

# Fundamentos de seguridad en túneles vehiculares

Aplicación al caso del proyecto de  
ampliación de capacidad y mejoras de  
seguridad en los accesos al paso de  
frontera Cristo Redentor (Argentina-Chile)

Juan Emilio Rodríguez  
Edgar Zamora  
Reinaldo Fioravanti

División de Transporte

NOTA TÉCNICA N°  
IDB-TN-01692

# Fundamentos de seguridad en túneles vehiculares

Aplicación al caso del proyecto de ampliación de capacidad y mejoras de seguridad en los accesos al paso de frontera Cristo Redentor (Argentina-Chile)

Juan Emilio Rodríguez  
Edgar Zamora  
Reinaldo Fioravanti

Octubre 2019

Catalogación en la fuente proporcionada por la  
Biblioteca Felipe Herrera del  
Banco Interamericano de Desarrollo

Rodríguez, Juan Emilio.

Fundamentos de seguridad en túneles vehiculares: aplicación al caso del Proyecto de Ampliación de Capacidad y Mejoras de Seguridad en los Accesos al Paso de Frontera Cristo Redentor, Argentina-Chile / Juan Emilio Rodríguez, Edgar Zamora, Reinaldo Fioravanti.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 1692)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Tunnels-Security measures-Chile. 2. Tunnels-Security measures-Argentina. 3. Tunnels-Chile-Design and construction. 4. Tunnels-Argentina-Design and construction. I. Zamora, Edgar. II. Fioravanti, Reinaldo. III. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Transporte. IV. Título. V. Serie. IDB-TN-1692

Códigos JEL: R41, L91

Palabras clave: túneles, seguridad vial

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2019 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



## **Agradecimiento**

Los autores agradecen especialmente a Juan Manuel Leño (Especialista Principal de Transporte) y Carolina Benítez (Consultora de Transporte) de la Representación del BID en Argentina, por su apoyo en la recolección de la información utilizada en este documento.

## Abreviaturas

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinámica Computacional de Fluidos)
CIE	<i>Commission Internationale de l'Eclairage</i> (Comisión Internacional de la Iluminación)
DAI	Detección Automática de Incidentes
IIRSA	Iniciativa para la Integración de la Infraestructura Regional Suramericana
ITS	<i>Intelligent Transport Systems</i> (Sistemas Inteligentes de Transporte)
kW	Kilowatts
LED	<i>Light-emitting diode</i> (diodo emisor de luz)
MW	Megawatts
PCR	Paso Cristo Redentor
PIARC	Asociación Mundial de la Carretera
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> (Controlador Lógico Programable)
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> (Supervisión, Control y Adquisición de Datos)
TCR	Túnel Cristo Redentor

## Contenido

Presentación .....	5
Primera Parte: Conceptos de seguridad en túneles vehiculares .....	6
1. Introducción .....	7
2. Siniestros en túneles .....	8
3. Elementos generales de seguridad en túneles vehiculares .....	9
3.1. Seguridad vial.....	15
3.1.1. <i>Recopilación de datos de incidentes y siniestros</i> .....	16
3.1.2. <i>Estadísticas de los incidentes y siniestros</i> .....	17
3.2. Características geométricas y de diseño .....	19
3.3. Iluminación .....	24
3.4. Tecnologías ITS para túneles .....	27
3.5. Comportamiento del túnel frente al fuego .....	30
3.6. Emisiones y ventilación en túneles .....	31
3.7. Operación del túnel.....	32
3.8. Renovación y modernización de túneles antiguos .....	34
3.9. Comportamiento humano asociado al trazado de túneles .....	38
3.10. Normativa internacional .....	38
3.10.1. <i>Directiva europea</i> .....	38
3.10.2. <i>Normativa española</i> .....	39
3.10.3. <i>Normativa argentina y del Mercosur</i> .....	40
3.10.4. <i>Otras normativas relacionadas a túneles</i> .....	40
Segunda Parte:.....	42
Elementos de ingeniería y seguridad en los túneles del Paso Cristo Redentor.....	42
1. El Paso Cristo Redentor .....	43
2. El proyecto .....	47
2.1. Conceptualización técnica.....	47
2.2. Galerías de interconexión.....	50
2.3. Sección funcional de las galerías .....	52
2.4. Centros de transformación.....	56
2.5. Acceso a los portales.....	57

<b>2.6. Equipamientos de seguridad.....</b>	<b>60</b>
<b>2.7. Seguridad vial del túnel Cristo Redentor.....</b>	<b>68</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>73</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>75</b>

# Presentación

---

Este documento recopila los conceptos generales sobre seguridad operativa en túneles vehiculares, con el propósito de orientar a quienes deban abordar la elaboración del proyecto de una nueva estructura de esta naturaleza, o bien se encuentren llevando a cabo planes de re-funcionalización de túneles en operación.

En la primera parte del documento se presentan los principios fundamentales de seguridad operativa en túneles con base en la experiencia y normas internacionales, pero principalmente en el Manual de Túneles desarrollado por la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC) [1], el cual fue elaborado con el aporte de reconocidos expertos de todo el mundo en la materia. Además, se ha considerado la normativa española por cuanto recoge las mencionadas experiencias y normativas europeas en materia de seguridad en túneles viales. En el documento no se incluyen los procedimientos y protocolos de la fase constructiva de estas estructuras, pues como se ha indicado anteriormente, se concentra en las medidas de seguridad durante su fase operativa o de servicio.

En la segunda parte se presentan los detalles de ingeniería de las mejoras previstas en el proyecto para la re-funcionalización de los túneles del Corredor Paso Cristo Redentor, y se trata de hacer una comparativa entre la solución técnica adoptada para el proyecto y las recomendaciones de la normativa internacional que se presentan en la primera parte.



**Primera Parte:**

# **Conceptos de seguridad en túneles vehiculares**

---

## 1. Introducción

Los túneles tienen por función sortear obstáculos naturales, generalmente una montaña, y permitir el paso de agua, personas, vehículos y carga a través de ellos, sin perturbar o interferir con las actividades humanas o la vida natural durante su construcción y utilización.

Los primeros túneles fueron construidos a principios de los descubrimientos metalúrgicos, al final de la Edad de Piedra y fueron utilizados para la explotación de minerales como el sílex o pedernal, con los que se fabricaban armas y herramientas. Estos túneles se abrían con la técnica del fuego que consistía en provocar un incendio en el frente de ataque, para luego sofocarlo súbitamente con agua fría: el cambio de temperatura daba lugar al resquebrajamiento de la roca<sup>1</sup>.

Según algunos historiadores, existió un túnel bajo el río Éufrates en Babilonia, el cual podría ser la primera obra subacuática de este tipo. Según se cree, se remonta al año 2160 A.C. y fue mandado a construir por la legendaria reina Semíramis para enlazar el palacio con el templo de Belos. También, hace unos tres mil años se construían túneles en Asiria, Persia y Mesopotamia para transportar el agua, protegiéndola de la evaporación que se produciría si la conducción estuviera expuesta a los rayos solares. Estos primeros túneles de abastecimiento de agua llamados *qanats*, también se encontraron en el suroeste de China y en gran parte de Europa. Además, se construyeron obras con fines estratégicos, tal es el caso de las antiguas ciudades amuralladas donde el abastecimiento de agua se lograba mediante estructuras que permitían el suministro en caso de asedio. Un ejemplo es el túnel de Siloam, que se terminó en el año 700 A.C. y que llevaba el agua desde los manantiales de la montaña de Ophel hasta el estanque de Siloam en el interior de la vieja y fortificada ciudad de Jerusalén.

Entre los más relevantes túneles antiguos del mundo, se encuentra el construido por los romanos bajo el monte Salviano para transportar el exceso de agua del lago Pucino, sin

---

<sup>1</sup> Fuente: Historia de la construcción de túneles. <https://historiaybiografias.com/tuneles/>

salida natural. Tenía 5.600 metros de longitud, y en ciertos lugares corría a 181 metros debajo de la superficie.

Pocos túneles para calzadas se construyeron, aunque hay que destacar el de Pansilippo, cerca de Nápoles, construido para una calzada romana el año 36 A.C., con 1.500 m de longitud y 4 m de ancho que permitía el tránsito en ambos sentidos.

Estas obras parecen irrealizables cuando se piensa que sólo se disponía de herramientas sencillas, sin contar con perforadoras, compresores de aire, explosivos, en tanto hoy estos trabajos se ejecutan fácilmente y con habitual frecuencia con las tecnologías y herramientas disponibles.

Es recién en el siglo XIX que con la revolución industrial aparece el ferrocarril que impulsa una época de gran construcción de túneles, en especial en Europa y Asia.

Sin tomar en cuenta los túneles para transporte de agua, que generalmente son de diámetros menores a los de uso vial y ferroviario, actualmente las estructuras en servicio de mayor longitud en el mundo son: i) el túnel de la línea 3 del Metro de Guangzhou en la provincia de Guangdong, China, con 60.4 km; ii) el túnel ferroviario de San Gotardo bajo los Alpes suizos, con dos secciones de 57 km y; iii) el de la línea 10 del metro subterráneo de Beijing, China, con 57 kilómetros. Por su parte, con 24 km de longitud, el Lærdal, en Noruega, es el túnel carretero más largo del mundo en servicio.

## **2. Siniestros en túneles**

Estas estructuras han sido de mucha importancia a lo largo del desarrollo de la humanidad; no obstante, son considerados proyectos de alto costo y de alto riesgo, tanto en su etapa de construcción como de operación.

No han sido pocos los siniestros ocurridos en túneles. Dentro de los más notables en las décadas recientes se pueden mencionar el accidente del túnel Mont Blanc (Francia-Italia, 11.6 km) en marzo de 1999; en el cual, el incendio en un camión se propagó por todo el túnel durante 53 horas, provocando 39 fallecidos. En mayo de ese mismo año, en el túnel Tauern (Austria, 6.4 km), un choque múltiple desató un incendio en el que resultaron 12 personas fallecidas y 42 lesionadas. Finalmente, en el túnel carretero de San Gotardo

(Suiza, 56.9 km) por una causa similar, en octubre de 2001 un incendio acabó con la vida de 11 personas<sup>2</sup>.

Los accidentes del Mont Blanc, Tauern y San Gotardo dieron lugar a una creciente concienciación sobre posibles impactos de los incidentes en túneles. La escala de probabilidad de incidentes de gran importancia es baja, sin embargo, sus consecuencias pueden ser graves en términos de víctimas, daños a la estructura e impacto sobre la economía del transporte [1].

Estos siniestros han conducido a la revisión de las normas internacionales de diseño y seguridad operativa, con la incorporación desde la fase de proyecto de medidas más estrictas y la incorporación de tecnología de seguridad, control, supervisión, equipamientos de explotación y sistemas de ventilación más eficaces.

### **3. Elementos generales de seguridad en túneles vehiculares**

Los actuales modelos de financiación y obtención de fondos para el desarrollo de infraestructura pública implican intrínsecamente una partición de los riesgos del proyecto en esquemas tales como “Concesión”, “Proyecto y Obra”<sup>3</sup> o “Participación Público-Privada”; de allí la necesidad de realizar un adecuado control de los riesgos y de costos en todas las etapas del proyecto para viabilizar su desarrollo.

La elaboración del proyecto de un túnel nuevo, o la remodelación y actualización de uno existente, requiere que numerosos parámetros sean tenidos en cuenta para que sea considerada una infraestructura segura. Para ello se requiere la intervención de equipos expertos multidisciplinarios que deben actuar y articularse para tomar las decisiones críticas sobre el proyecto, evitando errores que en etapas posteriores implicarán mayores costos. Todos estos parámetros son variables e interactivos y el peso relativo de los mismos y su carácter más o menos determinante, varía en relación con las características de cada túnel, dependiendo si es urbano o rural, construcción nueva o

---

<sup>2</sup> Una lista más detallada de siniestros puede ser consultada en: <https://tunnels.piarc.org/es/aspectos-generales-seguridad/experiencia-de-los-accidentes>

<sup>3</sup> También conocido como Diseño y Construcción

una modernización de una estructura existente y de las características del tránsito a través de esta.

Las consecuencias de medidas tardías implicarán que, el túnel y sus sistemas de explotación y supervisión sean más costosos, inapropiados o subóptimos para la explotación y seguridad de la obra.

Por el contrario, una intervención temprana contribuye a una mejor optimización del proyecto, tanto desde la perspectiva de seguridad como de los costos de construcción y explotación. Ejemplos relevantes indican que optimizaciones integrales que incluyen a la ingeniería civil, la ventilación y evacuación del túnel consideradas en etapas tempranas del proyecto, pueden contribuir a ahorros en costos del orden del 20% [1].

Cada túnel es único por lo que es necesario un análisis específico adaptado a sus características particulares. Con ello es posible lograr:

- optimizar el proyecto, tanto desde el punto de vista técnico como económico;
- reducir el nivel de riesgos técnicos, económicos y ambientales;
- garantizar a los usuarios el nivel de seguridad requerido.

Las condiciones que afectan a la seguridad de un túnel son consecuencia de numerosos factores, es por ello que para garantizar la seguridad; es necesario tener en cuenta todos los aspectos del sistema, constituidos por la propia infraestructura, así como por la explotación y la intervención, los vehículos y los usuarios.



**Figura 1. Elementos de un sistema de seguridad en túneles.**

**Fuente: [1]**

La infraestructura es un parámetro esencial en el costo de construcción de los túneles; sin embargo, se puede invertir mucho en ella y no haber conseguido las condiciones de seguridad si no se han tomado en cuenta paralelamente aspectos esenciales tales como:

- la organización, los medios humanos y materiales y los procedimientos de intervención y de operación;
- la formación y entrenamiento del personal de operación;
- el equipamiento de los servicios de emergencia, con material adecuado y la formación de su personal;
- la comunicación adecuada a los usuarios.

Un túnel es un sistema complejo que requiere:

- evitar el enfoque del proyecto de un túnel únicamente desde el punto de vista del trazado, la geología o la obra civil. Esto puede llevar a serias deficiencias que podrían hacer que el túnel fuera menos seguro y dificultar la operación posterior; inclusive es probable que resulte imposible operarlo en condiciones razonables;
- evitar elaborar el proyecto de un túnel únicamente desde el punto de vista de los equipamientos de operación sin incluir un análisis previo de los problemas de seguridad, intervención y explotación actual; conduce a deficiencias que aparecerán rápidamente, tan pronto como el túnel se ponga en servicio;

- considerar desde las etapas preliminares del proyecto todos los objetivos y restricciones relativas a la operación y al mantenimiento para evitar incrementar los costos de explotación y reducir la fiabilidad en general lograda.

El control de este sistema complejo es difícil, pero esencial para encontrar las soluciones más apropiadas a cada problema y asegurar que los usuarios tengan un nivel mínimo de seguridad y ofrecerles un servicio de calidad y confort adecuados.

De forma similar el control de este sistema complejo contribuye a la optimización técnica y económica del proyecto, mediante la definición precisa y temprana de las funciones a realizar, empleando procedimientos ingenieriles.

De este modo, desde el inicio del proyecto los principales aspectos que deben tenerse en cuenta son:

- el trazado en planta y el perfil longitudinal, la geología, y los procedimientos de construcción;
- todas las condiciones del tránsito que afectan a la seguridad, en particular, las características del tránsito, la longitud del túnel, el tipo de tránsito y la geometría del túnel, así como el número previsto de camiones por día;
- la ventilación y la iluminación;
- la seguridad mediante un análisis de riesgo preliminar y un plan de emergencias preliminar;
- las condiciones de operación y de mantenimiento.

Es recomendable que los análisis de riesgos sean realizados por un organismo funcionalmente independiente del gestor del túnel; y que el contenido y los resultados de los estudios, se incluyan la documentación de seguridad que se remita a la autoridad administrativa del túnel.

Las características de seguridad determinan los resultados de seguridad requeridos para un sistema de túnel. Estas incluyen; tanto la infraestructura como medidas relacionadas a la operación. Respecto a los elementos de infraestructura se incluyen todos los sistemas e instrumentos técnicos, los geométricos y soluciones estructurales, los

materiales elegidos para los componentes que constituyen el túnel y para los dispositivos instalados.

Por su parte, las características de seguridad en la operación son decisivas para garantizar la seguridad del usuario del túnel durante la operación del túnel e incluyen los procedimientos para la gestión adecuada de la seguridad del túnel, tales como: la asignación de roles y tareas de seguridad, responsabilidades y autoridades de diferentes partes. Esto también incluye la inspección, el mantenimiento y la gestión del tránsito en el túnel.

Es importante que la coordinación de los deberes de los operadores, el equipo de mantenimiento y los equipos de rescate; estén bien descritos y probados periódicamente mediante simulacros adecuados. En caso de ocurrencia de un evento, debe procurarse que la recuperación posterior cuente también con procedimientos precisos y eficaces para restaurar el túnel a la situación anterior.

Según las características del túnel deben escogerse las medidas de seguridad necesarias de manera tal que; el conjunto correcto de infraestructura y las medidas de operación cumplan con los criterios del nivel de seguridad requeridos.

Es importante que se consideren los aspectos claves para brindar seguridad a los usuarios y a la infraestructura del túnel, entre los cuales se destacan los siguientes:

**Tabla 1. Principales elementos de seguridad en túneles vehiculares**

<b>Prevención</b>	<b>Mitigación</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Límites de velocidad reducidos</li> <li>• Adelantamiento y cambio de carril prohibidos</li> <li>• Superficie de la carretera (fricción del pavimento)</li> <li>• Zonas de iluminación: adaptación, electricidad y seguridad</li> <li>• Revestimientos y paneles de paredes</li> <li>• Paneles de mensajes variables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detección automática de incidentes</li> <li>• Cables sensibles al calor</li> <li>• Sensores de gases tóxicos</li> <li>• Alumbrado de emergencia y evacuación a nivel de acera</li> <li>• Sondas de alarma</li> <li>• Teléfonos de emergencia</li> <li>• Señal de teléfono celular</li> <li>• Señal de GPS</li> </ul>



<ul style="list-style-type: none"> <li>• Semáforos</li> <li>• Barreras</li> <li>• Control de gálibo</li> <li>• Detección de marcha antes del ingreso al túnel</li> <li>• Pago electrónico de peaje (flujo libre)</li> <li>• Detección automática de placa patente automotor</li> <li>• Monitoreo por video</li> <li>• Red de comunicaciones y de alimentación eléctrica en anillo</li> <li>• Grupos electrógenos</li> <li>• Sistema de alimentación ininterrumpida</li> <li>• Grupos de bombeo</li> <li>• Sistema de drenaje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altavoces</li> <li>• Plan de emergencias</li> <li>• Canales de audio, visuales y táctiles</li> <li>• Sistemas automáticos de control de tránsito</li> <li>• Componentes resistentes a explosiones y fuegos de alta temperatura</li> <li>• Superficie de la carretera (no porosa)</li> <li>• Refugios seguros</li> <li>• Aspersores</li> <li>• Ventilación longitudinal, transversal y semi-transversal</li> <li>• Sistemas de extracción de humo</li> <li>• Sistemas de mantenimiento de la estratificación del humo</li> <li>• Maneras alternativas de escape</li> <li>• Detección de cargas peligrosas</li> <li>• Sistemas de información al usuario</li> <li>• Bocas contra incendio de emergencia</li> <li>• Centro de gestión y control</li> <li>• Control de ventilación</li> <li>• Control de iluminación</li> <li>• Sistema integrado de control</li> <li>• Salidas de emergencia</li> <li>• Control de humo, opacidad e incendio</li> <li>• Sistemas de simulación ante incidentes</li> <li>• Barreras</li> <li>• Control de gálibo</li> <li>• Semáforos</li> <li>• Vehículos de emergencia</li> <li>• Hidrantes, extintores</li> </ul>
---	---

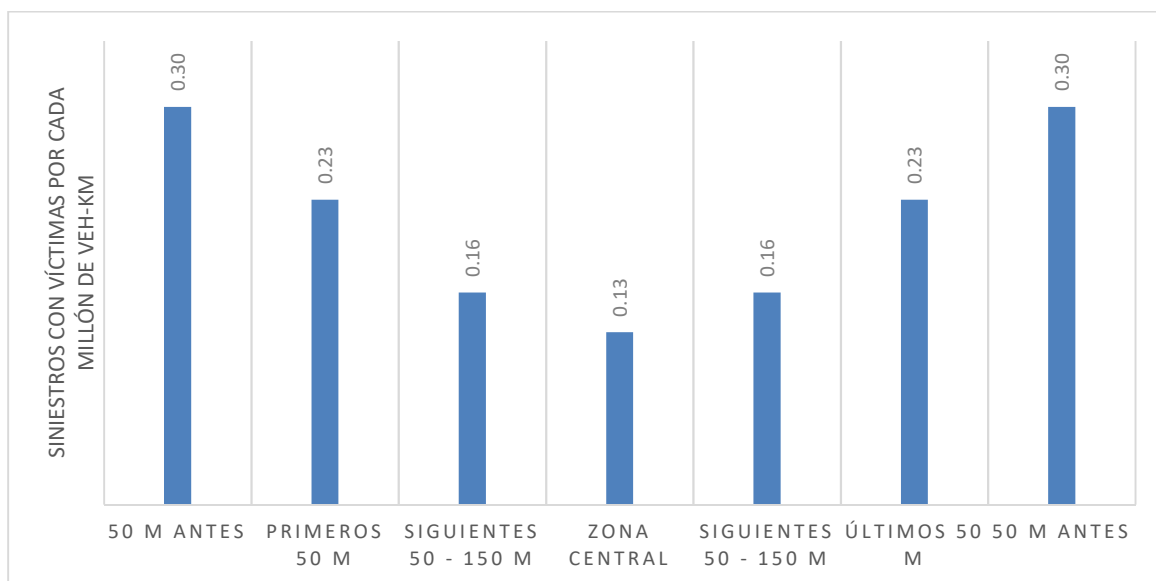
### 3.1. Seguridad vial

Los siniestros viales son un flagelo para la humanidad que puede evitarse con acciones concretas de prevención. El Plan del Decenio de Seguridad Vial de las Naciones Unidas para el periodo 2011 – 2020 recomienda trabajar en 5 pilares, entre los cuales se encuentra la generación de carreteras seguras que orienten e informen adecuadamente a sus usuarios para que sus conductas y decisiones sean correctas y los protejan en caso de siniestros, aun cuando ellos hayan cometido errores graves.

Una adecuada infraestructura aporta significativamente a contar con un sistema seguro de movilidad, según ha podido comprobarse en países que han logrado reducir la cantidad de víctimas por siniestros viales.

Los túneles forman parte importante de las redes carreteras y por ello deben ofrecer las mismas condiciones de seguridad que el resto de estas.

Se detalla en la siguiente figura, la estimación de la tasa de siniestros viales en túneles según el sector.



**Figura 2. Índices de siniestralidad a lo largo de los túneles**  
Fuente: Adaptado de [2]

A partir de ello puede concluirse que la tasa de siniestros en túneles es mayor en las zonas de transición entre el mismo y la carretera abierta, lo cual se atribuye, además del cambio de iluminación, a las condiciones de humedad o calzadas resbaladizas de estos sitios.

### **3.1.1. *Recopilación de datos de incidentes y siniestros***

La recopilación de datos sobre incidentes, siniestros y su análisis posterior es esencial tanto para la evaluación de los criterios de funcionamiento, como para el análisis de riesgos de un túnel; asegurando con esto un proceso de mejora continua de su seguridad.

En particular, los datos recogidos permiten la evaluación de la frecuencia de aparición de eventos; no obstante, los datos también proporcionan una retroalimentación sobre las consecuencias de los eventos y la eficacia de las medidas de seguridad y equipamientos. Pueden además proporcionar información adicional sobre el comportamiento real de los usuarios del túnel.

La recopilación y análisis de datos sobre incidentes y accidentes deben permitir alcanzar dos objetivos:

- a nivel local, es decir, a nivel de cada túnel: forman una base importante para la definición y evaluación de las mejoras a implantar por el responsable del túnel. Deben ser una ayuda para la toma de decisiones en lo referente a la mejora general de la seguridad en la carretera;
- a nivel nacional e internacional: constituyen una base fundamental para un marco de referencia que permita a las autoridades formular y adecuar las políticas generales relacionadas con la seguridad en los túneles. En particular, permiten cuantificar la magnitud, en términos de frecuencia y gravedad de situaciones críticas, que pueden causar un peligro para la vida de los usuarios. Además, permiten medir la eficacia de las instalaciones de seguridad y en algunos casos, comparar el nivel de seguridad en un determinado túnel con los datos de seguridad nacional o internacional.

Finalmente, proporcionan información que es útil para la elaboración de análisis de riesgos en túneles en fase de proyecto o en túneles en explotación que todavía no disponen de una base de datos adecuada.

Las lecciones tomadas de la operación, especialmente durante los incidentes y siniestros, deben ser analizadas y, si los resultados de ellos revelan deficiencias, se recomienda técnicamente intervenir mejorando las estrategias y las medidas de operación.

### **3.1.2. Estadísticas de los incidentes y siniestros**

La recopilación de información relativa a incidentes y siniestros en un túnel contribuye a la evaluación de riesgos y a la priorización y caracterización de las estrategias de gestión de estos [3].

En el caso de colisiones, se debe recabar información relativa a las características del túnel y su tráfico, una descripción de la colisión, del o los conductores implicados y el comportamiento de las personas involucradas.

Es importante calcular las tasas de colisión aplicadas a siniestros con víctimas. Esta tasa 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, expresada en cientos de millones de vehículos-kilómetro.

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

Donde:

- $C_R$ : tasa de colisiones con víctimas
- $CCV$ : número anual de colisiones con víctimas (heridas o fallecidas)
- $IMD$ : intensidad media diaria en un túnel (vehículos/día)
- Longitud del túnel (km)

A modo de ejemplo se presenta a continuación una tabla de tasas medias de colisión de túneles carreteros de algunos países, las que no resultan ser representativas de todos los túneles de estos países.

**Tabla 2: Tasas de colisión media para túneles carreteros en varios países**

<b>País</b>	<b>Tipo de tráfico</b>	<b>Tasa de accidentes (C<sub>R</sub>) (por 10<sup>8</sup> veh-km)</b>
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)**
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***

**Notas:**

\* Cubre solamente el túnel subfluvial Raúl Uranga - Carlos Sylvestre Begnis

\*\* Cubre solamente el túnel Hai Van. El dato incluye todas las colisiones, también aquellas sin víctimas. El número entre paréntesis corresponde a la estimación de accidentes con víctimas.

\*\*\* Cubre todos los túneles suizos, principalmente unidireccionales

**Fuente: Transcripción y adaptación de [3]**

Para el caso de los incendios, es importante recopilar información relativa a: la localización, fecha y hora, desarrollo del incendio, su tamaño, causas del mismo, consecuencias, tiempo de cierre del túnel, forma de extinción, trabajo de los bomberos, ventilación y detalles de la evacuación [3].

Las tasas de ocurrencia de incendios se presentan como ratios por vehículo y kilómetro, lo cual requiere contar con información de volúmenes de tránsito en el túnel durante el periodo considerado.

A continuación, se presenta una tabla con información de tasas medias de incendios para algunos países:

**Tabla 3: Tasas medias de incendios en túneles carreteros de varios países**

<b>País</b>	<b>Tasa de incendios para todos los vehículos (por 10<sup>9</sup> veh-km)</b>
Noruega	15.0
Holanda	3.2
Austria	6.5
Alemania	25.7*
Italia	5.6
España	3.5
Francia	10.6
Reino Unido	Datos insuficientes (10-20)
República Checa	17-25
Japón	38**
Corea del Sur	6.4
Vietnam	560***

**Notas:**

\* Solo cubre 28 túneles TERN. Incluye incendios menores

\*\* Solo se incluyen los túneles con incendios. La tasa representa un valor límite superior para Japón

\*\*\* Solo cubre un único túnel

**Fuente: Transcripción y adaptación de [3]**

### **3.2. Características geométricas y de diseño**

En general, los túneles vehiculares se diseñan siguiendo las normas básicas de diseño de carreteras; no obstante, aspectos tales como las diferentes condiciones de iluminación, visibilidad y la mayor probabilidad de siniestros como incendios hacen que estos requieran de una serie de condiciones de diseño particulares para su seguridad.

A continuación, se recopilan, con carácter meramente referencial, una serie de elementos generales de diseño geométrico, los cuales deben ser revisados y adaptados a la normativa aplicable en cada caso.

**Tabla 4. Principales elementos de diseño geométrico de túneles vehiculares**

Variables de diseño	Criterios de cálculo
<b>Capacidad práctica</b>	<p><math>C_p = 2,200 \times N \times C_a \times C_{vp} \times C_c</math> (veh/h en ambos sentidos)</p> <p>Donde:</p> <p>N: número de carriles</p> <p><math>C_a</math>: coeficiente reductor de la capacidad en función de la anchura de los carriles de circulación y de las zonas exteriores a la calzada. Se considera que un carril de circulación no limita la capacidad real si su anchura es igual o superior a 3.60 m.</p> <p><math>C_{vp}</math>: Coeficiente de vehículos pesados que permite ajustar la capacidad teórica en función del porcentaje de vehículos pesados y de la inclinación y longitud de la rampa o de la pendiente de la carretera.</p> <p><math>C_c</math>: Coeficiente de corrección en función del tipo principal de automovilista. Este coeficiente corrige la capacidad si los conductores son habituales de esta carretera o si es tráfico de día laborable.</p> <p><math>C_a</math>, <math>C_{vp}</math> y <math>C_c</math> pueden ser estimados a partir de las tablas recogidas en el Capítulo 4 del Manual de PIARC <a href="#">“Capacidad y velocidad en función de la geometría de carreteras y túneles de carretera”</a> del Informe 05.11.B y en el Capítulo 3 <a href="#">“Velocidades de circulación y densidades de tráfico”</a> del Informe 05.12.B.</p>
<b>Trazado en planta y accesos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se debería respetar una curvatura mínima de 550-600 m. Los espacios laterales deben permitir la visibilidad en las curvas.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En túneles urbanos conviene dimensionar la obra para velocidades próximas a la velocidad real en régimen fluido y no congestionado.</li> <li>• Curvas amplias como en el exterior</li> <li>• Mejor las bocas en curva</li> <li>• Tener en cuenta sobreancho por visibilidad de parada</li> <li>• La misma cantidad de carriles en el interior que en los accesos</li> <li>• Evitar las intersecciones dentro del túnel</li> <li>• No debería realizarse ningún tipo de conexión, nudo o glorieta en la calzada, en los 250 m anteriores o posteriores a un túnel (o a una serie de túneles próximos)</li> <li>• Los carriles lentos deben terminarse a cierta distancia del túnel (mejor con cambio de pendiente para permitir una recuperación de los vehículos)</li> </ul>
<b>Alineación vertical</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debe procurarse una pendiente máxima del 3% porque con esa pendiente; aumenta más que proporcionalmente la emisión de gases de los vehículos y se hace mucho más difícil controlar el humo</li> <li>• Deben proscribirse las pendientes: <ul style="list-style-type: none"> <li>– mayores del 5% porque el humo de un incendio es casi incontrolable</li> <li>– menores del 0.5% porque no es posible drenar por gravedad</li> </ul> </li> <li>• En túneles cortos (<math>L &lt; 500</math> m) debe usarse una sola pendiente</li> </ul>
<b>Alineación horizontal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En túneles largos (<math>L &gt; 500</math> m): <ul style="list-style-type: none"> <li>– Es mejor extremos en curva para graduar la luz exterior y evitar el efecto “agujero”</li> <li>– La alineación recta máxima debe ser 1.500 m</li> </ul> </li> <li>• En túneles cortos (<math>100 &lt; L &lt; 500</math> m) el trazado puede ser en recta o en curva</li> </ul>



	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En túneles muy cortos (<math>L &lt; 100</math> m) es mejor el trazado en recta</li> </ul>
<b>Gálibo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El gálibo estricto sería la altura de un vehículo (4 m), más un margen para movimientos dinámicos, más otro para comodidad de conducción: total 4.50 m</li> <li>• Hay que añadir márgenes de protección de las instalaciones eléctricas y ventiladores para la repavimentación y tolerancias de construcción</li> <li>• La mayoría de los países fijan gálibos entre 4.50 m y 5.10 m</li> </ul>
<b>Anchos de carril</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Como norma general los anchos de carril deben ser iguales en el exterior y en el interior del túnel</li> <li>• Los anchos de carril más normales son: <ul style="list-style-type: none"> <li>– 3.60 m en USA, Reino Unido y otros países</li> <li>– 3.50 m en la mayoría de los países para todo tráfico</li> <li>– 3.00 m a 3.25 m en algunos países y en carreteras de montaña</li> </ul> </li> <li>• Pueden aceptarse anchos de 3,25 m sin reducción de la capacidad, sobre todo en túneles urbanos sin tráfico pesado</li> <li>• Los anchos incluyen las marcas viales interiores</li> </ul>
<b>Anchos de arcén y aceras</b>	<p><u>Arcenes:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El ancho de arcén debe permitir el aparcamiento de un vehículo inmovilizado sin reducir el número de carriles de circulación en el túnel</li> <li>• Ancho mínimo de arcén es de 1 m (sólo se puede estacionar si la acera es montable)</li> <li>• El ancho usual de arcén (o de carril adicional de emergencia) es de 2 m</li> <li>• No debe haber arcenes de anchos intermedios entre 1 y 2 m porque producen situaciones de peligro (los usuarios creen que se puede estacionar)</li> <li>• El ancho de arcén incluye la marca vial de borde</li> </ul>

	<p><u>Aceras:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ancho de 0.75 a 1.00 m</li> <li>• Altura: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Para permitir la apertura de puertas, máximo 20 cm</li> <li>– Para actuar como barrera, mínimo 25 cm</li> <li>– Para acera montable, máximo 15 cm y deseable 7 cm</li> <li>– Altura nula en varios países (con carril de emergencia)</li> </ul> </li> </ul>
<b>Peraltes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los peraltes mínimos son: <ul style="list-style-type: none"> <li>– 2% transversal perpendicular al eje</li> <li>– 0,5% transversal en cualquier dirección (por drenaje)</li> </ul> </li> <li>• Los túneles de curvatura horizontal única permiten drenar sólo en un lateral <ul style="list-style-type: none"> <li>– Con ahorro de construcción</li> <li>– Con simplificación de vertidos</li> </ul> </li> <li>• Si el peralte es grande debe inclinarse el eje de simetría del túnel para mantener iguales las condiciones geométricas de ambos hastiales (paredes laterales) tal como las visualiza el conductor</li> </ul>
<b>Separación entre calzadas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En túneles bidireccionales debe prohibirse el adelantamiento en todo el túnel</li> <li>• Las dos calzadas pueden separarse: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Con una doble línea continua</li> <li>– Con una zona cebreada de 1m</li> </ul> </li> <li>• Evitar las barreras rígidas centrales pues ocupan 0.50 m, requiere dos arcenes de 0.50 m a cada lado y dificultan mucho las maniobras de ayuda y socorro</li> </ul>

Fuente: Adaptado de [4] y [5]

### 3.3. Iluminación

Mucha experiencia se ha logrado en lo relativo a la iluminación de túneles y numerosas normativas han surgido en distintos países sobre este aspecto fundamental. Entre ellas la Orden Circular 36/2015 [6] de España que contiene una serie de normativas sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles. En su segundo tomo se desarrollan recomendaciones para la iluminación de túneles.

En este sentido, es preciso indicar que la falta de visibilidad de los conductores de los vehículos o dificultades en la iluminación en un túnel, en especial en sus extremos, son causa frecuente de los siniestros que se originan en su interior. En ocasiones el alumbrado proporcionado por los faros de los vehículos no suele ser suficiente para circular por ellos con seguridad y comodidad, debido a las características especiales de los mismos.

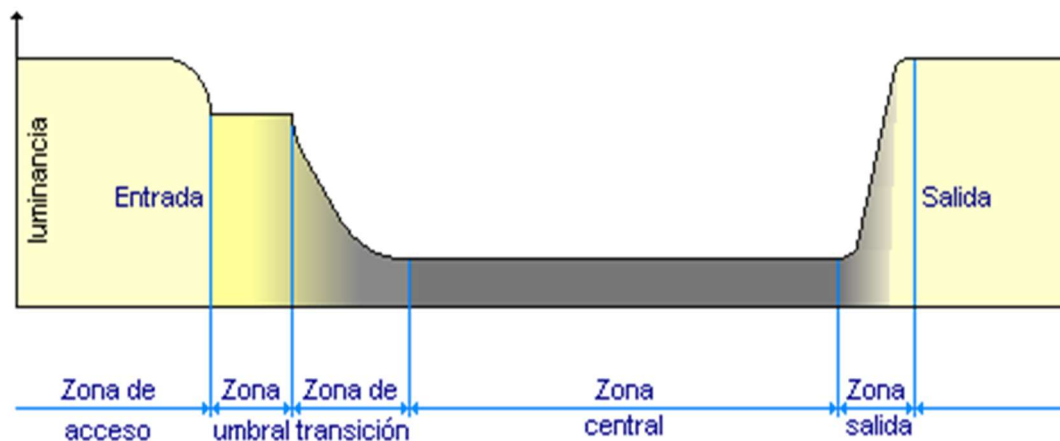


Figura 3. Distribución de iluminación de un túnel

Fuente: <https://recursos.citcea.upc.edu/illum/exterior/tunel.html>

Esta situación se agrava por cuanto las consecuencias de los siniestros de circulación suelen ser mayores en un túnel que en carreteras a cielo abierto.

Para mitigar estas dificultades de visión, se emplean las instalaciones de alumbrado de túneles que contribuyen a mejorar la comodidad y la seguridad del conductor al aumentar

su capacidad para ver detalles y objetos y visualizarlos adecuadamente con antelación; de manera de reaccionar de modo efectivo y en tiempo adecuado evitando maniobras bruscas e imprevisibles. Asimismo, reducen el deslumbramiento originado por los faros de otros vehículos al aumentar la luminancia de fondo del campo visual, disminuyendo la posibilidad de ocurrencia de siniestros.

En primer lugar, es preciso recordar definiciones importantes en relación con este tema, dado que la función de la iluminación varía según sea su ubicación y características. Para ello se toma como referencia la normativa española establecida en el Real Decreto 635/2006 [7].

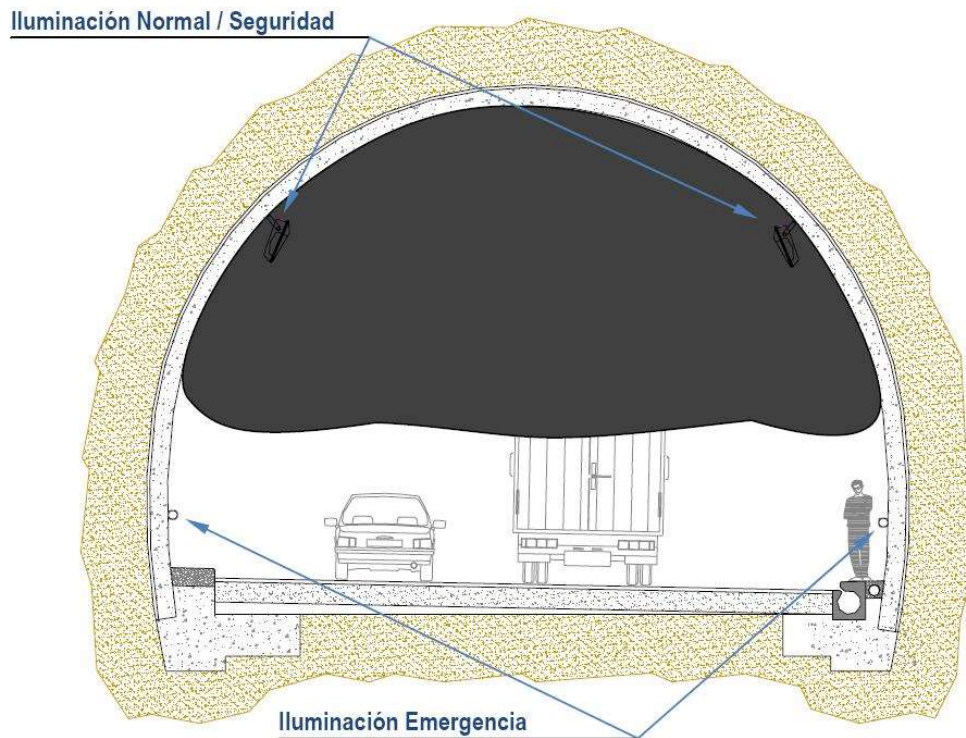
Según dicho decreto se considera: *“La iluminación de seguridad se proporcionará de modo que permita una visibilidad mínima para que los usuarios del túnel puedan evacuarlo en sus vehículos en caso de avería del suministro de energía eléctrica.”*

Por otro lado *“La iluminación de emergencia, estará a una altura no superior a 1,5 metros y deberá proyectarse de modo que permita guiar a los usuarios del túnel para evacuarlo a pie con un mínimo de 10 lux<sup>4</sup> o 0,2 cd/m<sup>2</sup>.”*

De las definiciones anteriores, se extrae que la función de los sistemas de iluminación de emergencia es de guiado y balizamiento, indicando a los usuarios la ruta de evacuación. Se ubica a baja altura en previsión de que durante un incendio los equipos de alumbrado normal queden oscurecidos debido al humo estratificado en la zona superior del túnel.

---

<sup>4</sup> Unidad de medida de la iluminancia, nivel de iluminación o densidad luminosa. Un lux es la incidencia perpendicular de un lumen en una superficie de 1 metro cuadrado.



**Figura 4. Tipos de iluminación en túneles**

**Fuente:** <http://www.seguridadentuneles.com>

El alumbrado de túneles de carretera requiere mayor iluminación durante las horas de luz natural que durante las horas nocturnas. Es así que, a partir de una determinada longitud de túnel, aún durante el día, la luz natural no penetra en una cantidad suficiente para asegurar la visión adecuada de eventuales obstáculos que puedan encontrarse en el recorrido de un vehículo, pues como mucho, según la situación geográfica, la posición del sol a determinada hora del día y el estado nublado o soleado del cielo, la luz natural penetra como máximo tres veces la anchura o la altura del túnel, la dimensión de mayor magnitud entre estas.

En consecuencia, es recomendable instalar en los túneles que así lo requieran, alumbrado artificial, tanto diurno como nocturno, que asegure las condiciones adecuadas de visibilidad y confort de los conductores de los vehículos. Al mismo tiempo la iluminación tiene un efecto de guiado para el vehículo que circula por el túnel.

Es importante tomar en cuenta que la instalación de alumbrado artificial de un túnel es una de las instalaciones más caras tomando en cuenta que la iluminación exterior que aporta la luz natural, que pueden llegar hasta 100.000 lux, y a los cuales hay que adaptar las entradas de los túneles para evitar el efecto agujero negro en la visión de los conductores. Lo anterior, lleva a que sea una de las instalaciones más caras y a un elevado costo de explotación y de mantenimiento debido a la sustitución de las fuentes de luz por agotamiento y pérdida de flujo luminoso con el paso del tiempo, considerando que el alumbrado de un túnel puede estar encendido las 8.760 horas del año, o lo que es lo mismo, casi el 50% de la vida útil de las lámparas de sodio de alta presión y casi el 33% de la vida media de las mismas.

Con los recientes avances técnicos aparecen nuevas tecnologías lo que hace necesario actualizar las normativas vigentes, tal el caso de la nueva tecnología de fuente de luz, la de los diodos electroluminiscentes o foto emisores tipo LED, con una serie de ventajas muy importantes con respecto a otras fuentes de luz que estaban siendo utilizadas.

### **3.4. Tecnologías ITS para túneles**

Cada vez resulta más común el uso de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS, por sus siglas en inglés), en las redes modernas de transporte, lo que permite mejorar la movilidad de personas y mercancías, al incorporar elementos de vigilancia, apoyo en caso de incidentes y mejoras en sistemas de pagos de peajes.

En particular, los túneles necesitan estar equipados con sistemas de ventilación, suministro de energía, alumbrado, protección contra incendios; también procesos de seguridad tanto de vigilancia como de gestión de tráfico. La conectividad de estos sistemas garantiza la seguridad de la infraestructura – y más importante- de los usuarios.

Los ITS garantizan el flujo de tránsito adecuado y permiten estar alerta ante posibles riesgos, a través del establecimiento de una infraestructura que garantice información, como fibra óptica o sistemas de telefonía, para brindar el soporte necesario ante una

emergencia, que puede abarcar desde accidentes viales, hasta derrames, acumulación de gases o incendios.

Estas nuevas tecnologías permiten brindar condiciones de seguridad a los túneles sin precedentes. Es por ello que; para nuevas construcciones o para re-funcionalizaciones de túneles en operación hoy, es necesario revisar los últimos avances que permitan dotar a estos espacios de los elementos adecuados para advertir de eventualidades o recomendaciones a los usuarios de estos espacios. La detección e información tempranas, tanto al gestor del túnel como al usuario de este, permite hoy reducir significativamente las consecuencias de situaciones emergentes en estos espacios.

Un sistema de vigilancia de tráfico se instala a menudo cuando el nivel de tráfico es muy denso en un túnel. Por lo general, se utiliza un sistema de videovigilancia, complementado a veces con dispositivos de conteo. Una instalación de videovigilancia ofrece al operador la posibilidad de controlar en tiempo real las condiciones del tráfico en el túnel. En caso de operación degradada, permite visualizar la zona de incidencia en cuestión para que las necesidades puedan ser evaluadas rápidamente.

La videovigilancia es, por tanto, una herramienta muy valiosa para el operador, ya que le permite, por una parte, vigilar continuamente los incidentes en el interior del túnel y, por otra, reaccionar rápidamente en caso de necesidad. No obstante, para aprovechar plenamente una instalación de vigilancia por vídeo, es esencial mantener una presencia humana, si es posible continua, en el centro de control de mando.

Una videovigilancia es generalmente bastante simple en su concepción. Las cámaras colocadas a intervalos regulares en el túnel proporcionan una cobertura completa del túnel y sus alrededores. A continuación, las imágenes se agrupan y transmiten por redes que pueden o no estar dedicadas al centro de control-mando del túnel. Las imágenes se reciben y se visualizan en las pantallas.

### Recuadro 1. Aplicación de ITS en el Túnel de Oriente, Colombia

Considerado como uno de los proyectos de infraestructura más importantes de Colombia, el nuevo túnel de Oriente tiene una longitud de casi 9 km y constituye un vínculo estratégico clave entre Medellín y el aeropuerto José María Córdoba, en Rionegro.

La compañía concesionaria ha puesto en operación un moderno paquete de tecnología necesario para el funcionamiento eficiente y la gestión económica del corredor viario de la Concesión Túnel Aburrá Oriente, que comprende un total de 24 km de túneles, carreteras, intercambiadores y puentes.

La plataforma integrada de gestión de tráfico y túneles proporciona a los operadores información en tiempo real y una visión única de todo lo que ocurre en la carretera, ayudando a optimizar las operaciones y la toma de decisiones.

El proyecto cuenta con dos centros de control: un centro principal y un centro de apoyo, desde los que se monitorizarán de forma integrada todos los sistemas inteligentes de transporte, sistemas de seguridad y sistemas de recaudación de ingresos. Esto incluye sistemas de señalización con mensajes variables para proporcionar a los conductores información en tiempo real sobre las condiciones de la carretera, la distancia de seguridad entre vehículos, los límites de velocidad y cualquier incidente. También se implementó un sistema de detección automática de incidentes, que integra información de cámaras y sensores, y envía automáticamente alertas al centro de control en caso de un incidente o emergencia, reduciendo su tiempo de resolución y aumentando la seguridad del usuario.



**Figura 5. Centro del Control del Túnel de Oriente, Colombia**  
Tomado de: [www.traffictechnologytoday.com](http://www.traffictechnologytoday.com)

El proyecto también incluyó la implementación de sistemas de comunicación, seguridad y gestión de tráfico, incluyendo: sistemas de circuito cerrado de televisión (CCTV), contadores de tráfico, señalización vial, postes SOS, detección de incidentes, control de iluminación, un sistema de altavoces y control de ventilación con anemómetros, medidores de luminancia y opacímetros.

Además, se instalaron sistemas de medición de la calidad del aire y sensores de CO<sub>2</sub>, que son capaces de detectar altos niveles de gases tóxicos en tiempo real y activar automáticamente los ventiladores para expulsar contaminantes. Un innovador sistema de radio permite geo-referenciar la ubicación exacta de ambulancias, bomberos, policía y vehículos de operación y mantenimiento en caso de incidente. El túnel también cuenta con sensores de visibilidad y un sistema de iluminación artificial de emergencia y evacuación, así como con generadores de energía y plantas de respaldo para garantizar el suministro de todos los sistemas de seguridad.

Asimismo, el concesionario ha dotado a la autopista con un sistema de peaje que incluye sistemas de pago manual y sistemas de peaje electrónico, que permiten la clasificación y paso de vehículos sin paradas, a velocidades de hasta 60 km/h. El sistema de flujo libre ayudará a reducir el tiempo de viaje entre el aeropuerto de Río Negro y Medellín de 45 a 18 minutos. El sistema integrado de *back-office* también proporcionará a los operadores de carreteras una gestión rápida y segura del cobro de peajes y del seguimiento de los ingresos. (Traducido y adaptado de [8]).



### **3.5. Comportamiento del túnel frente al fuego**

Entre los posibles riesgos que deben considerarse en los túneles de carretera, el incendio de un vehículo posee una especial relevancia al ser un suceso relativamente frecuente y cuyas consecuencias pueden ser muchos mayores en un recinto cerrado, que a cielo abierto si no se toman las medidas apropiadas. Por esta razón, varias fuentes bibliográficas tratan el tema de seguridad frente al fuego en túneles de carretera.

Sin embargo, antes de definir las medidas de seguridad de un túnel debe contarse con información básica sobre incendios en túneles y los métodos de estudio, para ello, partiendo de los objetivos generales de seguridad para túneles de carretera, se han planteado propósitos más concretos para el control de los incendios y del humo:

- Salvar vidas haciendo posible la auto evacuación de los usuarios.
- Posibilitar las operaciones de rescate y extinción del incendio.
- Evitar explosiones
- Limitar el daño a la estructura y equipamiento del túnel, así como a los edificios cercanos.

Los materiales utilizados para las estructuras y los equipamientos de un túnel no deben ni arder ni producir grandes cantidades de humos tóxicos, si un incendio ocurriese en su interior. Además, si se llegase a producir, las estructuras no deben colapsarse mientras permanezcan en el túnel usuarios o personal de los servicios de emergencia, y los equipamientos de seguridad críticos deben continuar su funcionamiento, al menos hasta que se haya completado la evacuación y las operaciones de extinción.

Estos objetivos generales dependen del comportamiento de los materiales y de la resistencia al fuego de las estructuras y los equipamientos. Para ello se debe tomar en cuenta:

- El comportamiento al fuego de un material caracteriza su capacidad para resistir el fuego al que está expuesto, incluyendo su propia descomposición (p.e. combustión).
- La resistencia al fuego de una estructura o de un equipamiento caracteriza su aptitud para cumplir su función, incluso durante el desarrollo del incendio.

### **3.6. Emisiones y ventilación en túneles**

Entre los posibles riesgos mencionados que deben ser considerados en los túneles de carretera, el incendio de un vehículo toma especial relevancia al ser un suceso de relativa frecuencia y cuyas consecuencias pueden ser muchos mayores en un recinto cerrado que a cielo abierto si no se adoptan las medidas apropiadas.

Es por ello que toman relevancia el tratamiento de la detección de humo e incendios, la ventilación en tal caso y el equipamiento para la lucha contra incendios por parte de usuarios y de servicios de emergencia en el mismo. Además, se consideran los sistemas fijos de lucha contra incendios y el sistema de respuesta del túnel frente al fuego.

En caso de incendio en un túnel, el sistema de ventilación durante la fase de auto evacuación debe contar con determinadas características para cumplir con su objetivo.

Es preciso indicar que, durante la fase de auto evacuación, en la cual se espera que los usuarios puedan salir por su propia iniciativa, el sistema de ventilación tiene como objetivo crear y mantener un entorno sostenible para este proceso brindando niveles de visibilidad y calidad de aire aceptable.

En tanto el sistema de ventilación durante la fase de inicio del fuego, junto al sistema de alarma contra incendios, la ventilación debe ser decidida por el comandante de las operaciones de rescate quién deberá elegir la mejor solución teniendo en cuenta las posibilidades del sistema ventilación y las necesidades operativas de los bomberos.

Durante la fase de extinción de incendios, el sistema de ventilación elegido por el jefe de operaciones de emergencia deberá satisfacer las necesidades operativas de los bomberos.

Por otro lado, el operador del túnel elabora y actualiza procedimientos que definen los objetivos y los criterios de las actuaciones que deben realizar los diferentes servicios internos, que pueden afectar al túnel o a la carretera. Los procedimientos deben tener en cuenta todos los posibles casos que puedan presentarse, incluidos los incidentes rutinarios, los accidentes graves y las situaciones de emergencia. Estos planes deben incluir las acciones básicas a realizar, junto a los procedimientos asociados y las restricciones existentes.

El personal de operación también necesita un plan de emergencia, tanto para la intervención en el caso de un accidente, como en el caso de que produzcan fallos técnicos en los equipamientos y sistemas. Este plan reúne normalmente los requisitos reglamentarios e incluye los procedimientos de actuación que implican, como mínimo, a los operadores del túnel y al personal de intervención en caso de incidente o fallo técnico. Los procedimientos de intervención en caso de emergencia deben ser coordinados con todos los implicados en los servicios de emergencia. El contenido detallado de este plan puede ser definido con instrucciones o directivas nacionales específicas de cada país y debe adaptarse a la estructura técnica y organizativa del túnel.

### **3.7. Operación del túnel**

Los túneles son considerados como tramos de carretera con niveles de seguridad iguales o incluso superiores a los del resto, sin embargo, las consecuencias potenciales de incidentes específicos, tales como averías, accidentes o incendios, pueden ser mucho más graves en los túneles que a cielo abierto. Por otra parte, los túneles son a menudo puntos de paso obligatorio y pueden convertirse en cuellos de botella de la red, pudiendo llevar cada cierre total o parcial, a alteraciones importantes en el tránsito, u obligar a los usuarios a recorrer grandes distancias por rutas alternativas.

Por estas razones, los servicios de operación y las autoridades de tránsito tienen que asegurar la continuidad de la explotación y la seguridad en los túneles de carretera. Por lo tanto, deben garantizar a los usuarios que atraviesan el túnel un nivel de calidad de servicio y seguridad, cumpliendo estrictamente con los requisitos y las normativas vigentes.

De acuerdo con las normas aplicables en cada país, los operadores del túnel y la policía de tránsito deben gestionar el tráfico en los túneles y sus accesos, garantizando la seguridad en el interior de este para los usuarios y para las personas que trabajan en su interior, incluyendo el personal de servicio, los subcontratistas, etc. En varios países, la policía de tránsito está a cargo de la gestión del tránsito y de patrullar, mientras que el operador se encarga de las tareas de explotación, tales como: la conservación, el funcionamiento de los equipamientos del túnel, la vigilancia y asistencia de emergencias.

En términos generales, las tareas típicas de los operadores son:

- **La vigilancia del tránsito y la operación de los equipamientos del túnel:** Los principales túneles, en términos de longitud, intensidad de tránsito y complejidad, suelen estar gestionados desde un Centro de Control. En ocasiones el Centro de Control está equipado con sistemas de supervisión remota, que incluyen por ejemplo un circuito cerrado de televisión y un sistema de detección automática de incidentes que permiten la gestión remota de los sistemas de ventilación, señalización, cierre del túnel, etc.
- **Servicios de vigilancia:** En algunos casos, el explotador organiza patrullas que realizan una supervisión directa de los usuarios del túnel. Estas patrullas pueden intervenir rápidamente en caso necesario.
- **Gestión de obras de ingeniería:** Consiste en la supervisión permanente de las obras de ingeniería civil del túnel mediante la realización de estudios e inspecciones periódicas. También implica llevar a cabo un mantenimiento regular de las instalaciones, tales como los sistemas de drenaje, canales y todas las estructuras secundarias en el interior del túnel, salas técnicas, etc.
- **Gestión de equipamientos y sistema:** En túneles importantes, el operador hace uso de distintos tipos de equipamiento que en las fases de explotación están bajo su propio control. Para ello los túneles están equipados con sistemas que permiten al operador controlar el estado de los equipamientos instalados en el túnel, además de herramientas informáticas para ayudarle en la realización de esta tarea.
- **Gestión de situaciones de emergencia:** Independientemente de la naturaleza del siniestro, tanto si es consecuencia de un problema relacionado con el tránsito, tal como accidentes aislados, accidentes relacionados entre sí, fuego, etc., así como fallas en los equipamientos de alimentación, mal funcionamiento de la red

de transmisión de datos, etc., es misión del operador encargado de la supervisión el intervenir o informar/activar el servicio/autoridad pertinente de emergencias.

- **Gestión técnica y administrativa:** Además de las tareas relacionadas directamente con la explotación del túnel, el operador realiza los servicios técnicos y administrativos de apoyo a la gestión de la infraestructura y, por supuesto, al personal. El operador del túnel se encarga de la mejora del diseño de los sistemas, de la dirección de las obras y de los presupuestos de inversión y de explotación. Por último, también realiza estadísticas y verifica que se consiguen los objetivos propuestos mediante la elaboración de informes periódicos sobre el funcionamiento del túnel.

### **3.8. Renovación y modernización de túneles antiguos**

Después de las últimas catástrofes acontecidas en los túneles mencionados en la sección uno de esta primera parte, se dirigió la atención a las normativas de seguridad en túneles existentes. Éstos exigen enfoques específicos y herramientas para identificar y evaluar la necesidad de programas de mejora de la seguridad. Las investigaciones y estudios que han seguido a estos grandes incendios han mostrado que muchos túneles de carretera existentes precisan medidas adicionales y específicas para garantizar unas condiciones seguras a los usuarios. Incluso en aquellos túneles en los que ya se hayan realizado actuaciones de mejora, puede ocurrir que aun así no cumplan con las normas de seguridad actuales como consecuencia de la reciente evolución de los reglamentos.

Tanto los incidentes como los estudios posteriores han incrementado la alarma que, sobre los riesgos en los túneles existía entre los técnicos involucrados; desde los proyectistas y los explotadores hasta los representantes de la autoridad. Parece claro que la mejora de la seguridad exige no solo una mejora de la infraestructura y/o de los equipamientos sino igualmente, y a veces principalmente, una clarificación de la organización de la gestión de la seguridad y de adaptación de los procedimientos.

Es importante contemplar en un proyecto de actualización de un túnel los cambios socioeconómicos que ocurrieron y considerar la inclusión de elementos adecuados de

seguridad, ajustados a un nuevo período de operación que ocurrirá después del proceso de actualización.

El diagnóstico detallado y riguroso de un túnel, es una etapa esencial en el proceso de su modernización y renovación. Desafortunadamente esta etapa es frecuentemente dejada de lado.

Un diagnóstico físico de un túnel requiere:

- comprobar y describir de una forma precisa su funcionalidad y su geometría,
- redactar un informe detallado sobre su estado general, evaluando en particular la resistencia al fuego, las incertidumbres y riesgos potenciales, y las pruebas y ensayos que sería imprescindible acometer para poder realizar estudios detallados,
- hacer un listado de todo el equipamiento existente, sus funciones, su estado, su tecnología, sus características reales y de todo el almacén de repuestos que pudiera estar disponible,
- evaluar la vida útil remanente del equipamiento antes de su reposición, e identificar la viabilidad o no de las piezas de repuesto en el mercado, lo que es importante a causa de la obsolescencia tecnológica de los equipos,
- tener constancia de los informes de mantenimiento e inspección, de los fallos de funcionamiento y del porcentaje de roturas.

Este diagnóstico físico debe ser además complementado con otro relativo a la organización, a los procedimientos de explotación y mantenimiento y a la organización de las intervenciones de rescate y salvamento. Esta etapa del diagnóstico puede eventualmente llevar a establecer acciones de formación de las diferentes partes que forman los equipos de intervención, con el fin de mejorar las condiciones globales de seguridad del túnel en una etapa inicial previa a la renovación.

Al diagnóstico debe seguir un análisis del riesgo basado en el estado actual del túnel. Este análisis tiene un doble objetivo:

- valorar si el túnel puede continuar operativo en su estado actual, previo a la renovación, o si es necesario tomar alguna medida transitoria temporal:

restricciones al acceso de algunos vehículos – refuerzo de las medidas de vigilancia e intervención – equipamiento adicional – etc.

- establecer como referencia el estado existente desde el punto de vista de la seguridad, con el fin de afinar la definición del programa de renovación.

El diagnóstico tiene que identificar, sin correr el riesgo de situaciones inesperadas durante las obras, si las instalaciones existentes, supuestamente en condiciones de servicio, pueden ser modificadas y/o integradas en las futuras instalaciones actualizadas, asegurando su compatibilidad tecnológica y prestaciones, en particular para la gestión técnica centralizada y los servicios o sistemas automáticos de monitoreo y supervisión.

En la evaluación de la seguridad de los túneles existentes, debería prestarse una especial atención a los cambios en sus condiciones, tales como volumen y composición del tránsito, transporte de mercancías peligrosas, trabajos de construcción en sus proximidades, etc. que pueden dar lugar a la necesidad de mejoras.

La modernización, en particular por motivos de mejora en la seguridad, y la renovación de los túneles existentes en servicio, da lugar a problemas específicos de análisis y metodología. El grado de libertad es menor que para túneles nuevos porque es necesario tener en cuenta los espacios y las restricciones existentes; sin embargo, las tecnologías específicas para cada tipología de equipamiento y su integración son idénticas.

La renovación y modernización de un túnel en servicio muy frecuentemente derivan en un incremento del plazo de construcción y de los costes, en unas condiciones de seguridad bastante bajas durante la ejecución de los trabajos y en un impacto difícilmente controlable sobre el volumen y las condiciones de tránsito. Estos inconvenientes son frecuentemente el resultado de un análisis incompleto de la situación existente, de las condiciones reales del túnel, de sus instalaciones de su entorno, y de una carencia de estrategia y procedimiento que aliviarían los efectos sobre el tránsito.

En función del entorno físico del túnel y de los espacios disponibles, podría no ser aceptable el programa óptimo de modernización de la infraestructura o del equipamiento y sería necesario definir un programa más restrictivo. Éste podría requerir la implantación de medidas compensatorias que permitan alcanzar el nivel requerido de un modo global.

En la fase de diseño y conceptualización del proyecto se requiere trasladar el programa de renovación y modernización a un pliego de especificaciones técnicas y contractuales, y posteriormente asegurar que sean implementadas.

Esta etapa requiere un análisis muy detallado de:

- las sucesivas etapas de construcción, el contenido de cada una de ellas y la secuencia más lógica y prioritaria de los trabajos,
- las condiciones de seguridad en el túnel en cada una de las etapas de construcción. Ello requiere análisis de riesgo parciales y la adopción, si fuera necesario, de medidas compensatorias: reglamentación de la circulación – restricciones – patrullas – refuerzo de los equipos de intervención – etc.,
- las condiciones de circulación en el túnel y en sus accesos, con restricciones parciales o temporales, según las diferentes fases de las obras, incluyendo disposiciones diferentes para horario diurno y nocturno, para periodos normales o vacacionales, y la previsión de desvíos provisionales y de afección global a las condiciones de circulación y de seguridad en la zona afectada,
- las restricciones y servidumbres, las limitaciones parciales y globales de plazos contractuales para la ejecución de los trabajos, con el objetivo de definir, por un lado, las especificaciones contractuales para el contratista y, por otro, implementar todos los preparativos temporales necesarios y para llevar a cabo una campaña de información a los usuarios y residentes.

Una vez que se ha analizado la situación actual del túnel, la segunda etapa trata de definir la situación futura del túnel después de los trabajos de renovación que pueden ser aceptables en relación con el objetivo del nivel de seguridad definido. Esto puede realizarse desarrollando programas de renovación y evaluando de nuevo el nivel de seguridad del túnel renovado con todas las medidas de mejora. Puede aplicarse de nuevo el análisis de riesgos para comprobar un nivel adecuado de seguridad o para evaluar diversas alternativas de mejoras, teniendo en cuenta criterios de rentabilidad. Los programas de renovación dependen del contexto específico de cada túnel, de sus restricciones y de su entorno. Puede seguirse un proceso iterativo de análisis de riesgos



para alcanzar un acuerdo entre todos los intervinientes en el proyecto, respecto de un nivel de seguridad aceptable.

### **3.9. Comportamiento humano asociado al trazado de túneles**

El conocimiento del comportamiento humano es decisivo para optimizar los dispositivos de comunicación y diseñar los elementos de seguridad, incluidos los dedicados a la auto evacuación en caso de emergencia y, los protocolos de operación del túnel y de los servicios de emergencia, que deben ser capaces en todo momento de coordinarse para asegurar la gestión óptima de un evento extraordinario.

El conjunto del túnel, incluida la gestión de su explotación, juega un papel importante en la seguridad, ya que determina lo que los usuarios vean como puedan responder, tanto ante situaciones normales como de incendio u otra emergencia que pueda ocurrir en el túnel.

El tipo de normas de circulación, su cumplimiento por parte de los automovilistas, las características de los vehículos y las cargas que transportan influyen significativamente en el nivel de seguridad del túnel.

Es posible considerar medidas adicionales respecto a las condiciones mínimas definidas por la Directiva UE, por ejemplo, a la hora de tener en cuenta en la seguridad de los túneles, el factor humano y el comportamiento de los conductores.

### **3.10. Normativa internacional**

#### **3.10.1. *Directiva europea***

Las Directivas Europeas tienen su origen en las recomendaciones que surgieron luego de los siniestros graves ocurridos en los túneles, los cuales brindaron valiosas enseñanzas que fueron luego transformadas en recomendaciones por parte de distintas instituciones especialistas y preocupadas por la problemática; tal el caso de la Asociación Mundial de carreteras y las Normas de España tomadas como referencia en este informe.

De allí surge principalmente la Directiva Europea 2004/54/CE y sus anexos del Parlamento y Consejo Europeo, dictada el 29 de abril de 2004 que hoy rigen para los túneles de la Unión.

También resulta de aplicación para la Unión Europea la Directiva 94/95/CE del Consejo, que regula el transporte de mercancías peligrosas en el ámbito comunitario, con sus modificaciones posteriores.

### **3.10.2.      *Normativa española***

España ha adoptado gradualmente en general las Directivas Europeas generando directrices propias que se describen a continuación:

- Real Decreto 635/2006.
- Orden Circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles.
- Real Decreto sobre dispositivos de limitación de velocidad en determinadas categorías de vehículos.
- Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de accidentes en los transportes de mercancías peligrosas por carretera y ferrocarril. Ley de Ordenación de los Transportes Terrestres, su Reglamento de desarrollo, complementada por la Ley 29/2003 que modificó la LOTT y el Baremo Sancionador.
- El Real Decreto 230/1998, de 16 de febrero por el que se aprueba el Reglamento de explosivos.

### **3.10.3.      *Normativa argentina y del Mercosur***

Entre las normas de seguridad, pesos y dimensiones asociada al tránsito en túneles se mencionan<sup>5</sup>:

- Legislación que “Regula la Preservación del Recurso Aire y la Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica - Emisión Contaminante” (Ley GCBA 1356/04) y las características urbanísticas y arquitectónicas del entorno
- El Decreto 32/18 publicado en Boletín Oficial el 11 de enero de 2018 que establece las configuraciones de vehículos de cargas que no requieren permisos de tránsito y que son de libre circulación en rutas nacionales.

### **3.10.4.      *Otras normativas relacionadas a túneles***

Existen otras normativas y recomendaciones en diferentes países y organizaciones internacionales que pueden ser consideradas como referencia, entre las cuales destacan:

- CIE 88:1190 “Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses”.
- National Ambient Air Quality Standards (Environmental Protection Agency – USA).
- Normativa Ministerio de Obras Públicas de Chile y su Manual de Carreteras de Chile, Sección Túneles.
- Documento con recomendaciones de la UNECE/2001.
- Transporte de mercancías peligrosas en túneles de carretera. Seguridad en los túneles, Paris: OCDE Publicaciones, ISBN 2001 92-64-19651-X
- Australian Code for the Transport of Dangerous Goods by Road & Rail, Edición 7.3, Agosto 2014.
- TRANS/AC.7/9/Add.1 (UN). AMCA Air Movement and Control Association.

---

<sup>5</sup> En Argentina se modificaron recientemente las normas de seguridad, ampliando dimensiones, configuraciones y pesos de los vehículos.

- OECD/PIARC ERS2 “Transport of dangerous goods through road tunnels”.
- Safe T: Seguridad.
- EuroTAP: Evaluación de túneles.
- L-SURF: Diseño, instalación subterránea a gran escala.

Segunda Parte:

# **Elementos de ingeniería y seguridad en los túneles del Paso Cristo Redentor**

---

## 1. El Paso Cristo Redentor

El Paso Cristo Redentor (PCR) es el principal nodo de vinculación vial entre Argentina y Chile, comunicando las localidades de Mendoza y Los Andes; y es al mismo tiempo el corredor bioceánico actualmente más importante para el transporte terrestre de cargas y pasajeros entre Chile, Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. Este es el cuarto eje de conexión continental entre el Pacífico y el Atlántico considerado en la Iniciativa para la Integración de la Infraestructura Regional Suramericana (IIRSA)<sup>6</sup>.

Está ubicado a 3.300 metros de altura y está conformado por el Túnel Cristo Redentor (TCR) -también conocido como Libertadores- y el Túnel Caracoles, un antiguo túnel ferroviario en desuso. El túnel Cristo Redentor tiene una extensión 3,8 km y el Caracoles de 3,17 km.

Este paso fronterizo registra el mayor volumen de tránsito con 2.200 vehículos por día, de los cuales un 40% son camiones, para un total diario aproximado de 800 unidades de carga. La mercancía transportada por el PCR alcanza 5,26 millones de toneladas y representa el 77% del total del comercio carretero por paso de frontera con Chile. El 70% del volumen de carga que atraviesa el PCR es de origen argentino, 15% de origen chileno y 15% proviene de otros países del MERCOSUR, destacando el papel clave del Paso Cristo Redentor en la integración regional e internacional [9].

---

<sup>6</sup> En IIRSA se han identificado diez ejes de integración y desarrollo: Andino, Andino del Sur, Capricornio, Hidrovía Paraguay- Paraná, Amazonas, Escudo Guayanés, Del Sur, Interoceánico Central, MERCOSUR-Chile, Perú-Brasil-Bolivia.



**Figura 6. Localización del proyecto**  
**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

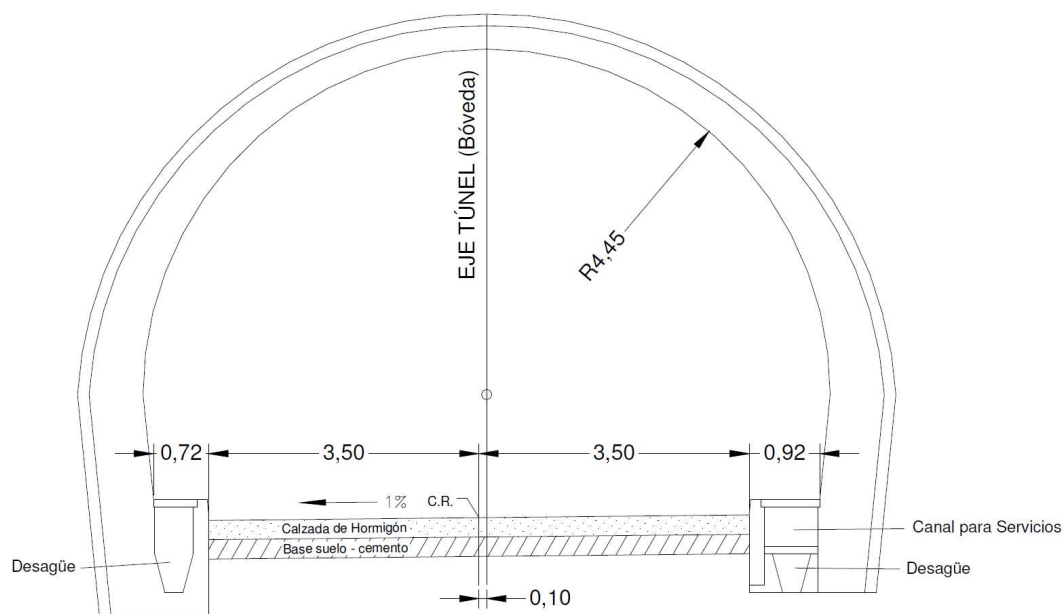
El Cristo Redentor es el túnel principal, consta de dos vías y opera con tránsito en ambas direcciones, en tanto el túnel Caracoles, un antiguo túnel ferroviario, fue habilitado en 1997 en una sola vía para el paso de vehículos livianos. Limitado por su carril único y además por su gálibo útil, éste es utilizado para diferentes operaciones: como túnel de servicio, como alternativa en casos de emergencias por reparaciones del túnel principal y como vía complementaria para aumentar la capacidad de transporte por el paso fronterizo y asegurar así la continuidad del servicio.

El acceso del lado argentino se da por la Ruta Nacional RN N°7 atravesando 208 km por relieve montañoso en la región de Cuyo (Figura 6). Por el lado chileno, el acceso se da por la Ruta N°60 que atraviesa transversalmente a la altura de la V Región de Valparaíso, cruzando 13 comunas. A ese corredor formado por las vías de acceso en los dos países y los túneles se denomina el Corredor Sistema Cristo Redentor (CSCR).

Su diseño, proyecto y construcción data de la década del setenta del siglo pasado, y fue puesto en servicio en el año 1980, con la metodología y tecnología existente en la época. Es la única obra en la región que ha tenido desde sus inicios una administración bilateral, mediante acuerdos que permitieron llevar adelante tan importante obra.

Hoy se cuenta con regulaciones acordadas entre ambos países que establecen la operación de este túnel en las cuales se distinguen tres tipos de operación: normal, de emergencias en época de invierno, y operación ante transporte de cargas peligrosas.

Con el paso del tiempo, la nueva demanda de tránsito existente y las nuevas tecnologías, hacen necesario y conveniente llevar adelante una renovación y complementación de los sistemas instalados, para lo cual ambos países han avanzado en un proyecto unificado.



**Figura 7. Perfil transversal tipo actual del túnel Cristo Redentor**

**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

De acuerdo con la metodología constructiva y la tecnología existente en la época de su diseño y construcción, el túnel fue equipado con los siguientes sistemas principales:



- Sistemas eléctricos de alta tensión: transformadores, tableros distribución, grupo generador, etc.
- Sistema de Iluminación.
- Sistema de vigilancia y alarma: CCTV.
- Detección de Monóxido de Carbono (CO) sólo en TCR.
- Teléfonos de auxilio en ambos túneles.
- Sistema de señalización: semáforos, letreros luminosos que indican ubicación de los teléfonos en ambos túneles y sistemas contra incendio.
- Sistema contra incendio: extintores ubicados en nichos en ambos túneles y red seca solo en TCR.
- Portones en ambos túneles, para cierre por temporales de nieve. El del TCR es automático y con sistema anticongelante.

En la actualidad existen acuerdos entre ambos países que regulan la administración del túnel que dicen relación con su operación. Para ello se ha diseñado un reglamento que contempla la operación normal y de emergencia, dentro de esta última se incluyen acciones para operar el paso de cargas peligrosas y como se actúa ante emergencias invernales. Los requisitos establecidos en el reglamento están supeditados a las condiciones de infraestructura y operación de los túneles, sujetas a modificación cuando las condiciones reales así lo requieran, previo acuerdo entre las autoridades de aplicación de ambos países<sup>7</sup>. Todos los años, en el marco del Grupo Técnico Mixto<sup>8</sup>, ambos países analizan el comportamiento del paso fronterizo y se toman las medidas, ya sean correctivas o modificatorias, que permitan un buen funcionamiento.

Los vehículos deben transitar por el túnel Cristo Redentor a una velocidad comprendida entre los 40 y 60 km/h, con excepción de los vehículos que transportan carga peligrosa

---

<sup>7</sup> Dirección Nacional de Vialidad de la República Argentina y la Dirección de Vialidad de la República de Chile

<sup>8</sup> Consiste en una reunión bilateral anual entre Argentina y Chile, que tiene a su cargo el estudio de vías de interconexión terrestre entre el Atlántico y el Pacífico, a través de la cooperación internacional en el contexto de la integración del Cono Sur.

o sobredimensionadas, que están obligados a hacerlo a una velocidad máxima de 40 km/h.

En lo que respecta al perfil longitudinal del Túnel Caracoles, los levantamientos topográficos realizados han permitido determinar las pendientes longitudinales de la rasante del túnel, las cuales son sumamente exigentes en el sector argentino, con valores medios del 0,2% y, por tanto, por debajo del valor mínimo normativo para garantizar las condiciones de drenaje del túnel que es de 0,3%. En el sector chileno la pendiente longitudinal presenta valores medios del 0,7%. El punto alto del eje se encuentra en el interior del túnel, en el sector argentino, a unos 580 m de la frontera.

El drenaje de la plataforma se resuelve tanto en el interior de los túneles, como en las bocas de forma natural, es decir, evacuando por gravedad tanto los caudales de infiltración como de vertidos hacia las bocas del túnel, para a continuación, devolverlos a los cauces naturales. No se han encontrado obras complementarias asociadas al drenaje, salvo un pequeño depósito de decantación en la boca chilena en precario estado de conservación.

## **2. El proyecto**

### **2.1. Conceptualización técnica**

El proyecto de Ampliación de Capacidad y Mejoras de Seguridad en el Corredor Sistema Cristo Redentor tiene como principal objetivo mejorar la conectividad de este paso fronterizo entre Chile y Argentina, considerando el diseño de las obras de ampliación de la sección del actual Túnel Caracoles, la construcción de galerías de Interconexión, el mejoramiento integral del Túnel Cristo Redentor, y unificación de la operatividad del sistema de túneles, en base a un estándar moderno y de alta seguridad conforme a la normativa internacional.

El costo total del proyecto se estima en USD750 millones y se realizará en dos fases, priorizando actividades de acuerdo con los plazos y sistemas previstos para el desarrollo de los trabajos de implementación de las obras.

En la primera fase, prevista para iniciar en 2020, se prevé realizar la ampliación y adecuación de la sección del actual túnel Caracoles y la construcción de las galerías de interconexión entre dicho túnel y el túnel del Cristo Redentor.

En una segunda fase se desarrollará el proyecto constructivo de las instalaciones, equipamientos y sistemas de gestión para ambos túneles, así como el proyecto de reparación y rehabilitación del túnel del Cristo Redentor.

La sección funcional definida para el Túnel Caracoles ampliado responde a los siguientes criterios (ver Figura 8):

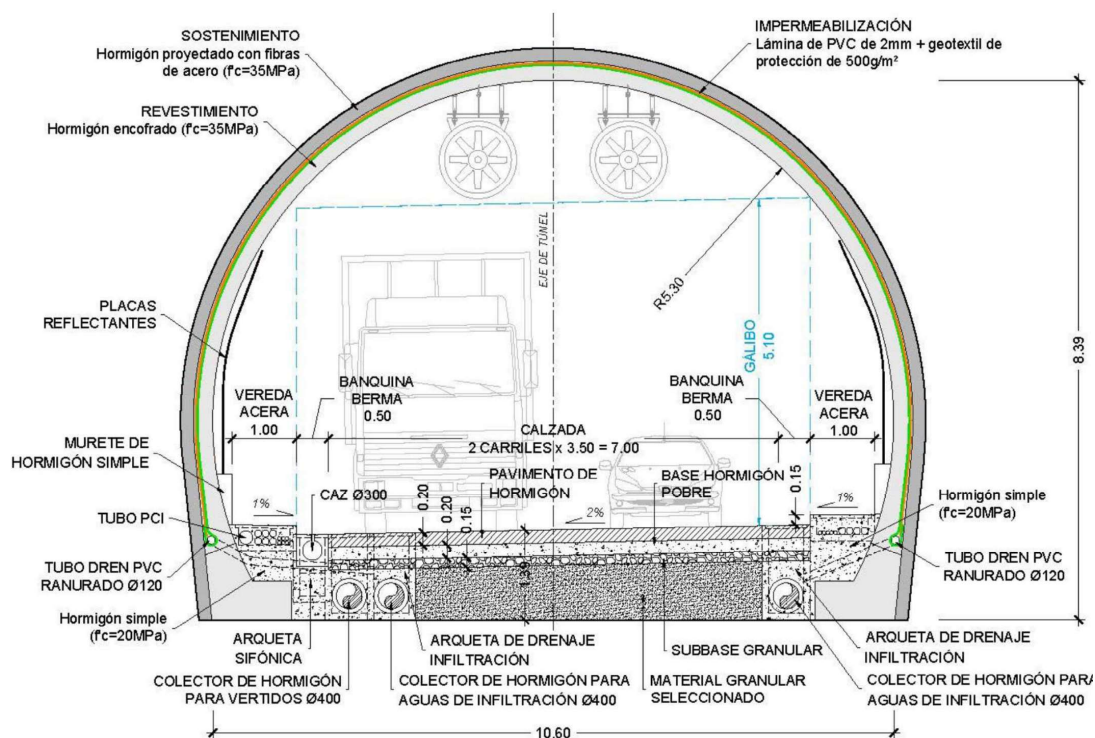
- Se establecen dos carriles operativos en el interior del túnel con ancho 3,50 m;
- La sección transversal incluye aceras para el tránsito peatonal de 1 m de ancho mínimo;
- La calzada incluye sendas bermas (banquinas) de 0,5 m de ancho en ambos lados, destinadas a favorecer la detención o parada de los vehículos pesados en caso de emergencia en el interior del túnel;
- El gálibo se establece en 5,1 m en la zona operativa de la calzada.

Este gálibo está en consonancia con la tendencia actual en el diseño de túneles en Latinoamérica, dadas las dificultades para acotar las dimensiones futuras de la carga en los grandes corredores bioceánicos.

**Tabla 5: Requerimientos normativos para la definición de la sección transversal en túnel**

SECCIÓN TRANSVERSAL TÚNEL	MANUAL DE CARRETERAS CHILENO	DNV - ARGENTINA (2010)
Nº DE CARRILES/PISTAS	2 Ud. (recomendado)	---
ANCHO CARRILES/PISTAS	3,5 m – 4,0 m	$\geq 3,35$ m
ACERAS	0,75 m – 0,85 m	$\geq 0,70$ m
BERMAS/BANQUINAS	0,5 m (recomendado)	---
GÁLIBO	5,0 m	5,1 m

Fuente: Estudios de diseños de ingeniería



**Figura 8. Sección funcional representativa del Túnel Caracoles ampliado.**

Fuente: BID. Estudios de ingeniería

Cabe indicar que la sección del Túnel Caracoles requiere un ancho de berma (banquina) superior, debido a la necesidad de disponer de un sobreancho para que las curvas horizontales presenten las mismas condiciones de seguridad que las rectas, tanto cuando el túnel bajo determinadas circunstancias vaya a operar como bidireccional, como por motivos de visibilidad en el caso de operación normal.






## **2.2. Galerías de interconexión**

El proyecto contempla interconexión de ambos túneles a través de cinco galerías que servirán de vías de escape en caso de necesidad como un accidente, además de sistema de ventilación.

El número de galerías y su tipología se ha establecido tomando en cuenta los requerimientos normativos a nivel nacional e internacional, que establece la necesidad de disponer de galerías vehiculares cada 1.500 metros, se han diseñado dos galerías vehiculares, así como los condicionantes geológicos que pueden influir en su ubicación, lo que ha determinado la implantación de cinco galerías de interconexión entre los túneles; tres de ellas de tipo peatonal, dos en la parte argentina, una en la chilena y dos vehiculares, una en el sector chileno y otra en el sector argentino.

La posición de las galerías se ha ajustado para mantener inter-distancias máximas de 500 m, y buscando la idoneidad de acuerdo con la naturaleza de los terrenos atravesados por las excavaciones. En la siguiente tabla se presentan las galerías previstas:

**Tabla 6: Ubicación de las galerías de Interconexión e inter-distancias.**

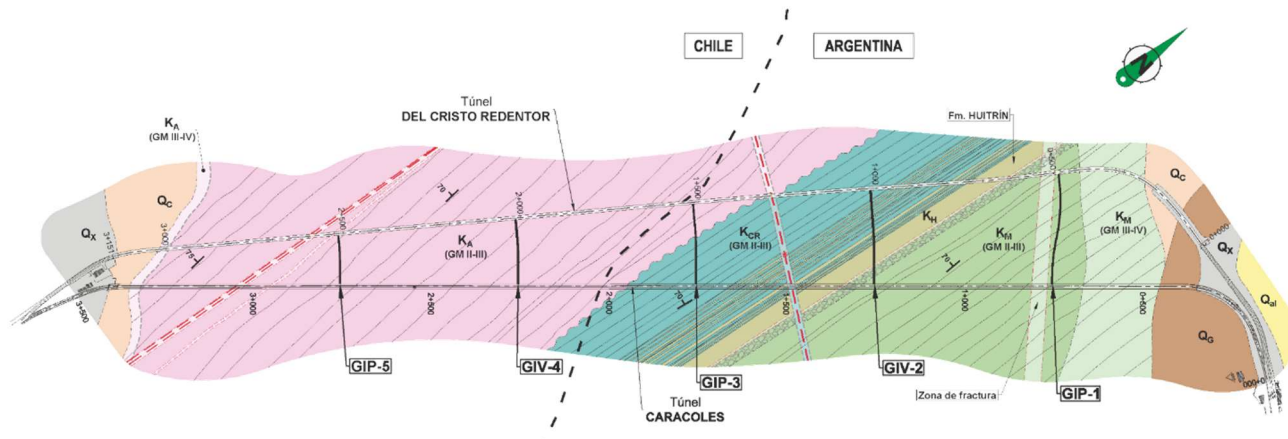
	TÚNEL CARACOLES		TÚNEL CRISTO REDENTOR		PAÍS	LONGITUD GALERÍAS [m]
	PP.KK.*	Distancia a anterior [m]	PP.KK.**	Distancia a anterior [m]		
<b>Evacuación por túnel falso en Portal Argentino</b>	0+220	-	0+000	-	-	-
<b>Galería de Interconexión Peatonal 1</b>	0+755	535	0+520	520		311,4
<b>Galería de Interconexión Vehicular 2</b>	1+255	500	1+015	495		265,4
<b>Galería de Interconexión Peatonal 3</b>	1+755	500	1+515	500		225,6
<b>Galería de Interconexión Vehicular 4</b>	2+255	500	2+015	500		183,5
<b>Galería de Interconexión Peatonal 5</b>	2+755	500	2+515	500		137,5
<b>Portal Chileno</b>	3+405	650	3+150	635	-	-

\* PP.KK. referidos al trazado realizado.

\*\* PP.KK. referidos al comienzo del túnel falso, lado argentino.

**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

En la ilustración siguiente se visualizan las ubicaciones mencionadas:

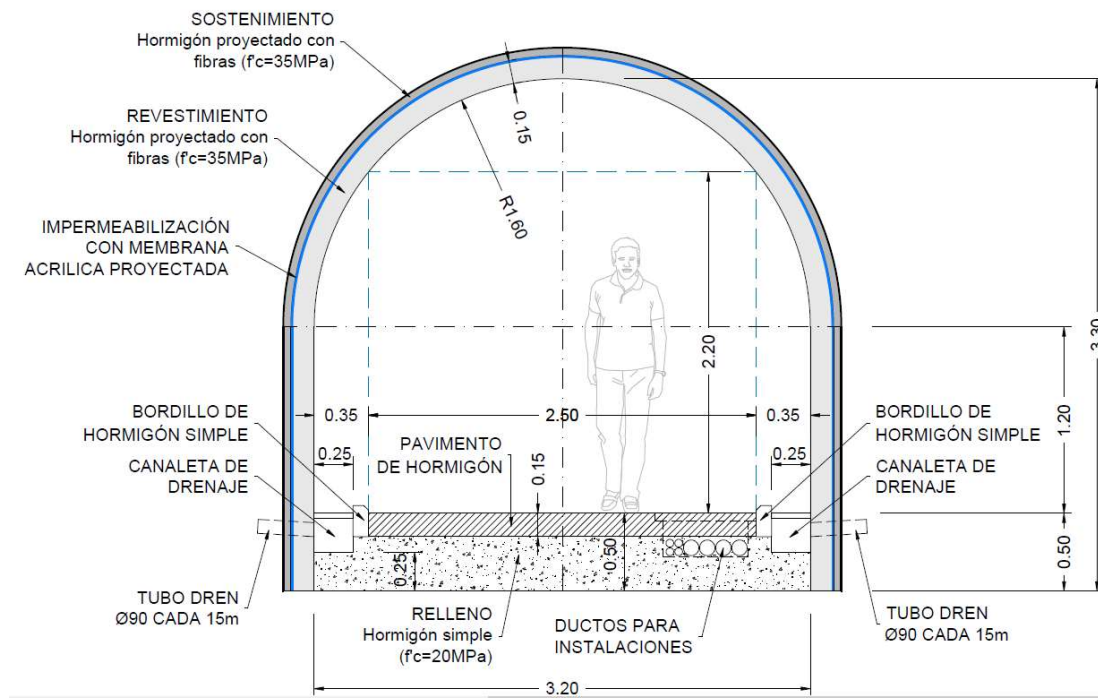


**Figura 9. Posición de las galerías de interconexión**

**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

### **2.3. Sección funcional de las galerías**

En la figura siguiente se muestra la sección tipo de las galerías peatonales. Estas galerías tienen una anchura libre de 3,20 m y una altura libre de 2,20 m.

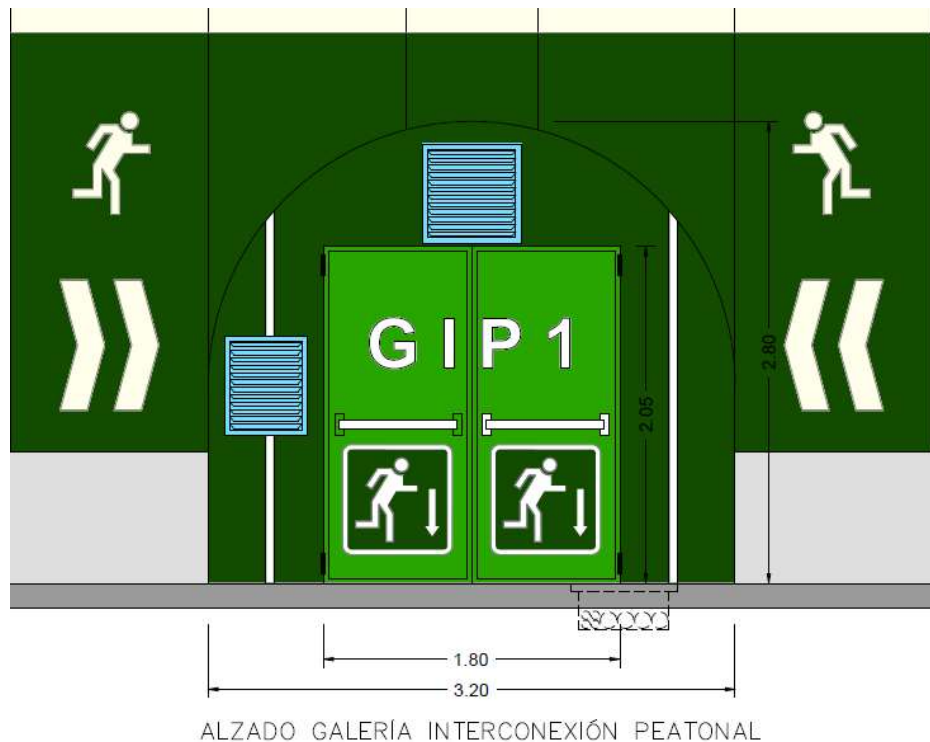


**Figura 10. Sección tipo de las galerías de interconexión de tipo peatonal**

**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

Se incluye la puerta especial que aísla la galería del túnel, de tipo RF-120 formada por 2 hojas de 0,90 m x 2,05 m., según se presenta en la siguiente imagen.



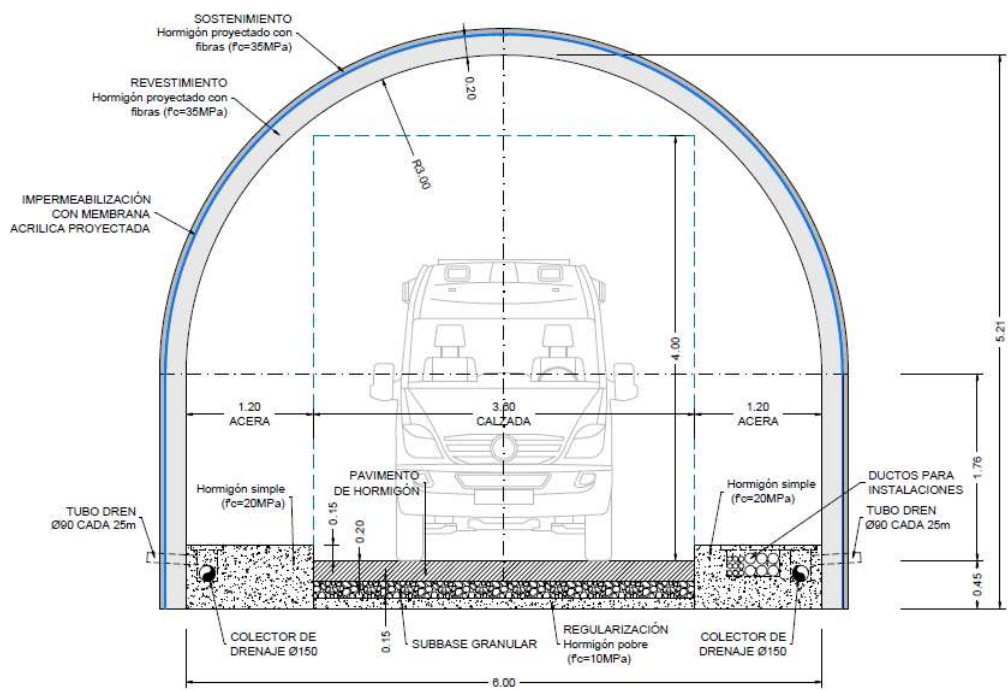


**Figura 11. Sección funcional de las galerías de interconexión de tipo peatonal**

**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

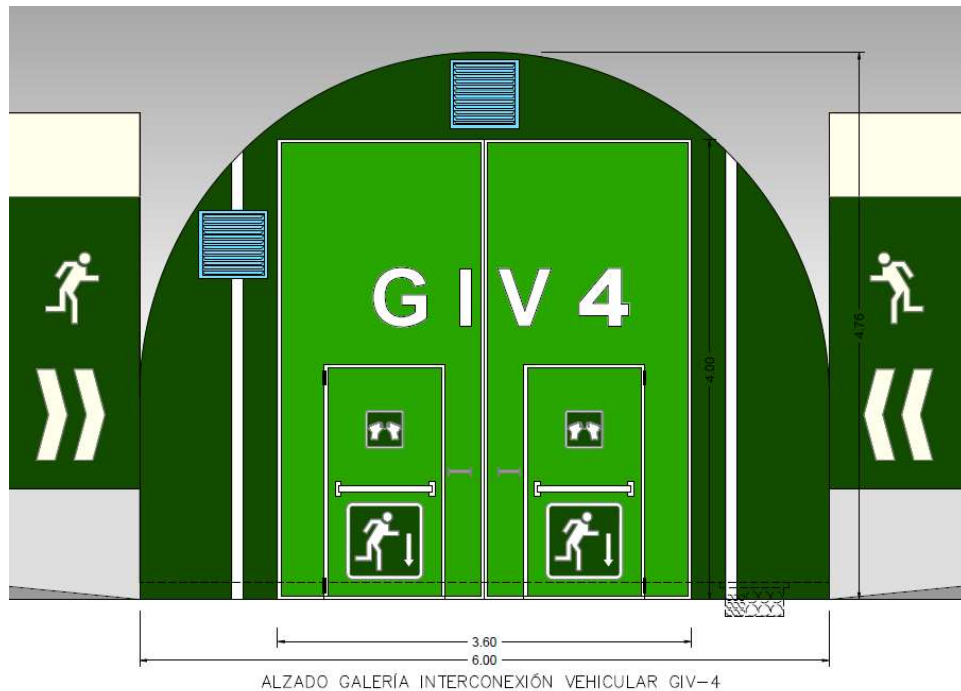
Las galerías vehiculares disponen de los mismos elementos que las peatonales, pero las puertas tienen el tamaño necesario para permitir el paso de los vehículos de emergencia, como ambulancias o vehículos ligeros de bomberos, para lo cual se ha dispuesto un gálibo horizontal de 3,60 m y vertical de hasta 4,0 m, tal y como puede apreciarse en la sección tipo mostrada en la figura 12.

En las figuras 11 y 12 se muestran los detalles de la solución funcional adoptada para las galerías vehiculares, en este caso separadas de los túneles mediante las correspondientes puertas con dos hojas de 1,80 m x 4,00 m, y una hoja para peatones adicional, todas ellas de tipología RF-120.



**Figura 12. Sección tipo de las Galerías de Interconexión de tipo vehicular**

**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

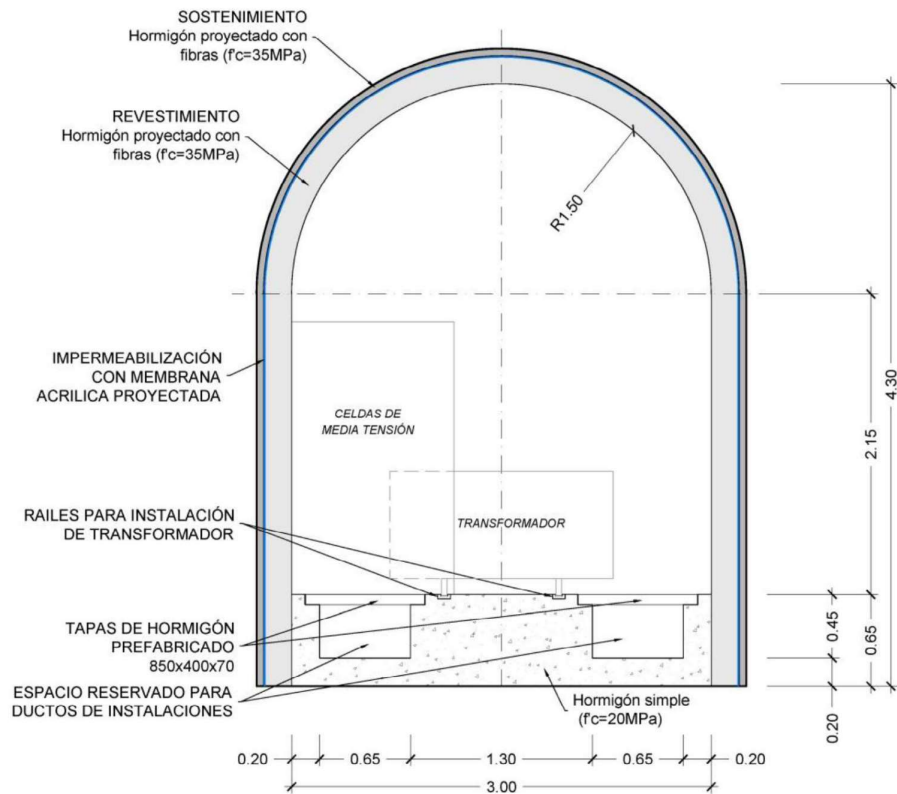


**Figura 13. Sección funcional de las Galerías de Interconexión de tipo vehicular**

**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

## 2.4. Centros de transformación

Teniendo en cuenta las exigencias de las instalaciones de seguridad y servicio, es necesario construir dos galerías para ubicar los dos centros de transformación. Dichas galerías están adosadas a las galerías vehiculares; una en el sector argentino y otra en el sector chileno respectivamente. En la figura siguiente se muestra la sección tipo de las galerías de centro de transformación.



**Figura 14. Sección tipo de las Galerías de centro de transformación**

**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

## **2.5. Acceso a los portales**

Las soluciones en los accesos al túnel están notablemente condicionadas por la situación actual del viario, la necesidad de conexión con los tramos de carretera existentes antes y después del túnel, y la interrelación con el vial del Túnel del Cristo Redentor, ya que debe garantizarse el tránsito por ambas calzadas, verificando la condición de túneles con carácter bidireccional ante cualquier necesidad que pueda plantearse durante la etapa de servicio de la infraestructura.

En el acceso al portal argentino la solución de trazado del eje Caracoles está notablemente condicionada por la posición del Peaje Las Cuevas, ya que debe entroncarse antes del mismo para hacer operativo el tránsito en ambos sentidos.

En la figura siguiente puede apreciarse la solución definida para el acceso al portal argentino, la cual mantiene de forma general la plataforma actual que permite el tránsito por el Túnel Caracoles, con los ajustes oportunos en el perfil para facilitar el drenaje de las aguas captadas por el túnel. Se aprecia el desarrollo de la curva en planta de radio 200 m, con las correspondientes clotoides para cumplir las exigencias impuestas por la normativa. Dicha curva se concentra principalmente en el tramo en túnel falso, dispuesto desde la ubicación del cobertizo actual hasta el emboquille que permite la transición con el túnel en mina.

Con estas condiciones, la velocidad de tránsito admitida por la infraestructura en este tramo será de 70 km/h, si bien cabe indicar que la longitud de dicha curva es inferior a 180 m, por lo que apenas tiene trascendencia en el interior del túnel.



**Figura 15. Acceso al portal argentino una vez concluida la ampliación del túnel Caracoles**

**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

Una vez realizada la conexión con la calzada que actualmente permite el paso por el Túnel Del Cristo Redentor se dispondrá de una única plataforma pavimentada para albergar ambas calzadas y permitir el desvío hacia ambos túneles si las condiciones así lo requieren, algo que sucederá durante los trabajos de reparación y adecuación del Túnel del Cristo Redentor, una vez finalizada la ampliación del Túnel Caracoles.

El acceso al portal chileno se ha diseñado ajustando el trazado para evitar radios de curvatura inferiores a 200 m, respetando las zonas ocupadas por la antigua estación ferroviaria de Caracoles y el edificio de la Vialidad Chilena. De esta forma se logra no penalizar la velocidad de proyecto lograda en el portal argentino, que es de 70 km/h.

Adicionalmente, los ajustes logrados en el perfil longitudinal permiten llegar a cota con la actual plataforma, brindando la oportunidad de explanar buena parte del espacio



En la figura siguiente se muestra la solución descrita:



## 2.6. Equipamientos de seguridad

-60-

superior a 3.000 metros e intensidad de circulación inferior a 2.000 vehículos/carril/día; tal como se resume en la tabla siguiente:

**Tabla 7: Medidas de seguridad contempladas en el proyecto**

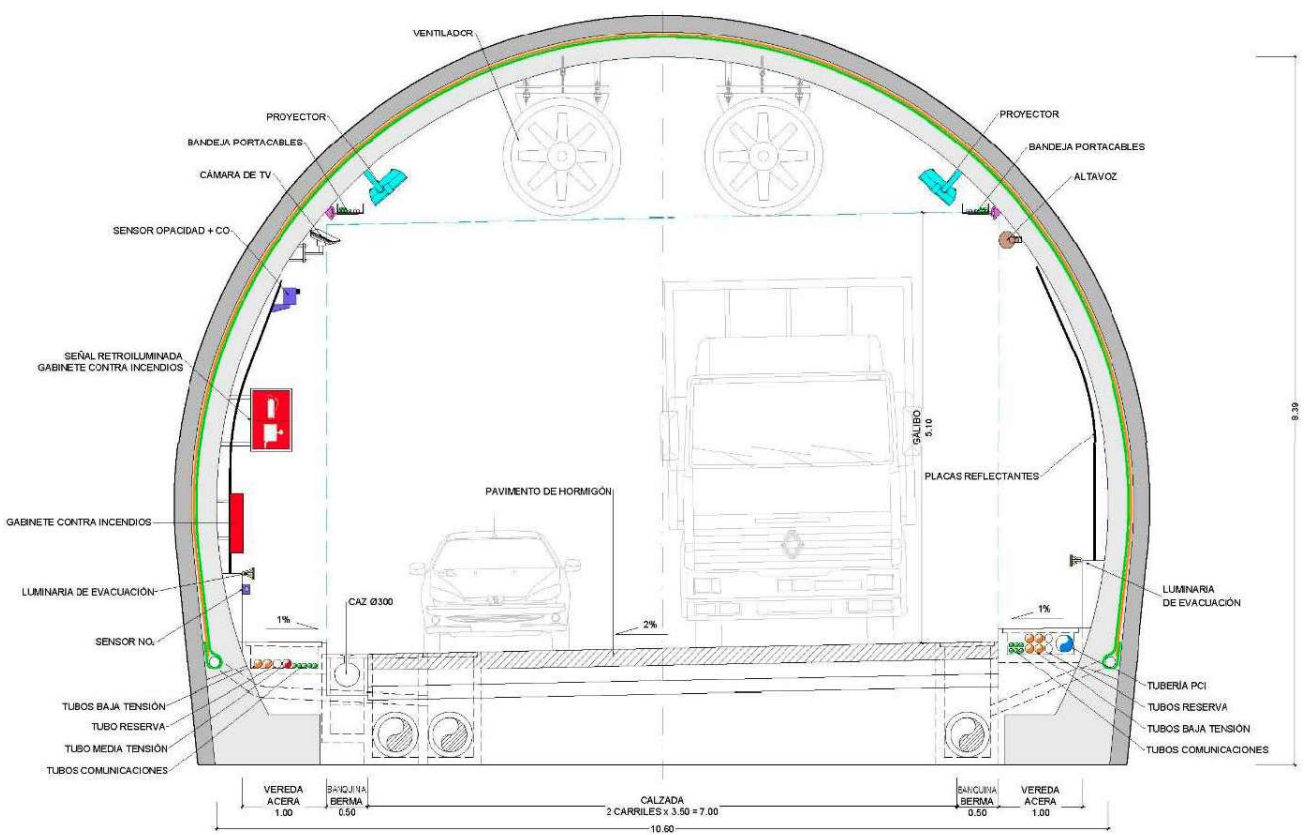
Equipamiento	Criterio	Equipamiento	Criterio
Salidas de emergencia	Sí (500 m)	Cable detección de incendios	Sí
Conexiones transversales	Sí (1.500 m)	Detección automática de incidencias	Sí
Drenaje de líquidos tóxicos	Sí (si hay MMPP)	Señalización de salidas y equipamiento	Sí
Centro de control	Sí	Señalización Vial	Sí
Circuito cerrado de televisión	Sí	Paneles de señalización variable	Evaluar (sistema de detención interna)
Iluminación normal	Sí	Barreras exteriores o Medios de cierre	Evaluar
Iluminación de seguridad	Sí	Semáforos exteriores	Sí
Iluminación de emergencia	Sí	Semáforos interiores	Sí (sistema detención interna)
Doble suministro eléctrico	-	Megafonía	Sí (en refugios y salidas)
Ventilación	Sí	Red de hidrantes	Sí
Generadores de emergencia	Sí	Sistemas de fijos de extinción de incendios	-
Sistema de alimentación ininterrumpida	Sí	Sistema de radiocomunicación	Sí
Detectores de CO/opacímetros	Sí	Mensajería de emergencia (radio)	Sí

**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

Para asegurar un plan de seguridad único e integrado se ha considerado que los túneles Cristo Redentor y Caracoles lleven incorporados los mismos equipamientos e instalaciones. Asimismo, los equipamientos incluidos con los requerimientos establecidos tanto en las normas argentinas como chilenas de manera que se ajusten tanto a las normativas nacionales como internacionales.

La siguiente imagen ilustra sobre los equipamientos e instalaciones contempladas para los túneles del complejo:

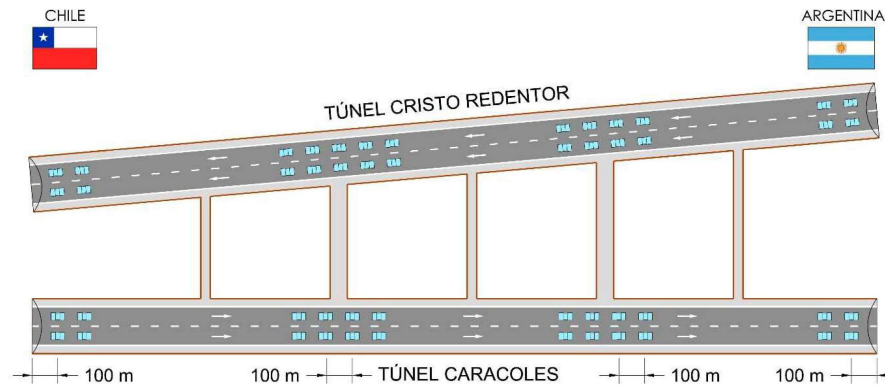




**Figura 17. Equipamientos e instalaciones en los túneles Cristo Redentor y Caracoles**

**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

El sistema de ventilación ha sido diseñado considerando un incendio con una potencia de 50 MW, cuyos efectos se han simulado aplicado técnicas de dinámica computacional de fluidos (CFD por sus siglas en inglés). Bajo estas consideraciones, se ha establecido que es necesario para el túnel caracoles una configuración de 24 ventiladores de 45 kW de potencia y para el Cristo Redentor se requiere de 26 ventiladores de 45 kW distribuidos según se presenta en la siguiente imagen.



**Figura 18. Esquema de ventilación de los túneles Cristo Redentor y Caracoles**  
**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

En cuanto a la alimentación eléctrica de los túneles se pretende garantizar el suministro de energía para todos los equipos de nueva implantación y solucionar las deficiencias actuales. Es por ello por lo que se ha considerado la renovación total de los centros de transformación, la realización de dos centros de transformación nuevos en el interior de las nuevas galerías de conexión 2 y 4, la ampliación del sistema de alumbrado por medio de nuevas luminarias e instalación de un sistema de alumbrado de guiado de emergencia, todo ello junto a la renovación del cableado existente.

La mejora de alumbrado considera la implantación de luminarias de manera tal de alcanzar los valores requeridos por la norma CIE 88:2004, lo cual se logrará mediante el reemplazo de luminarias con tecnología LED.

El control del tránsito se realizará con la información al usuario de las condiciones de uso del túnel, permitiendo o restringiendo la entrada o salida de los vehículos en caso de existir un incidente en su interior.

En los accesos de los túneles se instalarán los siguientes equipos:

- Panel de mensaje variable de 3 líneas y dos pictogramas a 300 metros del portal de entrada.

- Pórtico con semáforos RAV<sup>9</sup> a 200 metros y 50 metros de los portales de entrada en Chile y a 150 metros del portal de entrada de Argentina.
- Señal de afectación de carril a 100 metros del portal de entrada en Chile y a 150 metros del portal de entrada argentino
- Barreras de corte en cada boca de entrada de los túneles a 50 metros de los portales.
- Señal de control del límite de velocidad y señales de afectación de tránsito en los dinteles de los portales de acceso.

En el interior de los túneles se implantarán los siguientes elementos:

- 6 parejas de aspa-flecha en sentido de circulación y otras 6 parejas en sentido reversible en cada uno de los tubos cada 500 metros.
- 7 parejas de semáforos RA en sentido de circulación y otras 6 parejas en sentido reversible en cada uno de los tubos cada 500 metros.
- 4 paneles de mensaje variable de 2 líneas de 12 caracteres y un pictograma en ambos tubos.

El sistema de detección lineal de incendios tiene como función detectar y localizar de forma automática la presencia de un incendio en el interior de los túneles. Este sistema está compuesto de dos principales componentes que son un cable de fibra óptica midiendo temperaturas y una unidad central de control de sensores con los algoritmos necesarios de evaluación. Este sistema de detección de incendios está basado en el cable fibroláser que es un sistema de máxima seguridad que permite la caracterización del fuego y su evolución térmica.

Para los centros de transformación y el cuarto de energía situado junto al Centro de Control, se instalarán sistemas de detección de incendios puntuales compuestos por dos detectores de incendios en cada habitáculo de los locales técnicos, una central de

---

<sup>9</sup> Semáforo vehicular con las tres luces: rojo, amarillo, verde.

detección que supervisará cada detector y pulsador de alarma para evidenciar las alarmas y averías del sistema.

También se instalará un sistema de megafonía que estará compuesto de una central de amplificación con líneas de altavoces, la cual será la herramienta de respuesta más inmediata para disponer un plan de evacuación.

El sistema de radiocomunicaciones por su parte permitirá estas comunicaciones en el interior de los túneles con los siguientes servicios:

- 4 portadoras TETRA<sup>10</sup> que darán cobertura a los servicios de bomberos, policías, servicios de emergencia y protección civil.
- 4 emisoras comerciales de frecuencia modulada (FM).
- 4 canales de radio analógicas en la banda de VHF para los servicios de mantenimiento de los túneles.

Además, se instalarán postes SOS IP<sup>11</sup> sobre fibra óptica en el interior de los tubos, en las galerías de conexión y en el exterior de los túneles. En los centros de control se instalará un servidor habilitado para administrar todas las llamadas, integrado con el sistema SCADA<sup>12</sup> y una estación cliente con una interfaz IHM para configuración y mantenimiento del sistema.

Los túneles contarán con circuitos cerrados de televisión por medio de 40 cámaras de TV color fijas en el interior de cada uno de ellos. También se instalarán cámaras en las galerías de evacuación y cámaras domo móviles para visualizar las entradas de las puertas. Se colocarán 4 cámaras domo móviles en el exterior de los túneles, 2 de ellas a 100 metros del portal argentino y dos a 100 metros del portal chileno, orientadas hacia

---

<sup>10</sup> Tetrapol (TETRA) es un estándar para sistemas de radiocomunicaciones digitales profesionales, usados principalmente para dar servicio de radiocomunicación a fuerzas y cuerpos de seguridad, aunque también se ha empleado por otras organizaciones de servicios públicos y transporte. (Adaptado de Wikipedia).

<sup>11</sup> Equipo de comunicación de auxilio para conductores en túneles. Cuenta con manos libres y alta potencia de salida de audio. Algunos modelos permiten guardar extintores o mangueras.

<sup>12</sup> Supervisory Control And Data Acquisition (Supervisión, Control y Adquisición de Datos)

las bocas de los túneles. Por otra parte, se han contemplado dos centros de control, ubicados uno en el lado argentino y el restante en el chileno.

Se instalará un sistema de detección automática de incidentes (DAI) en tiempo real basado en la técnica de procesamiento digital de imágenes. Este sistema estará compuesto por equipos de procesamiento de imágenes y un servidor DAI con la plataforma software para la gestión del sistema.

La señalización de emergencia permitirá a los usuarios estar informados sobre diferentes aspectos que mejoren la seguridad, las salidas de emergencia, las vías de evacuación, los postes SOS, extintores, BIEs<sup>13</sup> e hidrantes. Se instalarán rótulos con frontales fotoluminiscentes translúcidos para la señalización de los equipos contra incendios.

La indicación de la distancia a la galería de evacuación más cercana se realizará en ambos sentidos mediante señales fotoluminiscentes instaladas cada 25 metros a tresbolillo en ambos túneles.

En las salidas de galerías de evacuación se instalará la siguiente señalización:

- Señales fabricadas en material fotoluminiscente en ambos lados de las salidas de emergencia.
- Rótulo luminoso con frontales fotoluminiscentes translúcidos con indicación de salida de emergencia sobre la puerta de evacuación.
- En el lado derecho de una puerta de evacuación se instalará un rótulo fotoluminiscente translúcido con indicación de un poste SOS y extintores en el interior de la galería de evacuación.

En cuanto al sistema de aforo de tránsito, se instalarán 3 estaciones de aforo en cada sentido de circulación, una en cada portal de entrada y salida y otra frente a la galería de evacuación peatonal número 3.

---

<sup>13</sup> Boca de incendio equipada. Toma de agua diseñada para proporcionar el suministro de agua en caso de incendio.

Se ha contemplado la actualización del sistema de gestión para permitir desde los Centros de Control ubicados en cada país, monitorizar y controlar el funcionamiento de los sistemas instalados.

El nuevo sistema de gestión centralizada incluirá el control y monitorización de los sistemas de ventilación, iluminación, suministro de energía, sistema de extinción de incendios y red de hidrantes, sistema de seguridad, vigilancia y control de túneles. Estas actuaciones se dividirán en los tres grandes bloques que integran el sistema: PLCs<sup>14</sup>, redes de comunicaciones y centro de control.

El control de los equipamientos de seguridad durante la explotación de los túneles se ha planteado con un esquema similar al actual, con un Centro de Control en cada una de las áreas de portales; pero con dos recomendaciones esenciales: la primera responde a la necesidad de que ambos Centros de Control funcionen interconectados a tiempo real, y la segunda es que el liderazgo en la gestión sea único; aunque se prevea una rotación de este liderazgo entre las agencias de vialidad argentina y chilena.

Durante la explotación del Túnel Caracoles, está prevista la circulación de vehículos pesados e incluso el tránsito de mercancías peligrosas. Cualquier accidente producido en el interior del túnel, en el que se vean implicados este tipo de vehículos, supondrá la necesidad de evacuar un determinado volumen de sustancias peligrosas, en muchos casos inflamables, que será necesario captar y transportar en condiciones seguras al exterior del túnel. Una vez allí, aparecerán nuevas necesidades, ligadas al almacenamiento y tratamiento adecuado de estos caudales para evitar vertidos incontrolados e impactos de tipo ambiental.

Por este motivo, y de acuerdo con los estándares de seguridad aceptados internacionalmente para este tipo de túneles, se ha diseñado un sistema separativo de drenaje, segregando los caudales de infiltración generados al drenar el terreno (red de infiltración) de aquellos con origen en vertidos en la plataforma vial (red de vertidos).

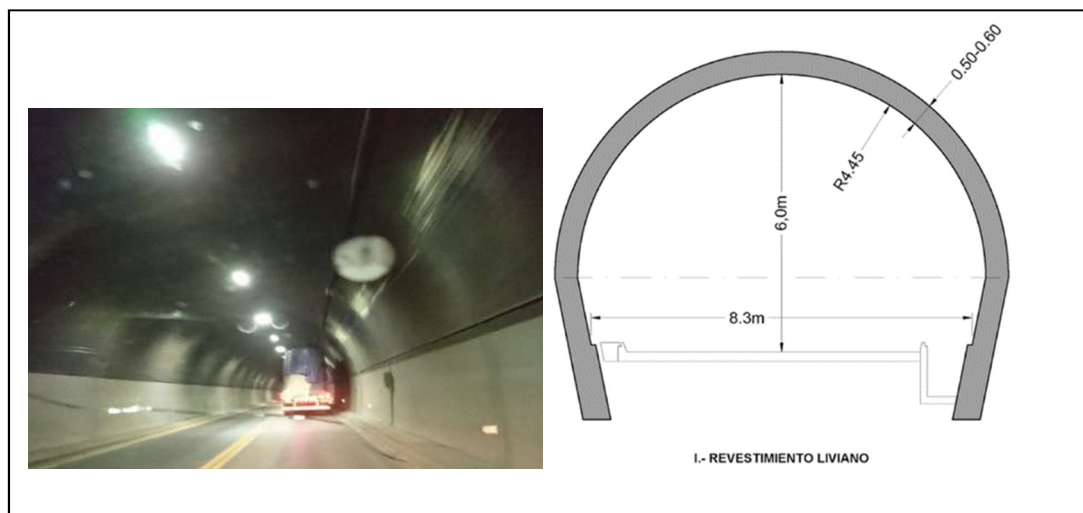
---

<sup>14</sup> Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable). Computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, para automatizar procesos electromecánicos y controlar maquinaria o equipos.

Al existir un punto alto en el interior del túnel, el drenaje se produce de forma natural hacia los portales del túnel; lugar en el que se han situado sendos depósitos de almacenamiento de vertidos peligrosos con una capacidad de hasta 80 m<sup>3</sup>. Además de la correspondiente red de drenaje de infiltración para devolver las aguas captadas por el túnel a los cauces naturales.

## 2.7. Seguridad vial del túnel Cristo Redentor

En relación con el gálibo actual del túnel Cristo Redentor, cabe destacar que en la reciente normativa ya citada se ha elevado de 4.10 metros a 4.30 metros la altura permitida para un vehículo de transporte pesado y se han autorizado vehículos biarticulados de hasta 30 metros y hasta 75 toneladas. Esto cambia sustancialmente el escenario del transporte en Argentina (en algunos aspectos se unifica con Brasil) lo cual incide directamente con la operación segura del túnel bajo estudio.



**Figura 19. Vista del túnel Cristo Redentor**

**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

Más allá del debate acerca de la posibilidad que arriben rápidamente estas unidades al lugar, lo cierto es que marca una tendencia que seguramente se consolidará durante la vida útil de las obras previstas.

Esta primera consideración pone en evidencia las limitaciones actuales del Paso en cuanto a su sección, dado que, como se indicó, ya se registran incidentes entre los vehículos y las instalaciones y techo del túnel, esto agravado por las deformaciones continuas del pavimento de cierto sector del túnel. Por otro lado, la señalización vertical y horizontal es deficiente y no existe señalización luminosa para ordenamiento y advertencia durante la operación del túnel.

En cuanto a las prevenciones para caso de emergencia, en la actualidad no cuenta con sistema de comunicación interna, ni señalización luminosa ni salida de emergencia.

El monitoreo del túnel se reduce a cámaras de reciente instalación, aunque son solo eso y no cuenta con posibilidad alguna de comunicación con el usuario.

La inexistencia de sistema de emergencia consistentes en tecnologías modernas de comunicación al usuario y salidas de emergencia, indican algunos de los problemas preocupantes de la operación actual.

En cuanto al ancho operativo del túnel, tomando en cuenta la fuerte presencia de camiones de gran porte y buses de doble piso, es necesario indicar que el ancho de calzada, si bien aceptable, es más bien estrecho y podría ser mejorado, situación ya considerada en la ampliación del túnel Caracoles.

Por otra parte, el Túnel Cristo Redentor no cuenta con banquetas en ninguno de sus lados, situación agravada dado que se trata de una calzada bidireccional, y menos aún espacio de vereda peatonal, la cual resulta ser muy estrecha para movilidad de eventuales peatones en emergencia.

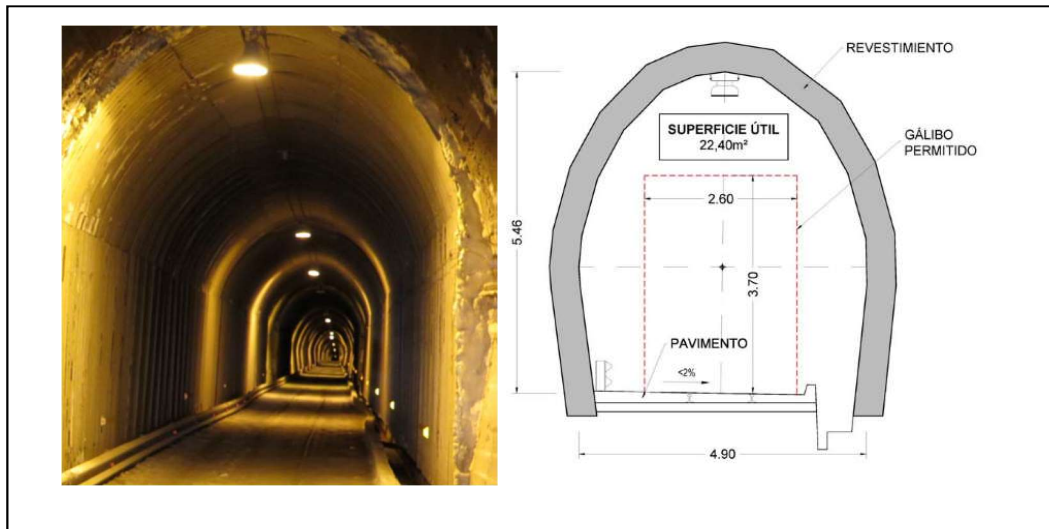
El portal presenta oportunidades de mejora en relación con la posibilidad de su advertencia adecuada y las consecuencias severas que podrían resultar en caso de impacto de un vehículo contra el mismo.

Se espera que el nuevo proyecto puede resolver estos aspectos aquí señalados, según se ha descrito en los apartados anteriores de esta nota técnica.

El Túnel Caracoles por su parte, fue inaugurado el 5 de abril de 1910, unos 70 años antes que el Túnel Cristo Redentor, tiene una longitud de 3.167 m; se extiende de manera casi



paralela al Cristo Redentor y hasta 1984 su sección permitía el paso de un solo tren. El ancho de este túnel es de 4,90 m y su altura de 5,46 m.



**Figura 20. Características del Túnel Caracoles**

**Fuente: BID. Estudios de ingeniería**

Este túnel tampoco cuenta en la actualidad con previsiones para emergencias ni comunicación interna y carece de veredas. El pavimento es adoquinado en el lado argentino y de hormigón para el caso chileno. El Túnel Caracoles también presenta levantamientos de la solera en el tramo excavado en la Formación Huitrín, con una longitud de unos 280 metros, que será también mejorado luego de la obra.

El proyecto contempla significativas mejoras en la iluminación de los túneles del Complejo. Con esta medida se espera que puede reducirse un 35% los siniestros con víctimas en su interior<sup>15</sup>, según estudios en Noruega y Suiza.

En cuanto a la regularidad del gálibo, se ha identificado que el Túnel Cristo Redentor está completamente revestido con hormigón en masa; pero no tiene ningún tramo con contra-bóveda ni con solera de hormigón.

---

<sup>15</sup> Fuente: [2]

Esto ocasiona que, en el tramo excavado en la Formación Huitrín, de unos 300 m de longitud, este túnel presenta apreciables levantamientos de la calzada. Estas deformaciones son controladas sin dificultad debido a que en ese tramo el pavimento está construido con adoquines. Esta situación ha sido contemplada y mejorada en la obra de re-funcionalización de ambos túneles del Paso.

Se presenta a continuación un cuadro comparativo entre la situación actual, y las mejoras incluidas en el proyecto.

**Tabla 8. Comparación del túnel Caracoles antes y después de la renovación**

Características	Antes de renovación	Cambios después de renovación
Extensión		No se contemplan extensiones, aunque sí en la embocadura con falso túnel del lado argentino del Túnel Caracoles
Número de tubos	1	2
Direcciones	bidireccional	unidireccionales
Gálibo	Limitado	Apto para nuevas dimensiones de Argentina y Mercosur
Banquinas	No	Si, ambos lados de la calzada
Veredas para peatones	No	Sí
Características de los portales		Mejorados
Límites de velocidad (km/h)	50	70
Número de carriles	1+1	2+2
Alineamiento vertical	Casi cero	Se alcanza el 0.03% mínimo recomendado.
Salidas de emergencia	No	Sí, peatonales y vehiculares
Distancia entre salidas	-	500 m
Identificación de puntos de emergencia	Pobre	Adecuados a Normativa Europea
Drenaje		Separados filtraciones/derrames
Sistema ventilación		Fortalecido
Iluminación		Fortalecido
Video	Pobre	Fortalecido

Características	Antes de renovación	Cambios después de renovación
Detección automática de incidentes	No	Sí
Comunicación interna	No	Sí

## Conclusiones

La historia de los túneles ha evolucionado con el paso de los años, en especial luego de la ocurrencia de siniestros severos que marcaron el camino hacia los túneles actuales que cuentan con altas medidas de seguridad para mitigar las consecuencias de eventuales incidentes y siniestros en su interior. Esto ha sido posible con la incorporación de nuevas normativas en los países líderes que incluyen alta tecnología de elementos de seguridad y sistemas de gestión de la operación.

La modernización y ampliación del Sistema de túneles de Cristo Redentor – Caracoles permite ampliar la vida útil y capacidad de transporte del principal punto de paso de conexión terrestre entre Argentina y Chile, brindando condiciones de seguridad acordes a los actuales estándares internacionales, superando las actuales debilidades de operación, calidad de servicio, limitaciones de gálibo y riesgos potenciales para la seguridad vial.

A partir de la documentación disponible es posible advertir que en general se han contemplado las medidas de seguridad recomendadas a nivel internacional, tal el caso de la Directiva Europea y el Real Decreto de España sobre Túneles, como así también las impartidas por PIARC.

En cuanto a la sección propuesta para el túnel Caracoles ampliado se considera adecuada, por cuanto contempla un gálibo ajustado a la nueva normativa de pesos y dimensiones de Argentina (ajustada al Mercosur), cuenta con banquetas<sup>16</sup> para detención en caso de emergencia. Además, las pendientes longitudinales se ajustan a las recomendaciones internacionales, lo mismo ocurre para la ventilación propuesta.

El paso de un túnel bidireccional, a dos túneles unidireccionales reduce la posibilidad y gravedad de los siniestros viales [10]. En cuanto a las galerías de comunicación, se consideran ajustadas a los requerimientos internacionales, tanto en capacidad como ubicación e identificación por parte de los usuarios. Los sistemas de comunicación y

---

<sup>16</sup> En algunos países se utiliza el término arcén o espaldón para identificar la denominada banquina en Argentina.

tecnologías ITS enunciados para el proyecto se ajustan a las recomendaciones actuales para el caso.

## Referencias

1. Asociación Mundial de la Carretera (PIARC). Manual de Túneles de Carretera. Disponible en: <https://tunnels.piarc.org/en>
2. Elvick, Rune y Vaa, Truls. (2006) El Manual de Medidas de Seguridad Vial. Amsterdam, Holanda.
3. Asociación Mundial de la Carretera (PIARC). Experiencia con incidentes significativos en túneles de carretera. Disponible en: <https://www.piarc.org/es/biblioteca-virtual/25831-es-Experiencia%20con%20incidentes%20significativos%20en%20t%C3%BAneles%20de%20carretera.htm>
4. Asociación Mundial de la Carretera (PIARC), Comité técnico de Túneles (C.4): Experiencia con incidentes significativos en túneles de carretera, Capítulo 5, Capítulo 3. Disponibles en: <https://www.piarc.org>
5. Romana Ruiz, Manuel. (2006) Presentación Seguridad Vial en Túneles. Seminario del Comité de Explotación de Túneles C.3.3 de PIARC. San Juan, Argentina. Disponible en: [https://www.piarc.org/ressources/documents/actes-seminaires06/c33-argentine06/8777,Manuel\\_Romana\\_Ruiz.pdf](https://www.piarc.org/ressources/documents/actes-seminaires06/c33-argentine06/8777,Manuel_Romana_Ruiz.pdf)
6. Orden circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles. Tomo II. España. Disponible en: [https://www.fomento.gob.es/recursos\\_mfom/oc362015\\_tomoi.pdf](https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/oc362015_tomoi.pdf)
7. España. Real Decreto 635/2006 (26 de mayo) sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado. Disponible en <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2006-9296>
8. Frost, Adam. (2019, August 29). *ITS deployment completed on Latin America's longest road tunnel*. Disponible en: <https://www.traffictechnologytoday.com/news/its/its-deployment-completed-on-latin-americas-longest-road-tunnel.html>
9. Banco Interamericano de Desarrollo. (2018) Propuesta de Préstamo Segunda Etapa de Ampliación de Capacidad y Mejoras de Seguridad Vial en los Accesos al Paso Cristo Redentor (AR-L1295). Washington DC, Estados Unidos.

10. Directiva Europea sobre seguridad en túneles de la Red Europea de Transportes (2004/54/EC). Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32004L0054>