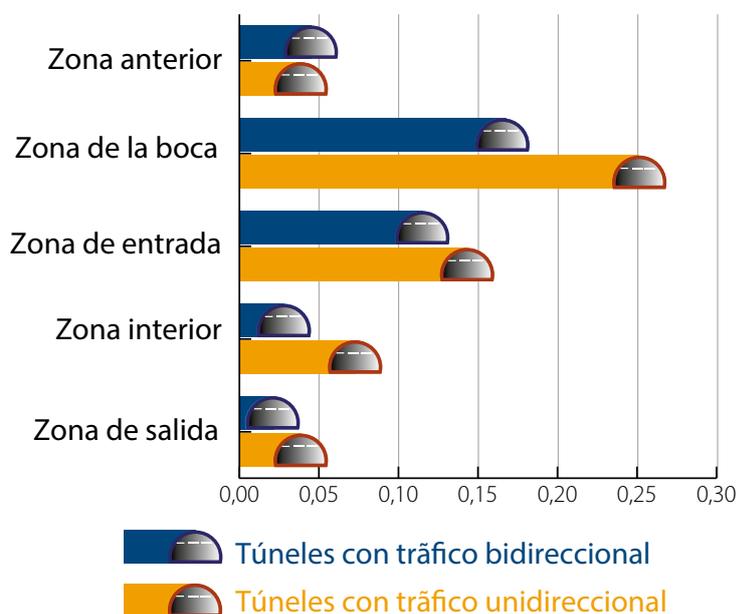


Ilustración 4: tasas de colisión (colisiones con heridos por 1 millón de vehículos y km) en función de las zonas del túnel en los túneles de autopista austriacos [34]

En este estudio se analizaron las causas de 502 colisiones en túneles. Los resultados se muestran en la *ilustración 5*. Las principales causas resultaron ser errores de conducción o distracciones. El estudio también reveló que los túneles unidireccionales muestran una tasa de colisiones mayor que los bidireccionales; sin embargo, los valores establecidos para los túneles bidireccionales y unidireccionales respectivamente, están basados en un conjunto de túneles con diferente longitud media y distinto tráfico. Por este motivo, el modelo de riesgo de túnel austriaco incluye una función específica que tiene en cuenta dichos parámetros cuando calcula las tasas de colisión en un túnel concreto. En Austria se está instalando un sistema electrónico de control de velocidad en un número cada vez mayor de túneles (“control de tramo”); este sistema muestra efectos positivos sobre el riesgo de colisión.

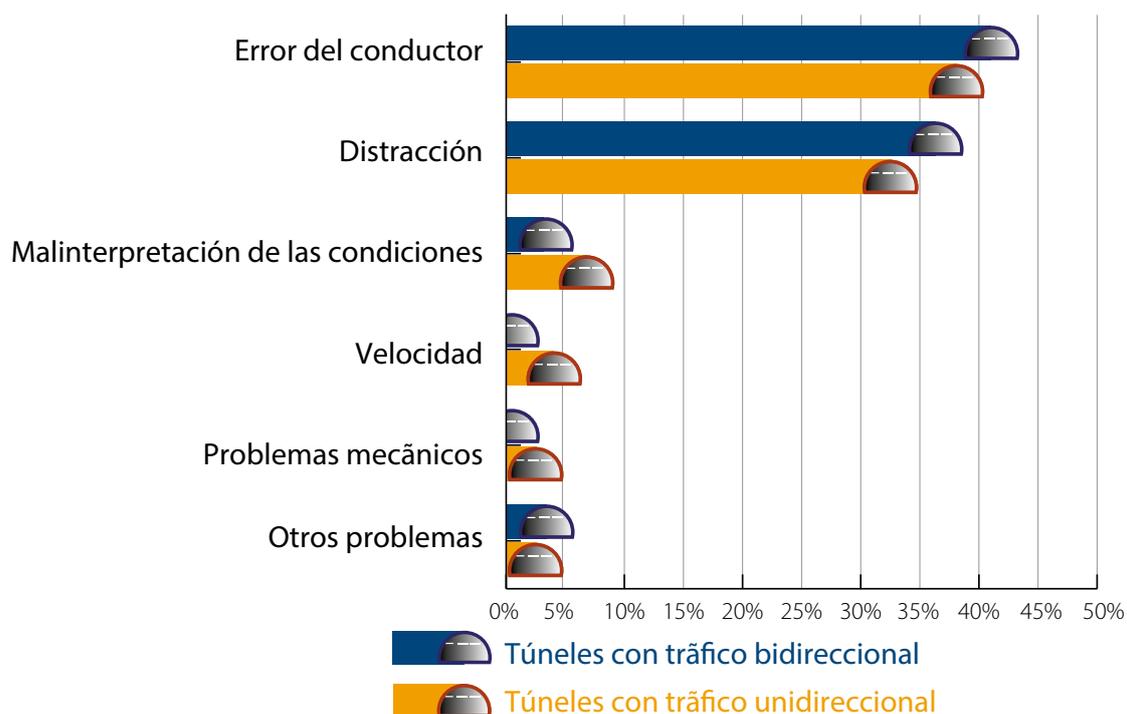


Ilustración 5 : causas de colisión en los túneles de autopista austríacos [34]

Un estudio italiano [30] ha demostrado que en los túneles de autopista con tráfico unidireccional, la tasa media de colisión es de  $12/10^8$  vehículos-km en colisiones con víctimas (fallecidos y heridos). Durante ese mismo periodo, en los tramos de autopista donde dichos túneles se ubican, la tasa media de colisión se estimaba en  $9/10^8$  vehículos-km para colisiones con víctimas. No hay grandes diferencias en el procedimiento utilizado para la toma de datos en colisiones con víctimas en túneles, respecto al utilizado en tramos de carreteras a cielo abierto, por lo tanto se puede considerar que las tasas son comparables. Además, el riesgo de subestimación de alguno de estos valores es despreciable pues los heridos y los fallecidos se registran de forma sistemática tanto en los túneles como en los tramos a cielo abierto. El Ministerio de Transporte italiano facilitó los datos para este estudio, que consideró un periodo de monitorización de cuatro años, entre 2006 y 2009. Durante ese tiempo se registraron 762 colisiones con víctimas (sólo colisiones con fallecidos y heridos) en 195 tubos unidireccionales.

Las tasas de colisión mencionadas anteriormente, muestran que la tasa media de colisiones con víctimas es un 33,3 % más alta en los túneles que en las autopistas donde éstos se ubican. Este incremento se considera significativo.

En general se puede decir (basándose en la documentación existente) que en Italia la frecuencia de todas las colisiones (colisiones con daños materiales, con heridos y fallecidos) es más baja en los túneles que en los tramos comparables de carretera al aire libre, al contrario de lo que sucede con la frecuencia de las colisiones con víctimas.

En posteriores estudios [31] [32] se ha demostrado que en túneles de autopista italianos la frecuencia <sup>5</sup> de colisiones con víctimas dentro de los túneles aumenta con su longitud, con la intensidad media diaria por carril, con el porcentaje de camiones y con el número de carriles.

5 En este estudio, frecuencia se define como número de colisiones por túnel y año.

En cambio, se comprobó que la variable “*acera*” no era estadísticamente significativa. En estos estudios, también se encontró una significativa reducción, continua con los años, de las colisiones con víctimas en túneles de autopista. Esta reducción a lo largo de los años se puede atribuir a un aumento en la instalación de sistemas de control electrónico de velocidad en las autopistas en las que están situados los túneles investigados; al efecto positivo de la introducción del carnet de conducir con el sistema de puntos que se reducen en caso de faltas al reglamento; y a la puesta en marcha o el refuerzo de las medidas de seguridad en los túneles después del mes de octubre de 2006, fecha en que entró en vigor en Italia la Directiva Europea 2004/54/EC .

En un estudio francés publicado en el año 2015 [47], se llevaron a cabo análisis estadísticos detallados para identificar y entender la influencia de parámetros específicos en el número de averías, colisiones e incendios. Se consideraron los siguientes parámetros: volumen de tráfico, número de vehículos pesados, longitud del túnel, tipo de flujo del tráfico (unidireccional o bidireccional), entorno urbano o no, límites de velocidad, pendiente, centro de control en el túnel, año en que ocurrió.

Estos análisis suponen aislar un parámetro o estudiar su influencia en el número de incidentes, manteniendo el resto de los parámetros constantes<sup>6</sup>. Las conclusiones abajo descritas se refieren solamente a colisiones con parámetros “*significativos*”. Se considera que un parámetro es significativo si está probado que tiene una influencia importante en la tasa de colisiones (ocurrencia de sucesos por vehículo y km).

El estudio se llevó a cabo incluyendo sólo las colisiones con víctimas y las colisiones con daños materiales. Se obtuvieron dos conclusiones principales basadas en estos análisis estadísticos detallados.

En primer lugar, se encontró que la tasa de colisión es mayor en los túneles unidireccionales que en los bidireccionales. A la vista del método estadístico antes explicado, esta conclusión solo es válida si el resto de los parámetros se mantienen, en concreto la longitud, el tráfico y la velocidad. En consecuencia, este resultado se puede explicar por el hecho de que los túneles unidireccionales proporcionan una mayor sensación de seguridad a los usuarios, pues no hay vehículos que circulen en sentido opuesto. Por ello, los usuarios del túnel unidireccional pueden tener un comportamiento menos prudente (por ejemplo conducir demasiado deprisa). Según estos resultados, la tasa de colisión en un túnel unidireccional es dos veces mayor que en un túnel bidireccional, cuando el resto de los parámetros se mantienen constantes, tal y como se muestra en la tabla siguiente:

**TABLA 1: TASAS DE COLISIÓN EN TÚNELES UNIDIRECCIONALES Y BIDIRECCIONALES (COLISIONES TOTALES + COLISIONES CON VÍCTIMAS) SEGÚN EL ESTUDIO FRANCÉS [47]**

	Tasas de colisión totales (Número total de colisiones / 10 <sup>8</sup> veh·km)	Tasas de colisión con víctimas (Número de colisiones con víctimas / 10 <sup>8</sup> veh·km)
Túneles unidireccionales	44	9
Túneles bidireccionales	25	5

<sup>6</sup> Estos análisis se basan en modelos estadísticos complejos adaptados a las características estadísticas de la muestra de los eventos estudiados. Sobre esta base, se pueden utilizar regresiones Quasi-Poisson y regresiones binomiales negativas para modelar eventos raros y con mucha dispersión de una manera satisfactoria. Estas regresiones se utilizaron para colisiones. La regresión de Poisson, ideal para eventos raros, se utilizó para incendios.

La segunda conclusión es que la tasa de colisión es mayor en túneles con fuerte pendiente longitudinal. Este resultado se puede explicar por el hecho de que los conductores tienden a aumentar la velocidad cuando circulan por una pendiente descendente y porque la diferencia de velocidad entre los vehículos lentos (por ejemplo los vehículos pesados) y otros vehículos es más significativa en los tramos con pendiente ascendente. Desde un punto de vista cuantitativo, resultó que el efecto de la pendiente es el mismo cuando los vehículos circulan por una pendiente ascendente que cuando lo hacen por una descendente, de hecho, las tasas de colisión son mayores en los túneles con mucha pendiente (en ambos sentidos). A partir de los resultados de estos análisis, se han determinado unos factores de corrección para estimar las tasas de colisión en función de la pendiente longitudinal. Por ejemplo, las tasas de colisión en un túnel con un 3 % de pendiente (ascendente o descendente) es 1,3 veces superior que en el caso de un túnel con una pendiente del 0 %. La siguiente tabla muestra cómo se modifica la tasa de colisión total (esto es, las colisiones con y sin víctimas) según la pendiente del túnel:

**TABLA 2: FACTORES DE CORRECCIÓN DE LA TASA DE COLISIÓN TOTAL SEGÚN LA PENDIENTE DEL TÚNEL**

Pendiente del túnel	Factor de corrección
0 %	1
±1 %	1,1
±2 %	1,2
±3 %	1,3
±4 %	1,4
±5 %	1,5

Se han planteado conclusiones adicionales a partir de las cifras calculadas y del análisis estadístico detallado:

- La tasa total de colisiones de vehículos pesados es 1,3 veces superior a la tasa total de colisiones para vehículos de pasajeros. Sin embargo, no se ha encontrado una influencia estadística significativa de la característica “vehículo pesado” en este resultado;
- De acuerdo a un análisis simple de las tasas de colisión (sólo colisiones con víctimas, incluyendo fallecidos) se ha encontrado que la tasa de colisión con víctimas es menor en túneles que a cielo abierto, tal y como indican las cifras de la tabla siguiente:

**TABLA 3: COLISIONES CON VÍCTIMAS: COMPARACIÓN ENTRE TÚNELES Y CARRETERAS A CIELO ABIERTO EN FRANCIA – PERIODO 2007 - 2011**

	Túnel	Carretera a cielo abierto
Tasas de colisión con víctimas (Número de colisiones con víctimas / $10^8$ veh-km)	6,35	13,7
Tasa de heridos (Número de heridos / $10^8$ veh-km)	6,86	16,4
Tasa de fallecidos (Número de fallecidos / $10^8$ veh-km)	0,21	0,76

La bibliografía citada relativa a estudios en Suiza, Italia, Austria y Francia muestra que se han obtenido resultados diferentes (algunos son coherentes entre sí, pero otros parecen ser contradictorios) y, como consecuencia, la influencia sobre las colisiones en túneles debida a los factores antes mencionados requiere aún un estudio más profundo. Los debates entre los expertos del grupo de trabajo durante la elaboración de este informe también pusieron de manifiesto que se debe ser cuidadoso al comparar y discutir resultados de diferentes estudios, porque los resultados están influenciados por muchos factores, tales como las condiciones y métodos para la adquisición de datos, la calidad y la exhaustividad de los datos, las definiciones y métodos

aplicados para el estudio así como aspectos nacionales específicos relevantes para la seguridad y gestión del tráfico.

La tabla siguiente aporta un resumen de los resultados y conclusiones más relevantes de los estudios mencionados, reflejando esta circunstancia:

<b>TABLA 4: RESUMEN DE RESULTADOS DE ALGUNOS ESTUDIOS SOBRE COLISIONES EN TÚNELES</b>				
<b>Factor de influencia</b>	<b>Salvisberg, 2004 [35] Suiza</b>	<b>Caliendo et al. 2014,[30], Italia</b>	<b>Nussbaumer et al. 2009 [34], Austria</b>	<b>CETU, 2015 [47], Francia</b>
Modo de tráfico: unidireccional o bidireccional	Los túneles unidireccionales muestran un riesgo de colisión menor	Solo se estudian los túneles unidireccionales	Los túneles unidireccionales muestran una tasa de colisión más alta que los túneles bidireccionales (basado en grupos de túneles de diferente longitud y volumen de tráfico medios)	Tanto la tasa de colisión con víctimas como la tasa total son más altas en los túneles unidireccionales que en los túneles bidireccionales (si se mantiene constante el resto de parámetros)
Densidad de tráfico (IMD)	Los túneles con una carga alta de tráfico muestran tasas de colisión más altas	La frecuencia de colisiones con víctimas aumenta con el IMD por carril		
Composición del tráfico	Un mayor número de vehículos pesados aumenta las consecuencias de las colisiones	La frecuencia de las colisiones con víctimas aumenta con el porcentaje de camiones		La tasa total de colisiones para vehículos pesados es 1,3 veces mayor que la tasa total para turismos (influencia a nivel estadístico, no significativa)
Zonas de los túneles			La tasa de colisión mayor se da en la zona de la boca del túnel, seguida por la zona de entrada, en la zona interior es significativamente menor.	La tasa de colisión total es mayor en la zona de la boca del túnel que en la zona central del mismo.
Longitud del túnel	Los túneles más largos muestran una tasa de colisiones menor	La frecuencia de colisiones con víctimas aumenta con la longitud del túnel	La tasa de colisión disminuye con la longitud del túnel (debido a la influencia de las tasas altas en la zona de la boca del túnel)	
Pendiente del túnel				La tasa total de colisión es mayor en túneles con una pendiente longitudinal alta.

**TABLA 4: RESUMEN DE RESULTADOS DE ALGUNOS ESTUDIOS SOBRE COLISIONES EN TÚNELES**

Factor de influencia	Salvisberg, 2004 [35] Suiza	Caliendo et al. 2014,[30], Italia	Nussbaumer et al. 2009 [34], Austria	CETU, 2015 [47], Francia
Sistemas electrónicos de control de velocidad		La instalación de un mayor número de sistemas electrónicos de control de velocidad parece tener efectos positivos en la reducción de las colisiones con el tiempo	La instalación de sistemas electrónicos de control de velocidad muestra efectos positivos en la frecuencia de las colisiones y en sus consecuencias	
Túneles y tramos de carreteras a cielo abierto		La tasa media de colisión en el caso de colisiones con víctimas es mayor en los túneles que en las autopistas donde éstos se ubican	La tasa de colisiones con víctimas es menor en los túneles que en los tramos de carreteras a cielo abierto	La tasa de colisiones con víctimas es menor en los túneles que en los tramos de carreteras a cielo abierto

Es necesario realizar nuevos estudios para adquirir un mayor conocimiento sobre las colisiones en túneles (especialmente la interacción entre los diferentes parámetros que influyen en las mismas). Para proporcionar una base adecuada a dichos estudios, hay que definir los requisitos específicos para la toma de datos en las colisiones en los túneles, englobando tanto el propio incidente como las condiciones del entorno y los parámetros con influencia mencionados.

### 3.4. TOMA DE DATOS RELATIVA A LAS COLISIONES EN TÚNELES

En función de la relevancia de una colisión, los objetivos de la toma de datos, el uso posterior de los mismos y la cantidad de datos a registrar pueden variar considerablemente. La lista desarrollada a continuación podría considerarse como la lista más completa de los datos que pueden registrarse en relación con una colisión, y puede ser utilizada en todo tipo de aplicaciones. Para la definición del alcance de los datos a recoger en la práctica, hay que acudir al [capítulo 2 2](#) (al [punto 2.5](#) en particular), donde se analizan aspectos prácticos relevantes y diversas limitaciones. También se hace referencia aquí a un conjunto de datos mínimos a utilizar como base del análisis de riesgo, a modo de ejemplo de toma de datos para una aplicación específica.

#### Información general

- Nombre y código de identificación (si existen) del túnel.
- Tiempo (fecha/hora): del suceso y de su detección, duración del suceso, hora de retorno a la situación normal de circulación.
- Localización: tubo, sentido de la marcha de los vehículos implicados, localización en la carretera, carril de circulación, carril de emergencia (o arcén), estructuras singulares en las proximidades del suceso, etc. Con el fin de registrar las distintas condiciones de conducción, se recomienda la adopción de un sistema previamente definido de zonificación del túnel y localizar el accidente según el mismo. En el [apéndice 3.1](#) del presente informe se presenta una lista de sistemas de zonificación de túneles. Cabe destacar que la definición de sistema de zonificación varía de un país a otro. Esto hace que sea difícil comparar los resultados entre los diferentes países.

### Descripción del túnel e información sobre el tráfico

- Descripción del túnel: en la mayor parte de los casos no es necesaria una descripción detallada del túnel, ya que dicha información puede extraerse de la base de datos correspondiente. Se necesita una breve descripción de sus características estructurales y geométricas, como longitud, pendiente, carriles de emergencia, apartaderos,..., particularmente en las proximidades del suceso, y las medidas específicas de seguridad puestas en marcha (prevención - atenuación - respuesta en caso de emergencia).
- Descripción de la carretera: número de carriles, trazado en planta, pendiente, principales instalaciones de seguridad, límite de velocidad, etc.
- Superficie de la calzada en las proximidades del suceso: tipo (hormigón asfáltico antideslizante, hormigón antideslizante, asfalto u hormigón), estado.
- Señalización y marcas viales de la carretera y del túnel: disponibilidad, estado, localización.
- Datos de tráfico característicos (IMD, composición del tráfico, en concreto el porcentaje de vehículos pesados, etc.) características específicas del tráfico (en particular, la congestión), situación del tráfico antes y durante el evento.

### Descripción de la colisión

- Identificación de la colisión (por ejemplo, mediante un sistema numérico unívoco) y/o descripción del tipo de colisión. Se recomienda utilizar un sistema estandarizado con el fin de evitar, en la medida de lo posible, las descripciones verbales arbitrarias. La clasificación o descripción del accidente se debería basar solamente en lo que se observa y no en lo que se considera que es la causa inicial. La base del sistema de estandarización (o de la libre descripción, si no se adopta dicho sistema), para la clasificación de colisiones debería tener en cuenta diversos aspectos de los componentes que describen el evento. Los aspectos que deberían ser respondidos por el sistema de clasificación serían:
  - Vehículos implicados en el accidente: vehículo de mercancías peligrosas / sin vehículos de mercancías peligrosas / ninguno.
  - Consecuencias para la vida humana y la salud: sí/no.
  - Daños importantes en la infraestructura del túnel, en instalaciones o en el equipamiento: sí/no.
  - Daños importantes en los vehículos o las pertenencias: sí/no.
  - Daños al medio ambiente: sí/no.
  - Situación: incendio / colisión de vehículo(s) / avería en vehículo / avería en la estructura / condiciones meteorológicas / nivel de iluminación insuficiente / presencia de peatones / presencia de ciclistas / presencia de objetos.
  - Tipo de colisión: impacto frontal / impacto en parte posterior / impacto lateral / colisión por roce / colisión con un solo vehículo implicado.
- Consecuencias del accidente: número de personas con heridas leves, número de personas con heridas graves, número de fallecidos, daños a la estructura del túnel o a las instalaciones o al equipamiento, daños a vehículos, daños a terceros, daños indirectos o pérdidas, daños de valor inmaterial (como puede ser la pérdida de la buena reputación), daños al medio ambiente. Los daños antes mencionados deben acompañarse de una descripción detallada y, si es posible, de una estimación de sus consecuencias económicas.
- Superficie de la calzada en las proximidades del suceso: condiciones reales (por ejemplo: con nieve, mojada, con hielo, capas de hielo, superficie deslizante...).
- Condiciones de visibilidad: niebla, humo, polvo, partículas en suspensión, iluminación inadecuada.
- Condiciones ambientales: seco, niebla, lluvia, nieve, viento, estalactitas, niebla helada, concentración anormal de gas.

- Existencia de trabajos en la carretera: (construcción, mantenimiento, etc.).
- Obstáculos en la superficie de la calzada.
- Suceso grabado: por circuito cerrado de TV (CCTV), bucles de inducción, detección automática de incidentes, otros medios.
- Uso de las instalaciones de seguridad: apartaderos, naturaleza y uso de las salidas de emergencia.
- Uso y activación del equipamiento de seguridad: sistema de ventilación, barreras, balizas, comunicación por radio, interrupción de la emisión de radio comercial y difusión de mensajes específicos de seguridad, información proporcionada a los usuarios.
- Fallos de las instalaciones del túnel (número y origen de los fallos).
- Principales causas del accidente: velocidad, adelantamiento, preferencia, avería, etc.
- Intervención de los servicios de emergencia.
- Momento exacto de alarma y de aviso a los servicios exteriores de emergencia implicados y, si los hay, a los internos.
- Momento exacto de la intervención de los servicios implicados (p. ej. bomberos, policía de tráfico, ambulancias).
- Se recomienda encarecidamente que se registre la secuencia exacta de los acontecimientos.

#### **Descripción del conductor (o conductores) y del vehículo (o vehículos)**

El tratamiento de los datos personales debe cumplir con la normativa y restricciones legales.

- Datos del conductor: categoría del permiso de conducir, experiencia, sexo, edad, nacionalidad, nivel de formación.
- Impedimentos del conductor: alcohol, drogas, otros.
- Condiciones del conductor: alerta, cansado, impulsivo, indisposición súbita, suicida.
- Uso de dispositivos de protección: casco, cinturón de seguridad, asiento de seguridad infantil.
- Número de matrícula (si no está prohibido por la ley registrarlo).
- Tipo y número de vehículo(s) implicado(s). Para evitar descripciones arbitrarias en la descripción del tipo de vehículo, se recomienda el uso de sistemas de clasificación prescritos para la categorización de vehículos. Estos sistemas de categorización se definen, por ejemplo, en dos directivas europeas (2002/24/EC del 18 de marzo de 2002 y 2007/46/EC del 5 de septiembre de 2007)
- Operador del vehículo: privado, comercial, transporte público.
- Año de fabricación del vehículo.

#### **Comportamiento de las personas involucradas**

- Descripción y análisis del comportamiento de los usuarios del túnel implicados en el accidente, ya sea mediante la grabación del sistema CCTV, entrevistas, testigos o cualquier otro medio fiable.
- Descripción y análisis del comportamiento del explotador del túnel.
- Descripción y análisis del comportamiento de los servicios de emergencia.

Desde el punto de vista de la evaluación de datos con el fin de establecer la información cuantitativa y los datos de entrada para el análisis de riesgo, puede definirse el siguiente conjunto mínimo de datos:

**Información general**

- Nombre y código de identificación, si procede, del túnel.
- Instante (fecha/hora): hora del suceso y de la detección del accidente.
- Localización: tubo, sentido de circulación de los vehículos implicados, localización en la carretera, zona del túnel, carril del tráfico, carril de emergencia (o arcén), estructuras singulares en la proximidad del evento, etc.

**Descripción del túnel e información sobre el tráfico**

- Descripción del túnel: breve descripción de las características geométricas y estructurales del túnel, (longitud, pendiente, carriles de emergencia, apartaderos) particularmente en las proximidades del suceso y las medidas específicas de seguridad puestas en marcha.
- Descripción de la carretera: número de carriles, trazado en planta, pendiente, principales instalaciones de seguridad, límite de velocidad (prevención - atenuación - respuesta en caso de emergencia).
- Señalización y marcas viales de la carretera y del túnel: disponibilidad, estado, localización.
- Datos de tráfico característicos (IMD, composición del tráfico, en concreto el porcentaje de vehículos pesados, etc.) características específicas del tráfico (en particular, la congestión), situación del tráfico antes y durante el evento.
- Normativa para el transporte de mercancías peligrosas (régimen, clasificación según ADR).

**Descripción de la colisión**

- Identificación de la colisión (por ejemplo, mediante un sistema numérico unívoco) y/o descripción del tipo de colisión.
- Consecuencias del accidente: número de personas con heridas leves, número con heridas graves, número de fallecidos, daños a la estructura del túnel o a las instalaciones o al equipamiento, daños a vehículos, daños a terceros.
- Existencia de trabajos en la carretera: (construcción, mantenimiento, etc.).
- Obstáculos en la superficie de la calzada.
- Suceso grabado: por circuito cerrado de TV (CCTV), bucles de inducción, detección automática de incidentes, otros medios.
- Uso de las instalaciones de seguridad: apartaderos, naturaleza y uso de las salidas de emergencia.
- Uso y activación del equipamiento de seguridad: sistema de ventilación, barreras, balizas, comunicación por radio, interrupción de la emisión de radio comercial y difusión de mensajes específicos de seguridad (información proporcionada a los usuarios).
- Principales causas del accidente: velocidad, adelantamiento, preferencia, avería, etc.
- Intervención de los servicios de emergencia.
- Momento exacto de alarma y de aviso a los servicios exteriores de emergencia implicados y, si los hay, a los internos.
- Momento exacto de la intervención de los servicios implicados (p. ej. bomberos, policía de tráfico, ambulancias).
- Se recomienda encarecidamente que se registre la secuencia exacta de los acontecimientos.

**Descripción del conductor (o conductores) y del vehículo (o vehículos)**

- Tipo y número de vehículo(s) implicado(s).

Para establecer conclusiones sobre la gestión de la colisión a nivel del túnel, puede ser necesaria información adicional.

### 3.5. TASAS DE COLISIÓN

La tasa de colisión ( $C_R$ , del inglés colision rates) considerada en este informe se aplica solo a accidentes con víctimas y se define como el número de colisiones con víctimas al año dividido por el número de kilómetros recorridos en el túnel por los usuarios del mismo (expresado en cientos de millones de vehículos-kilómetro).

$$C_R = \frac{CCV}{365 \times L \times IMD} \times 10^8 \left[ \frac{\text{colisiones con víctimas}}{10^8 \text{ vehículos} \times \text{kilometro}} \right]$$

Donde:

IMD: Intensidad Media Diaria en un túnel concreto (vehículos/día)

CCV: Número anual de colisiones con víctimas que ocurrieron en el túnel (colisiones/año)

Colisiones con víctimas (CCV) son aquellas colisiones que han causado al menos una persona herida o un fallecido.

L: Longitud del tubo (km)

La fórmula anterior se refiere a un solo túnel. En el caso de un conjunto de túneles, la fórmula debe modificarse como sigue:

$$C_{Rn} = \frac{NAC_n}{365 \times \sum_i^n (L_i \times TMJA_i)} \times 10^8$$

Donde:

$C_{Rn}$ : La tasa de colisión para un conjunto de n túneles.

CCVn: Número anual de colisiones con víctimas (personas heridas y/o fallecidos) en el conjunto de n túneles (colisiones/año).

$L_i$ : Longitud del túnel i (km).

IMDi: Promedio anual del tráfico diario en el túnel i (vehículos/día).

Las tasas de colisión utilizadas en el marco de este informe se basan exclusivamente en la información disponible de primera mano por los miembros del grupo de trabajo encargados de esta tarea. Para una información más específica, se invita al lector a consultar el [anexo 3.2](#), que contiene los valores tomados como base y su contexto.

Los túneles unidireccionales y bidireccionales se estudian de forma separada para tener en cuenta sus diferentes características y para permitir la evaluación de si estas diferencias conllevan tasas de colisión distintas.

Con los datos incluidos en el [apéndice 3.2](#), es posible calcular la tasa media de colisión en los túneles de carreteras de algunos países. Estas tasas no son necesariamente representativas de todos los túneles de dicho país, sino que representan tan sólo un ejemplo.

**TABLA 5: TASAS DE COLISIÓN MEDIAS ( $C_R$ ) PARA TÚNELES DE CARRETERA EN VARIOS PAÍSES (COLISIONES CON VÍCTIMAS)**

País	Tipo de tráfico	Tasa de accidente ( $C_R$ ) (por $10^8$ veh km)	
Austria	bidireccional	3,6	*
Argentina	bidireccional	5,74	**
Francia	bidireccional	5,30	***
Noruega	bidireccional	11,72	****
España	bidireccional	9,30	*****
Vietnam	bidireccional	71,98 (18,00)	*****
		Tasa de accidente ( $C_R$ ) (por $10^8$ veh km)	
Austria	unidireccional	9,80	*
Dinamarca	unidireccional	3,97	
Francia	unidireccional	8,72	***
Italia	unidireccional	12,02	
Holanda	unidireccional	5,35	
Noruega	unidireccional	11,60	****
Corea del Sur	unidireccional	2,10	
España	unidireccional	6,30	*****
Suiza	unidireccional	7,58	*****

\* Las cifras no se han calculado en este informe, sino que se han obtenido del informe de Seguridad en los Túneles de Carretera - Seguridad del tráfico en túneles de autovías y autopistas (de 1999 a 2009) [34]

\*\* Las tasas de accidente presentadas para Argentina cubren solamente un túnel (Túnel Subfluvial Uranga-Sylvestre Begnis) [47]

\*\*\* Las cifras no se han calculado en este informe, sino que se han obtenido del informe [47]

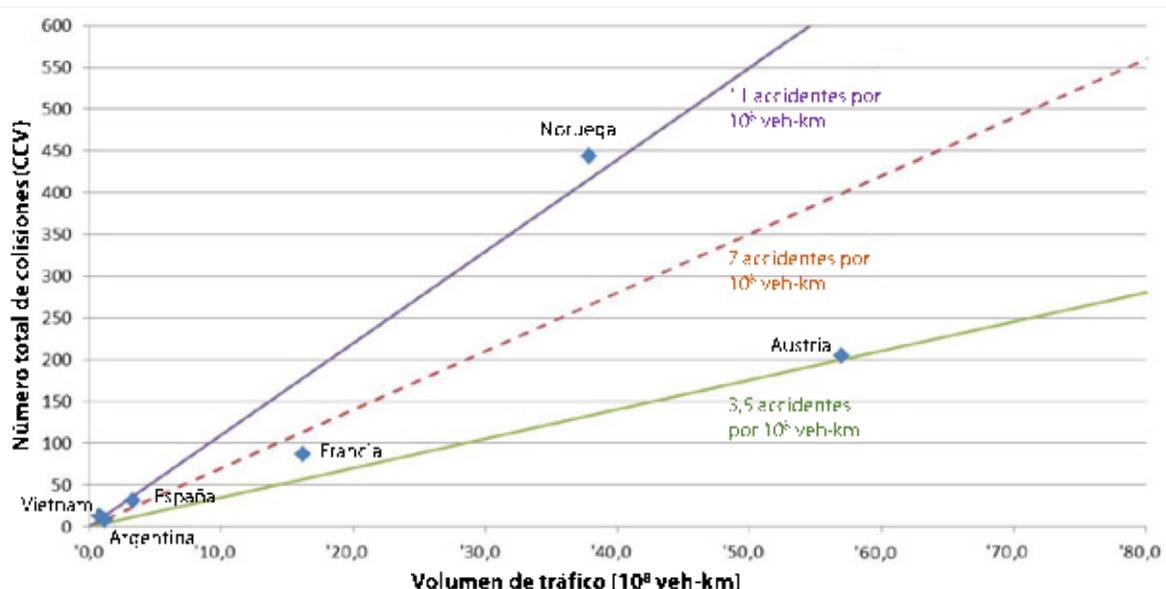
\*\*\*\* Las cifras se derivan del informe "Estudios en túneles de carretera de Noruega II. Un análisis sobre incidentes de tráfico en túneles de carretera 2001-2006" [29]

\*\*\*\*\* La tasa de accidentes mostrada para Vietnam cubre sólo un túnel (Hai Van Tunnel), la tasa de accidentes incluye todas las colisiones – también aquellas sin víctimas; el número entre paréntesis da una estimación de la tasa de accidentes con víctimas (reducción por un factor 4 – basado en un dictamen de expertos); este número se incluye en la *ilustración 6*

\*\*\*\*\* Las cifras no se han calculado en este informe, sino que se han obtenido del informe [52]

\*\*\*\*\* La tasa cubre todos los túneles Suizos (principalmente túneles unidireccionales) como lo indicado en [42]

Datos de referencia para las tasas de accidente, ver el *apéndice 3.2, tabla 11 y tabla 12*.



*Ilustración 6: número total de colisiones, reflejadas en los registros, en función del tráfico, para varios países – líneas de referencia para las tasas de colisión en túneles bidireccionales*

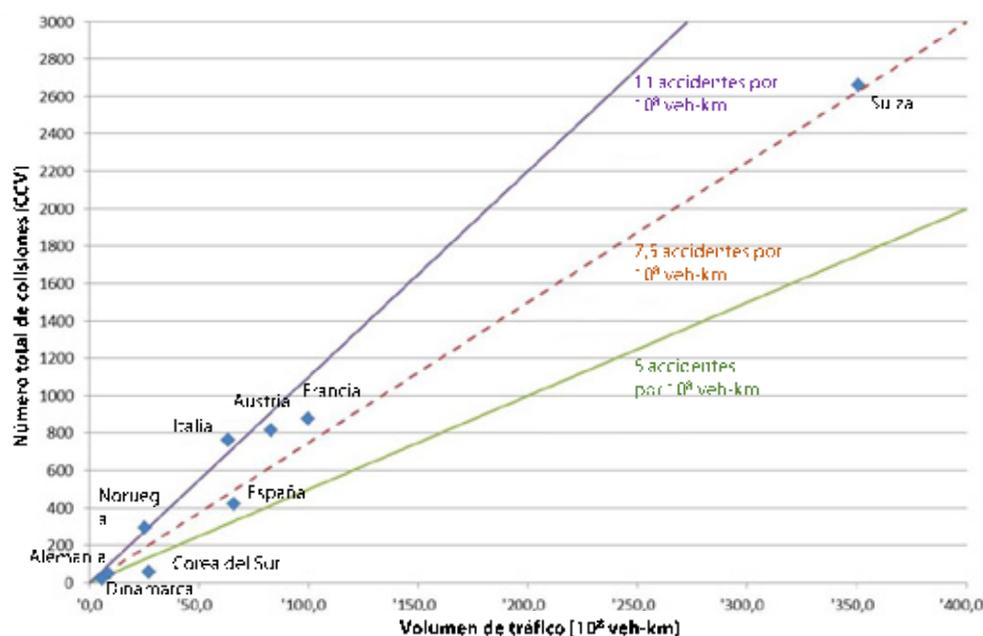


Ilustración 7: número total de colisiones, reflejadas en los registros, en función del tráfico, para varios países – líneas de referencia para las tasas de colisión en túneles unidireccionales

La tasa media de colisión ( $C_R$ ) de los diferentes países varía entre 2 y 12 en túneles unidireccionales y entre 3 y 18 en los bidireccionales. Estas diferencias no pueden atribuirse exclusivamente a los diferentes parámetros de seguridad en carretera (por ejemplo, el comportamiento de los conductores o los estándares técnicos de los vehículos) o a parámetros del túnel y el tráfico (como la geometría del túnel, su equipamiento de seguridad, IMD, etc.) sino también a diferentes factores de adquisición de datos (como métodos de registro y evaluación, el tamaño y exhaustividad de la información, el número y la longitud de los túneles investigados, el periodo de monitorización). En los párrafos siguientes se exponen algunos ejemplos.

Las tasas de colisiones que se presentan en la *tabla 5*, por ejemplo, se calcularon sobre la base de estadísticas que cubren un período de tiempo determinado, el cual difiere de un país a otro. Al evaluar los datos se observó que en los registros que cubren un período de tiempo más largo, las tasas de accidentes disminuyen con el tiempo. Por lo tanto, las tasas presentadas en la *tabla 5* muestran el valor promedio durante el período registrado. Las razones de este efecto no se han abordado y por lo tanto, este hecho no se trata en detalle en este informe. En esta etapa del estudio no está claro en qué medida la disminución de las tasas de colisiones con heridos es debida a un aumento general de la seguridad del tráfico o a los esfuerzos concretos realizados para aumentar la seguridad de los túneles.

Por otra parte, las estadísticas sobre las tasas de colisiones cubren diferentes tipos de túneles; por ejemplo, en Austria e Italia los datos se refieren únicamente a túneles de autopistas, mientras que en Noruega se incluyen todos los tipos de túneles. Por otra parte, la norma de equipamiento de los túneles en muchos túneles de Noruega es muy diferente a otros países, ya que en Noruega muchos túneles se encuentran en zonas muy remotas.

Las tasas de colisión de Francia y Austria ( $C_R$ ) muestran que los túneles bidireccionales tienen valores menores que los unidireccionales. En Austria, la tasa de colisión de 9,8 accidentes por 100 millones de vehículos y kilómetro para los túneles unidireccionales, es aproximadamente 2,7 veces mayor que la de los túneles bidireccionales (3,6). En Francia la tasa de colisión de 8,72 accidentes por 100 millones de vehículos y kilómetro para los túneles unidireccionales es

aproximadamente 1,6 veces mayor que la de los túneles bidireccionales (5,3). A primera vista esto parece contradictorio con lo que dicta el sentido común y la experiencia. Sin embargo, el estudio del contexto en el que se han calculado estas tasas puede arrojar algo de luz.

- Los túneles bidireccionales en Francia y Austria son mucho más largos que los unidireccionales. En el estudio [34] de Austria, la longitud media de los primeros es significativamente mayor (4,2 km) que la de los túneles unidireccionales (1,25 km). De media, los túneles bidireccionales son tres veces más largos que los unidireccionales. En este estudio de Austria, la  $C_R$  más alta se situaron en la zona de la boca del túnel seguida por la zona de entrada, mientras que la zona interior muestra una tasa de accidente significativamente menor. Teniendo en cuenta que un porcentaje considerable de accidentes ocurren en las zonas de entrada y de salida (de longitud fija, igual para ambos tipos de túneles) las tasas calculadas para el conjunto de túneles están muy influenciadas por esta circunstancia, por lo que resultan tasas menores para túneles más largos (como es el caso de los bidireccionales).
- Los túneles unidireccionales proporcionan una mayor sensación de seguridad a los usuarios, pues no hay vehículos transitando en sentido opuesto. Por ello, los usuarios del túnel unidireccional pueden mostrar un comportamiento de menor precaución, (por ejemplo, conducir demasiado deprisa). En el estudio austríaco, las principales causas resultaron ser errores de conducción o distracciones.
- También podría existir cierta influencia del volumen del tráfico. En Austria, el volumen de tráfico (por carril) es menor en los túneles bidireccionales, lo que se reflejaría en una menor exposición a las colisiones comparado con los unidireccionales. Sin embargo, esto no parece ser una explicación válida según el estudio francés. El estudio ha demostrado que la tasa de accidente es mayor en los túneles unidireccionales sea cual sea el volumen del tráfico.

Las tasas de colisión mostradas representan los valores medios de ciertos conjuntos de túneles. Si estas tasas promedio se consideran como la única salida del procesado estadístico de los datos, se puede enmascarar información importante. Una simple lectura de los valores medios no aporta información alguna sobre la influencia de los parámetros anteriormente mencionados que podrían tener una influencia significativa en los valores de las tasas de colisión. Para tener en cuenta esta influencia, en Austria, por ejemplo, las tasas de colisiones promedio, cuando se utilizan en el análisis de riesgo, se adaptan a los túneles concretos aplicando unos factores de corrección que dependen de la longitud del túnel y del valor del tráfico en el túnel que se investiga. Aunque la longitud del túnel y la densidad del tráfico son los parámetros de influencia más obvios, puede haber otros que también influyan en las tasas de accidentes de los túneles (ver lista en el capítulo 3.3). Por ello puede considerarse aún un reto el comparar estadísticamente las tasas de accidentes sin conocer las condiciones concretas en que se producen. A pesar de algunos estudios recientes sobre ello, existen muchas lagunas sobre la interacción entre los diversos parámetros que influyen en estas tasas de accidentes.

Para un estudio detallado de la seguridad de túneles de carretera, se pueden calcular y usar tasas concretas de accidentes basándose en la fórmula anterior. Los elementos de interés particular en la seguridad pueden ser subrayados y acentuados con tasas específicas de accidentes. Estas tasas concretas pueden corresponderse con diferentes zonas del túnel, o diferentes periodos de tiempo, por grupos de conductores o por tipo de coches implicados, se pueden referir a determinadas características geométricas (por ejemplo, zonas de diferente pendiente longitudinal), a tipos concretos de accidentes, etc.

En cuanto al periodo de análisis, puede considerarse aun válido el planteamiento descrito en el informe de PIARC 05.04.B 1995 Road Safety in Tunnels ("*Seguridad en túneles de carretera*") [8] (*capítulo IV.1* - Comentarios generales IV1.1). El periodo de análisis y el número de sucesos son factores esenciales para las tasas registradas. Cuando se considera un solo túnel, una colisión más o menos puede suponer un gran cambio. En general, los cálculos de las tasas de colisión basados en un gran número de sucesos pueden suministrar una estimación más precisa del valor que realmente subyace. En cambio, los cálculos basados en un número pequeño de observaciones pueden fluctuar radicalmente de año en año, o diferir considerablemente de un túnel a otro, incluso cuando las diferencias, a simple vista, no parecen significativas. No obstante estas diferencias y sus valores son muy importantes dado que los cálculos de las tasas de accidente están basados en pequeñas muestras.

En nuestra opinión, sería pertinente considerar un periodo de análisis de al menos 5 años en las zonas urbanas (mucho tráfico) y de 7 a 10 años en zonas interurbanas (bajo y medio tráfico), de modo que los datos puedan ser más significativos desde un punto de vista estrictamente estadístico.

### 3.6. APLICACIÓN DE LOS DATOS

La disponibilidad y la accesibilidad de datos actualizados sobre colisiones en túneles de carretera son fundamentales para una gestión eficaz de la seguridad en estas infraestructuras. Estos datos tienen diferentes usos y se incorporan de diversas formas al sistema de gestión de la seguridad en función de múltiples factores como son la estructura de dicho sistema, los requisitos y obligaciones legales y normativas, la disponibilidad y exhaustividad de los diversos datos, las preferencias y prioridades de la sociedad, etc. Los usos más frecuentes de los datos sobre colisiones son:

- Proporcionar información de partida para la aplicación del análisis de riesgo en túneles de carretera: los datos, junto con su procesamiento estadístico y otra información adicional, constituyen la base de aplicación de la metodología del análisis de riesgo que permite la estimación cuantitativa de los riesgos en los túneles. Los principales datos de entrada dependen mucho de la metodología del análisis de riesgos y sus requisitos. En consecuencia, un determinado método de análisis de riesgo cuantitativo requiere como entrada las tasas de colisión para todos los tipos de colisiones posibles y las consecuencias correspondientes. Pero algunos métodos de análisis cualitativos, como un análisis de escenarios, también necesitan datos sobre las colisiones para poder seleccionar las situaciones más representativas y elegir parámetros de entrada fiables, tales como el tiempo de respuesta, el tiempo para llevar a cabo el cierre del túnel, etc. El nivel de exhaustividad de los datos de colisiones está directamente relacionado con la complejidad, el detalle y los requerimientos de la metodología de análisis de riesgos aplicable. La fiabilidad y la incertidumbre de los resultados del análisis de riesgos dependen en gran medida de los datos de entrada sobre colisiones. Cuando esos datos se aplican como entradas para el análisis, se debe poner mucho cuidado en las condiciones concretas utilizadas en la creación de esa base de datos. Antes de poder aplicar datos sobre colisiones a un análisis de riesgos para un túnel concreto, se debe evaluar si las condiciones de dicho túnel son comparables y realizar ajustes si fuera necesario. Aún más, las tasas de colisión aquí indicadas representan generalmente valores básicos que se deben ajustar al menos respecto a los parámetros que más influyen (como la longitud del túnel y la densidad del tráfico, el trazado en planta, la pendiente del túnel, la existencia de cruces o de otras configuraciones subterráneas complejas) para que

representen tasas aplicables de colisión en el túnel concreto objeto de análisis. El estudio holandés "*Recomendaciones sobre las probabilidades de incidentes*" [36], por ejemplo, trata específicamente sobre la introducción de datos de incidentes dentro del proceso de análisis de riesgos. La frecuencia de incidentes es un valor importante de entrada en el método cuantitativo de análisis de riesgos holandés. Se pueden utilizar los datos estadísticos actuales para los túneles existentes; sin embargo, para los nuevos o para los que se van a construir, debe realizarse una estimación. Con el fin de proporcionar al analista de riesgo los mejores datos para la estimación de la frecuencia de colisiones, en dicho estudio se investigó la relación (cuantitativa) entre el tráfico y las características de diseño del túnel/carretera y la frecuencia de las colisiones. Basándose en la investigación de la documentación existente y en el criterio de los expertos, se determinaron unos factores de corrección para la frecuencia básica de accidentes en 15 casos, que ajustaban dicha frecuencia en función del número de carriles de tráfico, la anchura de los mismos, la longitud del túnel, el porcentaje de vehículos pesados, la intensidad del tráfico, etc. Los resultados se comprobaron comparando los datos de salida del programa con la frecuencia de accidentes reales en los 17 túneles estatales. Se comprobó así que los resultados del programa se mantenían dentro de un mismo rango de valores que la frecuencia real de accidentes confirmando la fiabilidad del método utilizado. Otro aspecto a considerar cuando se introducen datos de colisiones en el análisis de riesgo, es la proyección de estos datos hasta el momento para el que se realiza el análisis. Este punto se encuentra fuera del objeto de este informe.

- También en otros países (p. ej. en Austria [43] y en Suiza [42]) la información y los datos derivados de las estadísticas nacionales o internacionales (como las tasas de incidentes y los parámetros más relevantes) se implementan en los respectivos modelos de riesgo en túneles.
- Para elaborar un análisis detallado del suceso y el desarrollo de un accidente concreto: aplicando un planteamiento basado en escenarios, se pueden estudiar las actuaciones de los diferentes agentes implicados (personal de explotación, responsable de seguridad, gestor del túnel, equipo de seguridad interno o externo, personal de mantenimiento, etc.) y la efectividad de las instalaciones de seguridad. El propósito es valorar la calidad y la efectividad de las acciones llevadas a cabo por los diferentes equipos implicados (respuesta, coordinación, gestión, aplicación y aplicabilidad de procedimientos y provisiones de los Planes de actuación ante emergencias, etc.) y la pertinencia y rendimiento del equipamiento y las instalaciones de seguridad y de los procedimientos utilizados, con el fin de descubrir cualquier "punto negro" o una frecuencia elevada de determinados tipos de colisión en el túnel considerado. Por ejemplo, el aumento de las tasas de colisión por alcance puede indicar una baja percepción de las distancias y se debe actuar para mejorar esta percepción (por ejemplo utilizando señalización de balizamiento LED). Esto puede ser el punto inicial de un estudio específico sobre un problema que se ha identificado, por ejemplo para elaborar una base de datos estadística para un túnel concreto o para un grupo de túneles (tasas de incidente, uso de equipamiento, etc.).
- Para identificar una forma inapropiada y repetitiva de conducción en el túnel, lo que permite ofrecer así la oportunidad de implementar medidas de supervisión específicas, mejorar la formación de los conductores o de lanzar campañas de información y folletos al respecto

Por consiguiente, la recopilación y valoración de los datos sobre accidentes en túneles se aplican en dos niveles:

- Aplicación a nivel local (a nivel de un túnel concreto): constituye una base importante para valorar la aceptabilidad de la seguridad real o prevista de un túnel concreto y también sirve de ayuda en el proceso de toma de decisiones para conseguir mejoras generales en la seguridad del mismo. Además, la valoración de los accidentes ocurridos en un túnel concreto puede hacer que se detecten deficiencias en su infraestructura, equipamiento, señalización, respuesta ante emergencias, etc. y proponer e implementar medidas apropiadas para su mejora.
- Aplicación a nivel nacional e internacional: proporciona la base para establecer un marco de trabajo de referencia que ayude a las autoridades a establecer y adaptar sus políticas de seguridad (relativa a los túneles como elemento específico de todo el sistema de carreteras). En particular, permite cuantificar la frecuencia y las consecuencias de los sucesos críticos que pueden poner en peligro la vida de los usuarios, valorar la efectividad de las instalaciones de seguridad y, posiblemente, también comparar el nivel de seguridad en un túnel concreto en relación a los niveles nacionales o internacionales. La valoración de los accidentes a nivel de red de carreteras permite obtener las principales tasas de incidentes para los diferentes tipos de túneles, proporcionando así datos (estadísticas nacionales para tipos específicos de túneles) para el análisis de riesgos de túneles en fase de diseño, o en operación pero sin suficientes datos concretos. En base a ello, se pueden priorizar las medidas de mejora y otros aspectos relevantes (parámetros financieros y/o de explotación). Esta valoración general se puede completar con análisis específicos, entre otras cosas para estudiar las colisiones que suceden en un punto determinado del túnel (p. ej. en apartaderos) o la influencia de tipos concretos de equipamiento (como los diferentes sistemas de iluminación de los túneles).

Se puede encontrar información general sobre labores de investigación de incidentes en carretera en el informe técnico de PIARC 2013R07 "*Road accident investigation guidelines for road engineers*" (Análisis de los accidentes de carretera, directrices para los ingenieros de caminos) [40].