

2019

# INDICADORES DE DESEMPEÑO EN TÚNELES VIALES PARA MODELO DE NIVELES DE SERVICIO DE CARRETERAS

SEPÚLVEDA SANDOVAL, RUBÉN ALONSO

---

<https://hdl.handle.net/11673/46901>

*Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA*



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

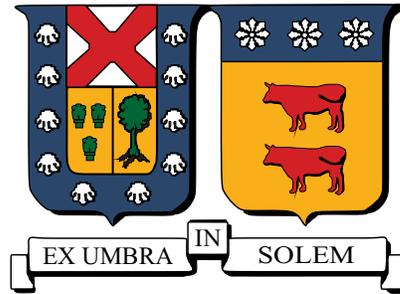
INDICADORES DE DESEMPEÑO EN TÚNELES VIALES  
PARA MODELO DE NIVELES DE SERVICIO DE  
CARRETERAS

RUBÉN ALONSO SEPÚLVEDA SANDOVAL

Ingeniero Civil

Junio de 2019





UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**INDICADORES DE DESEMPEÑO EN TÚNELES VIALES  
PARA MODELO DE NIVELES DE SERVICIO DE  
CARRETERAS**

Memoria de Título presentada por  
**RUBÉN ALONSO SEPÚLVEDA SANDOVAL**

Como requisito parcial para optar al título de  
**Ingeniero Civil**

Profesor Guía  
Dr. Rodrigo Andrés Delgadillo Sturla

Junio de 2019



TÍTULO DE LA TESIS

**INDICADORES DE DESEMPEÑO EN TÚNELES VIALES PARA MO-  
DELO DE NIVELES DE SERVICIO DE CARRETERAS.**

AUTOR

**RUBÉN ALONSO SEPÚLVEDA SANDOVAL**

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Ingeniero Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. Rodrigo Delgadillo Sturla

---

---

---

Valparaíso, Chile, Junio de 2019.



*02/01/2019*



---

# AGRADECIMIENTOS

---

A mis padres Silvia y Alejandro por su incondicional amor y apoyo en toda mi vida y especialmente en estos años de universidad, este sueño y logro es realmente de ustedes.

A mis hermanas, Marianna y Gabriela, porque durante estos años han sabido estar en los momentos importantes. A mi sobrina, Isadora por todos los momentos de alegría que me ha brindado sin saberlo.

A mi polola Daniela Salinas por las palabras de ánimo que construían cada día la motivación suficiente para terminar la carrera.

A mis amigos y compañeros de universidad, Cristian J., Sergio C., Norman G. y Daniel M. con los cuales compartí alegrías, penas y traspasos. En especial quiero agradecer a Gabriel Pinilla que desde el principio fue una ayuda incondicional y un gran amigo en el cual pude apoyarme siempre.

A la Orquesta Estudiantil de la UTFSM, gracias a la cual viví momentos inolvidables y me brindó la oportunidad de desarrollarme como músico y persona.

A mi profesor guía Rodrigo Delgadillo por darme la oportunidad de ser partícipe de este proyecto.

Se agradece por el apoyo para la realización de este trabajo al proyecto FONDEF IT16I10008 titulado “Modelo para Evaluar los Niveles de Servicio de Carreteras en Chile, Implementable en Bases de Licitación para Nuevas Concesiones” en conjunto con la Dirección General de Concesiones.

Rubén.



---

# RESUMEN

---

El trabajo de memoria de título se enmarca dentro del Proyecto FONDEF IT16I10008 titulado “Modelo para Evaluar los Niveles de Servicio de Carreteras en Chile, Implementable en Bases de Licitación para Nuevas Concesiones”, cuyo objetivo principal es impulsar el uso de tecnologías desarrolladas previamente en nuestro país e incentivar un mejoramiento continuo en la gestión de la red vial. A su vez, el modelo cuenta con tres enfoques distintos entre los cuales se distribuyen la totalidad de los activos viales, estos son: modelo de satisfacción para usuario, preservación del patrimonio y efectos en la comunidad aledaña.

En particular, dentro de los activos viales se encuentran los túneles, objeto de estudio de esta memoria de título, los cuales son obras de infraestructura subterráneas construidas con el propósito de que el tránsito de vehículos pueda superar con mayor facilidad zonas de relieve abrupto. A su vez, los túneles están conformados por sub-activos que pueden formar parte de la infraestructura o bien ser elementos y/o sistemas que contribuyen a la operación y explotación de este.

En este trabajo se incluye el activo túnel al modelo de niveles de servicio por medio de seis sistemas fundamentales, agrupados en dos de los tres enfoques mencionados anteriormente (modelo de satisfacción para el usuario y modelo de preservación de patrimonio). Dentro del primer enfoque se encuentran los sistemas de Ventilación, Iluminación y Protección contra incendios, mientras que en el segundo se encuentran los sistemas de Saneamiento y Drenaje, Electromecánico y Estructural.

Cada sistema es representado por un conjunto de indicadores técnicos que sea capaces de reflejar el nivel de gestión empleado en el sistema, de esta manera es posible obtener una evaluación objetiva del nivel de desempeño de cada sub-activo. La selección de los indicadores representativos de los sistemas se lleva a cabo mediante una exhaustiva revisión bibliográfica que busca contrastar la tecnología o procedimientos utilizados en el extranjero con el estado de la práctica de nuestro país. Cada indicador propuesto es definido mediante una metodología de evaluación, instrumentos de medición (en caso de utilizarse) y umbrales acorde a la normativa y tecnología existente. Posteriormente se busca la opinión de expertos de cada área, generando un proceso de retroalimentación y validación de las propuestas de evaluación presentadas en este trabajo.

Como resultado de esta investigación se elaboran seis informes técnicos que justifican los indicadores propuesto para la medición de cada sistema del activo túnel. Además, se expone de manera clara el procedimiento de medición del indicador, el instrumento utilizado y la tabla de evaluación de desempeño asociado al nivel de cumplimiento del parámetro. Para simplificar el uso de esta metodología, adicionalmente a los informes técnicos, se elaboran fichas técnicas que detallan en forma resumida el procedimiento de medición, nivel de desempeño y calificación total del activo (estos informes se adjuntan en el Anexo A).



---

# ABSTRACT

---

The title Thesis is part of the FONDEF (Fund for the Promotion of Scientific and Technological Development) Project IT16I10008 titled "Model to Evaluate Roads Service Levels in Chile, Implementable in Tender Bases for New Concessions", whose main objective is to promote the use of technologies previously developed in our country and encourage a continuous improvement in the management of the road network. In turn, the model has three different approaches among which are distributed all of the road assets, these are: satisfaction model for user, heritage preservation and effects on the surrounding community.

In particular, within the road assets are the tunnels, object of study of this title report, which are underground infrastructure works built with the purpose that vehicle traffic can more easily overcome areas of abrupt relief. In turn, the tunnels are made up of sub-assets that can be part of the infrastructure or be elements and/or systems that contribute to the operation and exploitation of this.

This work includes the active tunnel to the service level model by means of six fundamental systems, grouped in two of the three approaches mentioned above (model of satisfaction for the user and model of preservation of heritage). Within the first approach are Ventilation, Lighting and Fire Protection systems, while in the second are the Sanitation and Drainage, Electromechanical and Structural systems.

Each system is represented by a set of technical indicators that are able to reflect the level of management used in the system, in this way it is possible to get an objective evaluation of the level of performance of each sub-asset. The selection of representative indicators of the systems is carried out through an exhaustive literature review that seeks to contrast the technology or procedures used abroad with the state of practice of Chile. Each proposed indicator is defined by an evaluation methodology, measurement instruments (if used) and thresholds according to the existing regulations and technology. Subsequently, the opinion of experts from each area is sought, generating a feedback and validation process of the evaluation proposals presented in this work.

As a result of this investigation, six technical reports are produced that justify the proposed indicators for the measurement of each tunnel asset system. Besides, the procedure for measuring the indicator, the instrument used and the performance evaluation table associated with the level of compliance with the parameter are clearly stated. In order to simplify the use of this methodology, in addition to the technical reports, technical sheets are prepared that detail in summary the measurement procedure, performance standar and total asset rating (these reports are attached in Annex A).

**Keywords:** *Road tunnels, Road Service Levels.*



---

# GLOSARIO

---

<b>Nivel de servicio</b>	Concepto que permite relacionar los atributos cualitativos que los usuarios perciben y esperan de una carretera (por ejemplo: seguridad, movilidad, comodidad) con las métricas objetivas que las agencias viales utilizan para controlar la pertinencia y calidad con que la infraestructura y sus elementos contribuye a la provisión de esos atributos.
<b>Activos viales</b>	Son aquellos elementos que permiten el desplazamiento de los usuarios en forma confortable y segura desde un punto a otro, minimizando sus costos y sus externalidades.
<b>Gestión de activos</b>	Proceso que tiene por objetivo preservar los activos viales de una red, maximizando los beneficios de los usuarios y de los inversionistas (privados o público), minimizando al mismo tiempo los costos de mantenimiento de las agencias viales, bajo un objetivo de calidad común a todos los actores.
<b>Indicador de desempeño</b>	Variable numérica para cuantificar el estado, características o desempeño de un activo particular o grupo de ellos considerando su objetivo estratégico.
<b>Umbral</b>	Valor límite en la escala de evaluación de cada indicador.
<b>Nivel de desempeño</b>	Rendimiento o calificación que es capaz de alcanzar el activo en su evaluación.
<b>K</b>	Coefficiente de extinción lumínica [ $m^{-1}$ ], mide el nivel de opacidad en el aire.

<b>Luminancia (L)</b>	Característica reflectiva de una superficie para reflejar la luz, cuando ésta se expone a una fuente de luz [cd/m <sup>2</sup> ]. Esta característica depende del color y textura de la superficie y del ángulo de observación de ésta.
<b>Iluminancia (E)</b>	Flujo luminoso por unidad de superficie [lux]. Corresponde a la cantidad de flujo luminoso depositada sobre la superficie en estudio. Este parámetro indica cuál es el nivel de luz a que está sometida la superficie o tarea visual en análisis, independiente del color o textura superficial.
<b>Luminancia media</b>	Corresponde al promedio de los valores de luminancia medidos que estén contenidos en el protocolo.
<b>Uniformidad General</b>	Relación entre la luminancia mínima y media, medida en la superficie de la carretera.
<b>Uniformidad Longitudinal</b>	Relación de luminancia máxima y luminancia mínima, medida sobre la línea central de cada pista, como se indica en CIE 140.
$ICDS_{tramo}$	Índice de condición del tramo evaluado.
$I_a$	Índice de importancia relativa de cada activo.
<b>AADT</b>	Tráfico diario promedio anual (Average annual daily traffic).
<b>REI-M-120</b>	R(Capacidad de carga), E(Integridad), I(Aislamiento), M (Resistencia mecánica), 120 (límite de tiempo en los minutos durante una prueba de incendio estandarizada).
<b>EI-C-120</b>	E(Integridad), I(Aislamiento), C (Cierre automático), 120 (límite de tiempo en los minutos durante una prueba de incendio estandarizada).

---

# CONTENIDO

---

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>V</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>VII</b>
<b>CONTENIDO</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XXII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>XXIV</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>1. ANTECEDENTES GENERALES</b>	<b>5</b>
1.1. Sistema de concesiones . . . . .	5
1.2. Túneles en Chile . . . . .	7
1.3. Metodología de análisis . . . . .	7
<b>2. SISTEMA DE VENTILACIÓN</b>	<b>11</b>
2.1. Introducción . . . . .	11
2.2. Estado de la práctica . . . . .	12
2.3. Parámetros técnicos para evaluar la calidad del aire en túneles . . . . .	12

2.3.1.	Monóxido de carbono (CO) . . . . .	12
2.3.2.	Óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) . . . . .	13
2.3.3.	Hidrocarburos (HC) . . . . .	14
2.3.4.	Emisiones de material particulado (MP) y visibilidad . . . . .	14
2.3.5.	Dióxido de azufre ( $SO_2$ ) . . . . .	16
2.4.	Elección del parámetro técnico más apropiado . . . . .	16
2.4.1.	Austroad . . . . .	16
2.4.2.	Federal Highway Administration (FHWA) . . . . .	17
2.4.3.	Norwegian Public Road Administration (NPRA) . . . . .	17
2.4.4.	PIARC: World Road Association . . . . .	17
2.5.	Equipos para medir la calidad del aire en túneles . . . . .	17
2.5.1.	Elección del equipo de medición más apropiado . . . . .	18
2.6.	Propuesta de evaluación del control de gases y opacidad . . . . .	19
2.6.1.	Método de medición . . . . .	19
2.6.1.1.	Monóxido de carbono . . . . .	19
2.6.1.2.	Dióxido de nitrógeno . . . . .	19
2.6.1.3.	Opacidad (coeficiente de extinción lumínica K) . . . . .	19
2.6.2.	Umbrales . . . . .	19
2.6.2.1.	Monóxido de carbono . . . . .	19
2.6.2.2.	Dióxido de nitrógeno . . . . .	21
2.6.2.3.	Opacidad (coeficiente de extinción lumínica K) . . . . .	22
2.6.3.	Evaluación global de indicadores del sistema control de gases y opacidad . . . . .	23
2.7.	Conclusiones . . . . .	24
<b>3.</b>	<b>SISTEMA DE ILUMINACIÓN</b>	<b>25</b>
3.1.	Introducción . . . . .	25
3.2.	Estado de la práctica . . . . .	25

3.3.	Zonas de iluminación en túneles . . . . .	26
3.3.1.	Zona de Acceso . . . . .	28
3.3.1.1.	Concepto $L_{20}$ . . . . .	29
3.3.1.2.	Concepto de luminancia de velo . . . . .	30
3.3.1.3.	Influencia de la velocidad del tráfico . . . . .	34
3.3.2.	Zona umbral . . . . .	35
3.3.2.1.	Longitud de la zona umbral . . . . .	35
3.3.2.2.	Iluminación simétrica, contra-flujo y pro-flujo . . . . .	36
3.3.3.	Zona de transición . . . . .	37
3.3.4.	Zona interior . . . . .	38
3.3.5.	Zona de salida . . . . .	39
3.3.6.	Iluminación nocturna . . . . .	39
3.4.	Parámetros de calidad del sistema de iluminación . . . . .	39
3.4.1.	Nivel de iluminación . . . . .	40
3.4.1.1.	Luminancia media de la superficie de la calzada . . . . .	40
3.4.2.	Uniformidad . . . . .	40
3.4.2.1.	Uniformidad global . . . . .	40
3.4.2.2.	Uniformidad longitudinal . . . . .	41
3.4.3.	Limitación del deslumbramiento . . . . .	41
3.4.3.1.	Incremento de umbral . . . . .	41
3.5.	Equipos para medir las características del sistema de iluminación . . . . .	42
3.5.1.	Equipos para medir iluminancia . . . . .	42
3.5.1.1.	Luxómetro . . . . .	42
3.5.1.2.	Sistemas dinámicos . . . . .	42
3.5.2.	Equipos para medir luminancia . . . . .	45
3.5.2.1.	Luminancímetro . . . . .	45
3.5.2.2.	Dispositivo de medición de luminancia de imagen, ILMD . . . . .	45

3.5.2.3.	Cyclope . . . . .	49
3.5.3.	Sistemas mixtos . . . . .	50
3.5.3.1.	RLMMS . . . . .	50
3.6.	Normas y recomendaciones . . . . .	52
3.6.1.	Recomendación Manual de Carreteras Volumen 6: Seguridad Vial . . . . .	52
3.6.1.1.	Luminancia en la zona umbral . . . . .	52
3.6.1.2.	Luminancia en la zona de transición . . . . .	54
3.6.1.3.	Alumbrado en la zona interior . . . . .	55
3.6.1.4.	Alumbrado en la zona de salida . . . . .	56
3.6.1.5.	Alumbrado nocturno . . . . .	56
3.6.1.6.	Deslumbramiento . . . . .	57
3.6.2.	Recomendaciones Internacionales . . . . .	58
3.6.2.1.	CIE 2004 . . . . .	58
3.6.2.2.	Estándar Norteamericano . . . . .	60
3.7.	Propuesta de evaluación del sistema de iluminación . . . . .	62
3.7.1.	Parámetros a evaluar . . . . .	62
3.7.2.	Zona a evaluar parámetros luminotécnicos . . . . .	62
3.7.3.	Escalas de valores de los parámetros . . . . .	62
3.7.3.1.	Luminancia media y uniformidad global . . . . .	62
3.7.3.2.	Uniformidad longitudinal . . . . .	64
3.7.4.	Procedimiento de medición . . . . .	64
3.7.4.1.	General . . . . .	64
3.7.4.2.	Condiciones de medición . . . . .	64
3.7.4.3.	Selección de la grilla de medición . . . . .	65
3.7.4.4.	Equipo de medición . . . . .	65
3.7.4.5.	Informe de medición . . . . .	66
3.7.4.6.	Validación del equipo de medición . . . . .	66

3.7.5.	Propuesta de evaluación global de indicadores del sistema de iluminación . . . .	66
3.8.	Conclusiones . . . . .	67
<b>4.</b>	<b>SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS</b>	<b>69</b>
4.1.	Introducción . . . . .	69
4.2.	Estado de la práctica . . . . .	70
4.3.	Características de un incendio en túneles . . . . .	71
4.3.1.	Potencia . . . . .	71
4.3.2.	Emisión de humo . . . . .	72
4.3.3.	Temperatura . . . . .	72
4.3.4.	Evolución temporal del incendio . . . . .	73
4.4.	Fases de desarrollo de un incendio . . . . .	74
4.4.1.	Tiempo de reacción de los usuarios . . . . .	77
4.4.2.	Detección del incendio . . . . .	77
4.4.3.	Evaluación y confirmación del evento . . . . .	78
4.5.	Características de explotación . . . . .	78
4.5.1.	Plan de emergencia . . . . .	79
4.5.2.	Ensayos . . . . .	80
4.5.2.1.	Ensayos de puesta en servicio . . . . .	81
4.5.2.2.	Ensayos periódicos en fase de explotación . . . . .	81
4.5.2.3.	Ensayos de sistemas basados en modelación . . . . .	82
4.6.	Revisión de normativa de incendios en túneles . . . . .	82
4.6.1.	Chile . . . . .	82
4.6.1.1.	Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño .	82
4.6.1.2.	Manual de Carreteras Volumen 6: Seguridad vial . . . . .	85
4.6.1.3.	Manual de Carreteras Volumen 7: Mantenimiento vial . . . . .	87
4.6.1.4.	Base de licitación Américo Vespucio Oriente II . . . . .	88

4.6.2.	Noruega . . . . .	90
4.6.2.1.	Protección contra incendios . . . . .	90
4.6.2.2.	Planes de emergencia . . . . .	91
4.7.	Propuesta de evaluación del sistema de protección contra incendios . . . . .	92
4.7.1.	Equipamiento necesario . . . . .	92
4.7.2.	Plan de gestión ante incendios . . . . .	93
4.7.3.	Plan de simulacros . . . . .	94
4.7.4.	Plan de capacitación . . . . .	94
4.7.5.	Plan de difusión al usuario . . . . .	95
4.8.	Conclusiones . . . . .	95
<b>5.</b>	<b>SISTEMA DE DRENAJE Y SANEAMIENTO</b>	<b>97</b>
5.1.	Introducción . . . . .	97
5.2.	Estado de la práctica . . . . .	98
5.3.	Drenaje de un túnel . . . . .	98
5.3.1.	Entradas de agua . . . . .	98
5.3.1.1.	Agua subterránea . . . . .	98
5.3.1.2.	Lavado de pared . . . . .	99
5.3.1.3.	Agua hidrante . . . . .	99
5.3.1.4.	Precipitación y escorrentía . . . . .	99
5.4.	Sistemas de drenaje . . . . .	99
5.4.1.	Drenaje interior . . . . .	100
5.4.1.1.	Drenes en túnel . . . . .	100
5.4.1.2.	Cámaras de inspección . . . . .	101
5.4.1.3.	Sumideros . . . . .	102
5.4.2.	Drenaje Exterior . . . . .	103
5.4.2.1.	Cunetas . . . . .	103

5.4.2.2.	Contracunetas . . . . .	104
5.4.2.3.	Lavadero en portales . . . . .	105
5.4.2.4.	Alcantarillas . . . . .	106
5.4.2.5.	Drenes profundos en taludes . . . . .	107
5.5.	Revisión de literatura . . . . .	108
5.5.1.	Manual de Carreteras Volumen 3 . . . . .	108
5.5.2.	Manual de Carreteras Volumen 6 . . . . .	108
5.5.3.	Manual de Carreteras Volumen 7 . . . . .	109
5.5.4.	Base de licitación concesión Américo Vespucio Oriente . . . . .	109
5.6.	Propuesta de evaluación del sistema de drenaje . . . . .	111
5.6.1.	Activos de drenaje y saneamiento vial . . . . .	111
5.6.2.	Deterioros de activos de drenaje y saneamiento . . . . .	111
5.6.3.	Metodología de inspección visual propuesta . . . . .	113
5.6.4.	Calificación del estado de activos inspeccionados . . . . .	114
5.6.4.1.	Procedimiento de calificación del estado de activos . . . . .	115
5.6.5.	Propuesta de evaluación global . . . . .	116
5.7.	Conclusiones . . . . .	117
<b>6.</b>	<b>SISTEMA ELECTROMECAÁNICO</b>	<b>119</b>
6.1.	Introducción . . . . .	119
6.2.	Estado de la práctica . . . . .	119
6.3.	Revisión de literatura . . . . .	120
6.3.1.	Manual de Carreteras Volumen 3 . . . . .	120
6.3.2.	Manual de Carreteras Volumen 6 . . . . .	121
6.3.2.1.	Instalaciones electromecánicas . . . . .	121
6.3.3.	Manual de Carreteras Volumen 7 . . . . .	122
6.4.	Propuesta de evaluación del sistema electromecánico . . . . .	123

6.4.1. Periodicidad del mantenimiento . . . . .	123
6.4.2. Conclusiones . . . . .	124
<b>7. SISTEMA ESTRUCTURAL</b>	<b>125</b>
7.1. Introducción . . . . .	125
7.2. Estado de la práctica . . . . .	125
7.3. Sostenimiento estructural de un túnel . . . . .	126
7.3.1. General . . . . .	126
7.3.2. Estabilidad estructural . . . . .	126
7.3.3. Auscultación . . . . .	127
7.3.4. Convergencia-confinamiento . . . . .	128
7.4. Metodos y equipos de medición . . . . .	130
7.4.1. Tunnelings . . . . .	130
7.4.2. Técnicas geofísicas . . . . .	132
7.4.2.1. Georradar . . . . .	132
7.4.2.2. Método de ultrasonido . . . . .	137
7.4.2.3. Métodos geoelectricos . . . . .	139
7.4.2.4. Síntesis de las condiciones de aplicación de las técnicas geofísicas . . . . .	142
7.5. Revisión de literatura . . . . .	143
7.5.1. Manual de carreteras volumen 7: Mantenimiento vial . . . . .	143
7.5.2. Bases de licitación tipo España . . . . .	144
7.6. Propuesta de evaluación del sistema estructural de túneles . . . . .	145
7.6.1. Periodicidad de la medición . . . . .	145
7.7. Conclusión . . . . .	145
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>147</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>149</b>

<b>A. FICHAS TÉCNICAS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO</b>	<b>149</b>
A.1. Sistema de Ventilación . . . . .	150
A.2. Sistema de Iluminación . . . . .	153
A.3. Sistema de Saneamiento y Drenaje . . . . .	156
<b>REFERENCIAS</b>	<b>159</b>



---

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.1. <i>Clasificación por longitud de túneles viales en Chile.</i> . . . . .	8
2.1. <i>Composición aproximada de los gases de escape de motores diésel y gasolina.</i> . . . . .	13
3.1. <i>Zonas del túnel que requieren diferente iluminación.</i> . . . . .	27
3.2. <i>Durante el día, la entrada de un túnel sin una iluminación adecuada aparece para un conductor que se aproxima como un agujero negro en el que no se detectan los posibles obstáculos.</i> . . . . .	27
3.3. <i>Visión en el cono de 20°.</i> . . . . .	30
3.4. <i>Entorno de la entrada del túnel como pequeñas fuentes de resplandor, cuya luz se dispersa en el ojo hacia la fovea donde se superpone con la imagen nítida obtenida desde el centro del campo visual. Dibujo no a escala.</i> . . . . .	31
3.5. <i>Geometría para el cálculo de luminancias de velo <math>L_{seq}</math>.</i> . . . . .	31
3.6. <i>Dispersión de la luz (dentro y fuera del cono de visión, que se muestra en rojo y gris respectivamente) desde la capa atmosférica de aire entre el ojo del conductor y la entrada del túnel hacia la fovea del conductor. Dibujo no a escala.</i> . . . . .	32
3.7. <i>Dispersión de la luz del parabrisas de un automóvil hacia la fovea del ojo del conductor. Dibujo no a escala.</i> . . . . .	33
3.8. <i>Sistemas de iluminación de túneles simétricos, asimétricos de contra-flujo y pro-flujo.</i> . . . . .	36
3.9. <i>Se puede producir una imagen secundaria cuando, después de concentrarse durante unos 20 s en la imagen brillante (fijar el punto negro), una se concentra posteriormente en el área más oscura (fijar el punto blanco).</i> . . . . .	37
3.10. <i>Curva de reducción de luminancia CIE que muestra la tasa máxima permitida de disminución en la zona de transición.</i> . . . . .	38
3.11. <i>Luxómetro.</i> . . . . .	42
3.12. <i>Sistema con Tráiler.</i> . . . . .	44
3.13. <i>Sistema con detector dividido.</i> . . . . .	44

3.14. Luminancímetro. . . . .	46
3.15. Medidor de Luminancia de Imagen CX-2B. . . . .	47
3.16. Medición de luminancia en todos los puntos de la grilla, cálculo de incremento de umbral. . . . .	48
3.17. Determinación del deslumbramiento mediante Incremento de Umbral, medición de la luminancia $L_{20^\circ}$ en la zona próxima a la entrada de un túnel. . . . .	48
3.18. Imágenes procesadas cyclope, con escalas de valores para cada píxel. . . . .	49
3.19. Reporte típico CYCLOPE (en francés). . . . .	50
3.20. Esquema Road Lighting Mobile Measurement System (RLMMS). . . . .	51
3.21. Reporte RLMMS. . . . .	51
3.22. Según CIE (2004), la luminancia en la zona umbral puede disminuir linealmente desde la mitad de la distancia de parada hasta el 40 %. Este punto del 40 % es, posteriormente, el inicio del punto del 100 % de la curva de transición. . . . .	59
3.23. Área de medición y posiciones del observador para distintas configuraciones de la instalación (en inglés). . . . .	63
4.1. Curva de referencia de la potencia de un incendio. . . . .	75
4.2. Fases típicas de un incidente de incendio y acontecimientos. . . . .	76
4.3. Matriz de seguridad del túnel. . . . .	79
5.1. Impermeabilización de bajada al dren colector principal. . . . .	100
5.2. Planta de drenaje tipo (tangente). . . . .	101
5.3. Cámara de inspección hecha en obra (tapa rectangular). . . . .	101
5.4. Ubicación e instalación de los sumideros. . . . .	103
5.5. Tajo de acceso con obras de drenaje exterior. . . . .	104
5.6. Sección tipo de cuneta. . . . .	105
5.7. Sección tipo de contracuneta. . . . .	105
5.8. Sección tipo de un lavadero triangular. . . . .	106
5.9. Excavación y relleno en alcantarillas. . . . .	107
5.10. Dren profundo en taludes. . . . .	107
5.11. Proceso general de inspección de activos. . . . .	114

6.1. Clasificación de túneles según flujo vehicular y longitud. . . . .	121
7.1. Sección transversal de un túnel. Variación de la presión interna $p_i$ y convergencia. . .	128
7.2. Curva característica del macizo rocoso (techo y hastiales) y curva característica del sostenimiento. . . . .	129
7.3. Ejemplo de curva característica del sostenimiento. . . . .	130
7.4. Representación conjunta de una curva GRC y dos SCCs. . . . .	130
7.5. Diagrama de la instalación de las cámaras para inspección de muros y vías férreas. . .	131
7.6. Secciones transversales del revestimiento obtenidos de la información de datos 3D disponible. La imagen del centro corresponde al perfil, la del lado derecho es 2D y la del lado izquierdo es 3D. . . . .	131
7.7. Gráfico de estadísticas. . . . .	132
7.8. Imagen de un impulso de radar y sus reflexiones en terreno. . . . .	133
7.9. Representación por escala de colores . . . . .	134
7.10. Ilustración del proceso de toma de datos y la sección de reflexiones resultante. . . . .	135
7.11. Control de sostenimiento mediante georradar. . . . .	136
7.12. Determinación de la velocidad de pulsación por el método superficial o indirecto. . . .	137
7.13. Determinación de la capa de hormigón dañada por el método indirecto. . . . .	138
7.14. Determinación la profundidad de las grietas. . . . .	139
7.15. Medidas y resultados obtenidos en la medida de espesores de hormigón. . . . .	140
7.16. Dispositivo de medida para S.E.V. . . . .	140
7.17. Dispositivo de medida para calicata eléctrica. . . . .	141
7.18. Dispositivo de medida para tomografía eléctrica. . . . .	141
7.19. Sección de resistividad eléctrica calculada mediante tomografía eléctrica. . . . .	142
A.1. Ficha técnica 1 : Concentración de Monóxido de Carbono . . . . .	150
A.2. Ficha técnica 1 : Concentración de Dióxido de Nitrógeno . . . . .	151
A.3. Ficha técnica 1 : Opacidad . . . . .	152
A.4. Ficha técnica 1 : Luminancia Media ( $L_{av}$ ) . . . . .	153
A.5. Ficha técnica 1 : Uniformidad Global ( $U_o$ ) . . . . .	154

A.6. <i>Ficha técnica 1 : Uniformidad Longitudinal (<math>U_l</math>)</i> . . . . .	155
A.7. <i>Ficha técnica 1 : Índice de Condición de SD (ICSD)</i> . . . . .	156

---

# ÍNDICE DE TABLAS

---

2.1. Niveles máximos permitidos de monóxido de carbono (Manual de Carreteras Volumen 6 Tabla 6.207.303.A) . . . . .	20
2.2. Clasificación categórica concentración de CO(ppm) . . . . .	20
2.3. Límites de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno para usuarios de la carretera dentro de un túnel (basado en valores HSE (Health and Safety Executive) EH40 Occupational Exposure Limits).(The Highways Agency, 1999). . . . .	21
2.4. Clasificación categórica concentración de NO <sub>2</sub> (ppm) . . . . .	22
2.5. Coeficiente de opacidad K para distintos casos de tráfico en un túnel, (Adaptado del Manual de diseño para túneles del Reino Unido (The Highways Agency, 1999)) . . . . .	22
2.6. Clasificación categórica nivel de opacidad K ( $10^{-3}m^{-1}$ ). . . . .	22
2.7. Evaluación diaria según nivel de cumplimiento de cada indicador en el intervalo de 15 minutos. . . . .	23
2.8. Evaluación mensual según nivel de cumplimiento de cada día. . . . .	23
3.1. Ejemplos de valores de luminancia (kcd / m <sup>2</sup> ) en la zona de acceso que corresponden aproximadamente a 100.000 lx de iluminación horizontal (Basado parcialmente en CIE 2004). . . . .	28
3.2. Valores de luminancia de cielo, carretera y alrededores (kcd/m <sup>2</sup> ), (Manual de Carreteras Volumen 6, 2018) . . . . .	29
3.3. Luminancia promedio L <sub>20</sub> en el cono de visión de 20 del campo de visión, cd/m <sup>2</sup> . . . . .	53
3.4. Valores para el factor k . . . . .	53
3.5. Luminancia promedio zona interior cd/m <sup>2</sup> (L <sub>int</sub> ) . . . . .	55
3.6. Parámetros técnicos a evaluar. . . . .	62
3.7. Escala de evaluación conjunta para L <sub>av</sub> y U <sub>o</sub> . . . . .	64
3.8. Escala de evaluación para U <sub>l</sub> . . . . .	64

4.1. Máxima potencia de incendio de diferentes vehículos (PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera, 2017) . . . . .	71
4.2. Valores de caudal de humo producido en un incendio para distintos tipos de vehículos (PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera, 2017) . . . . .	72
4.3. Valores de la temperatura máxima alcanzada en un incendio para distintos tipos de vehículos. (PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera, 2017)	73
4.4. Resumen de mediciones de ensayos, (PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera, 2017). . . . .	73
5.1. Grupos de activos de drenaje y saneamiento vial. (Arriagada and Echaveguren, 2015).	112
5.2. Códigos de activos de drenaje y saneamiento vial. (Arriagada and Echaveguren, 2015).	113
5.3. Tipos de deterioros de activos de drenaje y saneamiento. (Arriagada and Echaveguren, 2015). . . . .	114
5.4. Nivel de desempeño del índice de condición de saneamiento y drenaje . . . . .	117
5.5. Escala de evaluación global sistema de drenaje y saneamiento. . . . .	117
7.1. Posibilidades de utilización de las diferentes técnicas para medir espesores de hormigón proyectado (H.P). . . . .	143
7.2. Adecuación de las diferentes técnicas para la auscultación de túneles. . . . .	143

---

# INTRODUCCIÓN

---

Tanto a nivel nacional como mundial, la gestión de la infraestructura vial está transitando desde un modelo de gestión de las obras, hacia un modelo de gestión basado en el desempeño y el servicio que prestan los activos que conforman la infraestructura vial. El concepto detrás de esta mirada se conoce comúnmente como nivel de servicio de la infraestructura.

En Chile, el enfoque de gestión basado en el servicio se encuentra desarrollado de manera incipiente. Esta necesidad motivó a la Universidad Técnica Federico Santa María, Universidad de Concepción y a la Coordinación General de Concesiones a formular el proyecto FONDEF IT16I10008 titulado “Modelo para evaluar los niveles de servicio de carreteras en Chile, implementable en bases de licitación para nuevas concesiones”, cuyo objetivo principal es desarrollar un modelo para evaluar los niveles de servicio para carreteras concesionadas en Chile, que sea implementable en bases de licitación para nuevas concesiones, que impulse el uso de tecnologías desarrolladas previamente en nuestro país y que además incentive un mejoramiento continuo en la gestión de la red vial.

El modelo propuesto para evaluar los niveles de servicio de carreteras posee tres enfoques, estos son: modelo de satisfacción para el usuario, modelo de conservación del patrimonio y modelo de comunidad aledaña y medio ambiente, esto quiere decir que la totalidad de los activos viales serán agrupados en estas tres categorías. El modelo de satisfacción del usuario busca reunir todos los activos que tienen relación directa con la experiencia de conducción y busca brindar un buen servicio a los usuarios que transitan por la vía. El modelo de conservación del patrimonio está enfocado en mantener el valor patrimonial de la infraestructura, lo cual, muchas veces no es percibido por el usuario, por ejemplo, la condición estructural de las cepas de un puente es muy relevante para estimar su vida remanente, lo cual no se ve reflejado directamente en la experiencia de viaje de los que transitan por la vía. Por ello es necesario un modelo que evalúe complementariamente el valor patrimonial de la infraestructura. Por último el modelo de comunidad busca mejorar o mantener la calidad de vida de las personas previo a la construcción del proyecto y proteger al medio ambiente de la contaminación producida durante la operación de este.

Dentro de los activos viales se encuentran los túneles que corresponden a vías subterráneas que permiten la comunicación entre dos lugares, en esta memoria se estudiará su incorporación al modelo mediante los principales sistemas que lo conforman, entregándose una ficha técnica de evaluación que contenga como mínimo parámetros, instrumentos de medición, métodos evaluativos y umbrales para cada sub-activo, también se hará entrega de un informe técnico detallado que reúna los antecedentes

necesarios para justificar el método evaluativo.

La incorporación de los túneles viales al modelo de niveles de servicio permitirá mejorar la calidad de la prestación entregada a los usuarios por medio de un mayor control de las variables que afectan la experiencia de conducción. Por otro lado, se asegurará el valor patrimonial de la infraestructura al final del periodo de concesión, impidiendo la degradación de esta en la etapa de explotación.

---

# OBJETIVOS

---

## Objetivos Generales

- Definir los sistemas que formen parte de la infraestructura del túnel y/o que aporten a la funcionalidad en la explotación de este.
- Escoger los sistemas fundamentales de un túnel, es decir, aquellos presentes en la gran mayoría de los túneles chilenos.
- Asignar cada sistema como sub-activo y desarrollarlos para el modelo de niveles de servicio.
- Seleccionar los parámetros con que se evaluarán los activos y generar una propuesta que contenga como mínimo el método de medición, instrumentación (en caso de utilizarse), umbrales y nivel de desempeño adoptado de acuerdo con la medición.
- Generar un informe técnico que contenga la información necesaria para justificar los parámetros escogidos, y el método de medición. A partir de lo anterior redactar una ficha técnica que resuma el método de medición de cada parámetro.



## ANTECEDENTES GENERALES

### 1.1. Sistema de concesiones

Hace más de 20 años que Chile optó por un modelo de desarrollo basado en la asociación público-privada, siendo la construcción el túnel El Melón la primera obra concesionada que tuvo lugar en abril de 1993. Desde ese momento que las concesiones han jugado un rol fundamental y exitoso en el desarrollo de la infraestructura del país sumando un total de 82 contratos (en distintas fases) a lo largo del territorio, donde destaca la construcción de mas de 3.000 kilómetros de autopistas y la gestión de 11 terminales aeroportuarios, entre ellos el de Arturo Merino Benítez (Coordinación de Concesiones de Obras Públicas, 2016). En suma, el esquema de concesiones ha demostrado su extraordinaria capacidad de generar un inmenso conjunto de beneficios para los distintos sectores productivos, económicos y sociales del país. Según el libro de concesiones de obras públicas en Chile, “Un nuevo consenso en las concesiones de obras públicas supone considerar, al menos, cuatro desafíos. Por un lado, mejorar la calidad de servicio e instancias de participación ciudadana en las obras, estableciendo estándares claros para las obras y su explotación. Asimismo, crear una nueva institucionalidad, acorde al nivel de desarrollo actual de concesiones y los desafíos por delante, para lo cual se envía al Congreso el proyecto de ley que crea la Dirección General de Concesiones. Tercero, definir aspectos operacionales tales como la política y gestión tarifaria, y los mecanismos para mejorar obras durante el periodo de concesión. Por último, aumentar el financiamiento disponible para nuevas obras públicas objetivo que se espera concretar con la aprobación del fondo de infraestructura, ya enviado al Congreso Nacional” (Coordinación de Concesiones de Obras Públicas, 2016).

En otro sentido, la asociación público-privada puede conceptualizarse como un acuerdo, de largo plazo, entre entidades del sector público y del sector privado, para la generación y operación de obras y/o provisión de servicios que son responsabilidad del Estado, o requeridos por éste para cumplir sus funciones. Implica que el actor privado comparte los riesgos y asume un compromiso financiero,

bajo un esquema que conjuga los objetivos de satisfacción de intereses públicos con la obtención de beneficios para los proveedores de los bienes y servicios (Abedrapo, 2013).

Estos acuerdos o contratos de largo plazo pueden expresarse de distintas formas (Abedrapo, 2013), siendo las principales:

- a. Concesiones autofinanciadas o con pago de usuarios, como en el caso de proyectos portuarios, aeroportuarios y carreteras.
- b. Proyectos de provisión de infraestructura con servicios, como en recintos penitenciarios, hospitalarios, educacionales y edificaciones públicas en general, donde el pago por uso lo realiza el Estado.
- c. Proyectos de prestación de servicios con compartición de riesgos, como puede ser el mantenimiento de carreteras por estándares de servicio y/o peajes sombra (shadow toll), o que exigen desarrollo de infraestructura para su prestación.

Si bien hay distintas figuras para llevar adelante un contrato de concesión en general éstas tienen ciertos rasgos comunes. El primer elemento característico de estos contratos es que se adjudican mediante esquemas concursables licitaciones públicas abiertas e internacionales y su ejecución, como fue señalado, se materializa bajo un esquema de largo plazo. Para efectos de poner en marcha el proyecto, las sociedades que integran el consorcio ganador forman una entidad contratista, de objeto único.

Por otra parte, debido a que los beneficios que obtienen las empresas privadas en esta actividad provienen de la utilización que los usuarios o entidades públicas hacen de la infraestructura, el Estado debe velar por un adecuado control y regulación de la gestión de ésta, mediante los cuerpos normativos y el propio contrato (bases de licitación).

En este contexto el Proyecto FONDEF busca generar una propuesta de evaluación global de gestión de activos de la concesión que mejore las bases de licitación actuales que se rigen por niveles de servicio, entre las cuales destacan las bases de licitación de Concesión Camino Nogales Puchuncaví, Concesión para el Mejoramiento y conservación de la Ruta 43 (Región de Coquimbo), túnel El Melón, y Concesión Vial Mejoramiento Ruta G-21. En consecuencia, este trabajo está alineado con el primer desafío de las nuevas concesiones, es decir, establecer estándares claros para las obras y su posterior explotación.

## 1.2. Túneles en Chile

Los túneles viales son conductos subterráneos construidos con el propósito de que el tránsito de vehículos pueda superar con mayor facilidad zonas de relieve especialmente abrupto. Por otro lado, desde el punto de vista de la seguridad un túnel puede definirse como un tramo de la ruta contenido entre estructuras sólidas, donde el usuario tiene limitadas posibilidades de escape en caso de accidentes en su interior, y el aire que respira depende de un conjunto de factores propios, como su ubicación geográfica, geometría, equipamiento, suministro de energía, así como también del volumen y composición del tránsito, calidad de los vehículos, características de conducción y de la operación de las instalaciones. (Dirección de Vialidad, 2018c).

En el país existe una cantidad limitada de túneles viales, los que se han ido materializando a lo largo de un periodo bastante extenso, de manera que tanto las técnicas de construcción aplicadas, como el equipamiento complementario con que han sido dotados, son muy diferentes, lo que impide fijar normas o procedimientos de aplicación general.

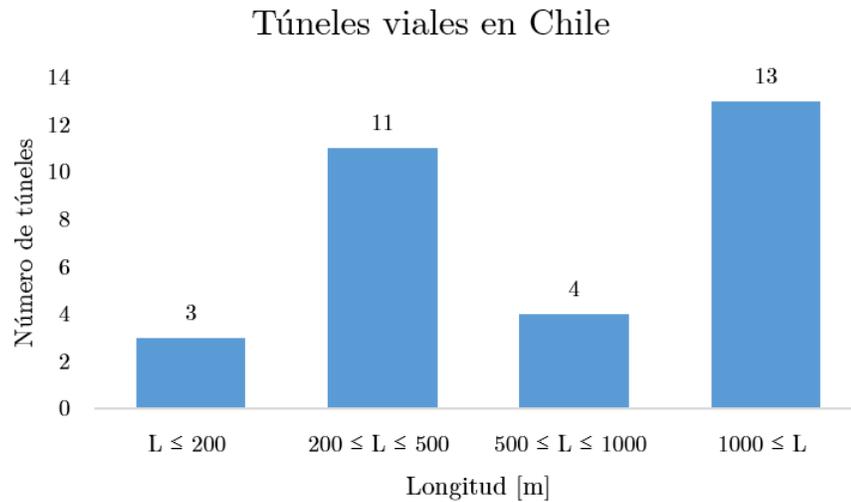
Teniendo en cuenta datos de la Dirección de vialidad (Dirección de Vialidad, 2019) y del Comité de túneles y espacios subterráneos de Chile (Comite de túneles y espacios subterraneos de Chile, 2019), se puede afirmar que actualmente en Chile existen cerca de 31 túneles viales en operación con una longitud total cercana a los 34 km, donde el túnel de mayor longitud alcanza los 4,5 km y el de menor longitud 142 m. Es importante recalcar que de los 31 túneles existentes 24 son de tipo interurbanos, y 15 de estos últimos se encuentran en concesión, es decir, cerca de la mitad de los túneles existentes en el país entran en la categoría de análisis del proyecto.

La figura 1.1 presenta un resumen de los túneles operativos en Chile ordenados por longitud, los intervalos fueron escogidos de acuerdo a la clasificación descrita en el Real Decreto 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado Español. Es importante recalcar que la longitud es uno de los factores más importantes sin embargo para realizar una clasificación más detallada es necesario conocer datos del flujo vehicular como el transito medio diario anual (TMDA) asociado a cada túnel.

Se puede apreciar que existe una variabilidad en las longitudes de los túneles chilenos, también es importante recalcar que existe un número no menor de túneles con longitud mayor a 1000 [m] en los cuales los requisitos de control, seguridad, mantención y operación cobran mayor importancia.

## 1.3. Metodología de análisis

Considerando la variabilidad expresada en párrafos anteriores se hace necesario definir los activos que forman parte de un túnel, el Manual de Carreteras Volumen 7: Mantenimiento vial, detalla los elementos básicos que deben estar presentes en el plan maestro de mantenimiento de un túnel vial, estos son:



**Figura 1.1:** Clasificación por longitud de túneles viales en Chile.

*Fuente: Elaboración propia*

#### ■ Obras civiles

- Pavimentos
- Pasillo peatonal
- Drenaje
- Impermeabilizaciones
- Elementos de sostenimiento
- Revestimientos funcionales
- Demarcaciones y señalizaciones

#### ■ Equipos e instalaciones

- Abastecimiento de energía
- Iluminación
- Ventilación
- Alarmas y extinción de incendios
- Circuito cerrado de televisión
- Comunicaciones
- Centro de control

El modelo propuesto para evaluar los niveles de servicio de carreteras tiene tres enfoques, estos son: satisfacción para el usuario, conservación del patrimonio y comunidad aledaña, esto quiere decir que la totalidad de los activos viales serán agrupados en estas categorías. A continuación se presentan los sistemas fundamentales del túnel que serán considerados en el modelo y su respectiva agrupación en términos de los modelos de satisfacción para usuario y conservación del patrimonio.

■ **Modelo de satisfacción para usuario**

- Sistema de ventilación
- Sistema de iluminación
- Sistema de seguridad contra incendios

■ **Modelo de conservación del patrimonio**

- Sistema de saneamiento y drenaje
- Sistema electromecánico
- Sistema estructural

Si comparamos la propuesta anterior con los elementos básicos que se exponen en el Manual de Carreteras, observamos que a nivel de equipos e instalaciones se mantienen los cuatro primeros puntos, es decir, abastecimiento de energía (sistema electromecánico), iluminación y ventilación. Los puntos restantes, CCTV, comunicaciones y centro de control están incluidos dentro de otros activos de la carretera, es decir no son exclusivos de un túnel. Por otra parte, dentro de las obras civiles (modelo de patrimonio), se mantiene del sistema de drenaje, y dentro del sistema estructural se incluyen los elementos de sostenimiento, revestimientos y todos aquellos elementos que aportan a la funcionalidad estructural del túnel. Por último las demarcaciones, señalizaciones y el pavimento se tratan en otras secciones del proyecto como activos de la carretera que no son únicos del túnel.

En los capítulos posteriores se exponen cada uno de los sistemas mencionados anteriormente, primero aquellos referidos al modelo de usuario, continuando con los sistemas incluidos en el modelo de patrimonio. Además, cada capítulo estará conformado de manera general por una revisión del estado de la práctica, revisión bibliográfica, parámetros o indicadores propuestos, métodos de medición y escala de evaluación.

Por último, cabe mencionar que la conservación de los túneles tiene por finalidad mantener en operación todos los sistemas involucrados, a fin de proporcionar condiciones de tránsito expeditas y seguras, tanto en circunstancias normales como bajo situaciones de emergencia.



# SISTEMA DE VENTILACIÓN

## 2.1. Introducción

El sistema de ventilación adquiere gran relevancia en la operación de un túnel ya que es el encargado de proporcionar la calidad de aire adecuada durante el funcionamiento de este. A grandes rasgos, el sistema de ventilación se basa en dos escenarios críticos de diseño, uno es el escenario de funcionamiento normal y el otro un evento de incendio. Si bien el evento de incendio es a menudo el factor dominante para los túneles de viales, en túneles con gran carga de tráfico y congestión frecuente, el requisito de aire fresco para la operación puede ser de gran relevancia.

En condiciones de operación normal los gases emitidos por los automóviles, con motor a gasolina o diesel, se acumulan dentro del túnel, y en altas concentraciones pueden llegar a ser dañinos para los usuarios. Por este motivo es fundamental asegurar un buen control de ventilación el cual proporcione las condiciones de operación óptimas para el usuario que transita por la vía.

En el presente capítulo, se define una metodología para la medición y control de gases tóxicos, lo que involucra una revisión de los principales contaminantes controlados internacionalmente, la elección de los gases más importantes según manuales y normativas de distintos países, y una propuesta para los valores límites o umbrales a adoptar en túneles viales de Chile.

## 2.2. Estado de la práctica

De acuerdo con las bases de licitación más actualizadas (relicitación túnel El Melón), el sistema de ventilación se mide por niveles de servicio utilizando cuatro exigencias de calidad del aire, estas son:

- Concentración de dióxido de carbono para velocidades promedio de operación superiores a 50 km/h.
- Concentración de dióxido de carbono para velocidades promedio de operación inferiores a 50 km/h.
- Concentración de dióxido de nitrógeno máximo.
- Nivel de opacidad máximo.

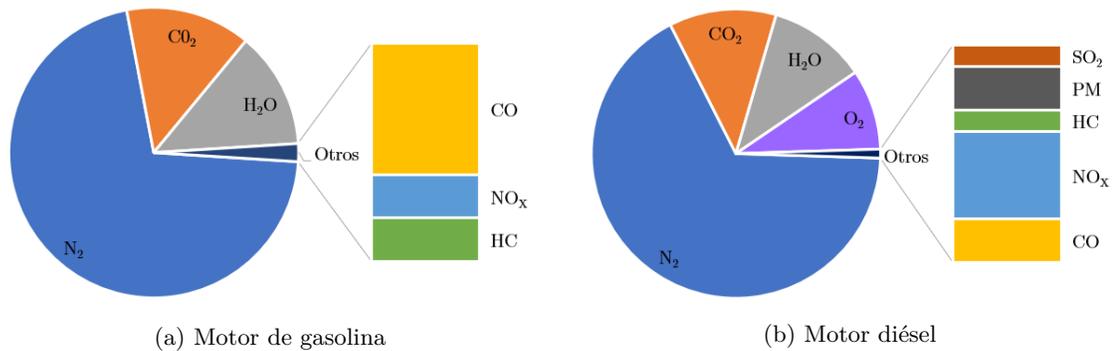
Las mediciones son de tipo continuas y se agrupan en intervalos de 5 minutos. Por último, el valor del indicador de funcionalidad del sistema de ventilación corresponde a la suma de los intervalos en cumplimiento por sobre los intervalos totales en un mes.

## 2.3. Parámetros técnicos para evaluar la calidad del aire en túneles

Al evaluar la calidad de aire en túneles en operación normal es necesario considerar la principal fuente de contaminantes, estos son los gases emitidos por un motor de combustión interna (gases de escape). Antes de describir las diferentes sustancias que integran los gases de escape, se muestra la composición aproximada de los gases que despiden los motores diésel y de gasolina (figura 2.1).

### 2.3.1. Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas incoloro no irritante sin olor o sabor, resultado de la oxidación incompleta del carbono durante el proceso de combustión. Es producido tanto por actividades humanas como por fuentes naturales. La fuente humana más importante del contaminante es el tubo de escape de automóviles. El monóxido de carbono se combina con la hemoglobina de la sangre (con una afinidad 250 veces mayor que con el oxígeno) formando la carboxihemoglobina, la cual impide transportar oxígeno a las células provocando la hipoxia (baja concentración de oxígeno) de los tejidos. De acuerdo con el tiempo de exposición puede provocar desde dolores de cabeza, náuseas y desmayos, hasta la muerte. La absorción del monóxido de carbono y los síntomas resultantes dependen directamente de la concentración en el aire respirado, el tiempo de exposición y el grado de actividad de la persona.



**Figura 2.1:** Composición aproximada de los gases de escape de motores diésel y gasolina.

*Fuente: Elaboración propia*

El monóxido de carbono provoca dos tipos de intoxicación:

- Aguda, provocada por altas concentraciones, es mortal y no produce síntomas de advertencia significativa.
- Crónica, produce un sueño acumulativo manifestándose en fuertes dolores de cabeza, náuseas, vómitos, zumbido en los oídos, impotencia muscular y somnolencia, pudiéndose confundir con un estado gripal o mala ingesta de alimentos.

El monóxido de carbono CO se considera tradicionalmente como la emisión de referencia para la evaluación de la toxicidad de los gases de escape. (PIARC Technical Committee C.4 Road Tunnel Operation, 2012)

### 2.3.2. Óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ )

El óxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) son contaminantes resultantes de la combustión de combustibles fósiles. Las emisiones de los motores de vehículos y las centrales eléctricas son las principales fuentes externas en las zonas urbanas.

La mayoría de los óxidos de nitrógeno emitidos ( $NO_x$ ) consisten en NO, que se oxida en  $NO_2$  en presencia de oxígeno (especialmente ozono,  $O_3$ ). El NO por sí solo no se considera un contaminante nocivo en los niveles comúnmente encontrados. Por otro lado, el  $NO_2$  es nocivo y puede irritar los pulmones y disminuir la resistencia a infecciones respiratorias como la gripe. Los estudios sobre la nocividad del  $NO_2$  muestran sensibilidades totalmente diferentes entre personas sanas y personas con predisposición asmática. (PIARC Technical Committee 5 Road Tunnels, 2000)

Es por este motivo que bajas concentraciones de  $NO_2$  son consideradas como contaminantes relevantes en la calidad del aire del túnel.

### 2.3.3. Hidrocarburos (*HC*)

Los hidrocarburos, dependiendo de su estructura molecular, presentan diferentes efectos nocivos. El benceno, por ejemplo, es venenoso por sí mismo, y la exposición a este gas provoca irritaciones de piel, ojos y conductos respiratorios; si el nivel es muy alto, provocará depresiones, mareos, dolores de cabeza y náuseas. El benceno es uno de los múltiples causantes de cáncer. Su presencia se debe a los componentes incombustibles de la mezcla o a las reacciones intermedias del proceso de combustión, las cuales son también responsables de la producción de aldehídos y fenoles. La presencia simultánea de hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, rayos ultravioletas y la estratificación atmosférica conduce a la formación del smog fotoquímico, de consecuencias muy graves para la salud de los seres vivos. (AS S.L.U, 2014)

### 2.3.4. Emisiones de material particulado (MP) y visibilidad

El material particulado (MP), también llamado contaminación por partículas es el término utilizado para referirse una mezcla de partículas sólidas y suspensión líquidas que se encuentran en el aire. Algunas partículas, como polvo, suciedad, hollín o humo, son lo suficientemente grandes u oscuras como para verse a simple vista. Otros son tan pequeños que solo pueden detectarse usando un microscopio electrónico.

La contaminación por partículas incluye:

- MP10: partículas inhalables, con diámetros de 10 micrómetros y menores;
- MP2.5: finas partículas inhalables, con diámetros de 2.5 micrómetros y más pequeños.

Estas partículas vienen en muchos tamaños y formas y pueden estar formadas por cientos de sustancias químicas diferentes. Algunas se emiten directamente desde una fuente, como sitios de construcción, caminos sin pavimentar, campos, chimeneas o incendios. La mayoría de las partículas se forman en la atmósfera como resultado de reacciones complejas de productos químicos como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, que son contaminantes emitidos por las plantas de energía, las industrias y los automóviles. El material particulado contiene sólidos microscópicos o gotas de líquido que son tan pequeñas que pueden inhalarse y causar problemas. Las partículas MP10 presentan los mayores problemas, ya que pueden penetrar profundamente en los pulmones y algunas incluso pueden ingresar al torrente sanguíneo. Las partículas finas MP2.5 son la principal causa de visibilidad reducida (neblina) dentro del túnel. Se requiere la consideración de los criterios de visibilidad en el diseño del sistema de ventilación del túnel debido a la necesidad de niveles de visibilidad que excedan la distancia mínima de parada del vehículo a la velocidad de diseño. Hay dos fuentes principales de MP en un túnel, emisiones de escape y emisiones de no escape. Las emisiones de escape consisten en MP que emanan del tubo de escape como resultado de la combustión del combustible. El MP de no escape consiste en desgaste de neumáticos y frenos, abrasión en la superficie de la carretera y polvo suspendido. (PIARC Technical Committee C.4 Road Tunnel Operation, 2012)

La visibilidad se reduce por la dispersión y absorción de la luz por partículas suspendidas en el aire. La cantidad de dispersión o absorción de la luz depende en gran medida del material, el diámetro de la partícula y la densidad del conjunto de ellas. El principio para medir la visibilidad en un túnel se basa en el hecho de que un haz de luz decae en intensidad a medida que pasa a través del aire. El nivel de descomposición se puede usar para determinar la opacidad del aire. Los medidores de opacidad para túneles generalmente usan estos efectos para medir la visibilidad dentro del túnel. Este proceso está descrito por la ecuación 2.3.1:

$$E = E_0 \cdot e^{-KL} \quad (2.3.1)$$

Donde  $E_0$  es la intensidad de la fuente de luz (o emisor),  $E$  la intensidad del receptor de luz y  $L$  es la distancia entre el emisor y el receptor expresada en metros.  $K$  es el coeficiente de extinción y se expresa en  $\text{m}^{-1}$ . En la ventilación del túnel, se ha acostumbrado a expresar la visibilidad por el coeficiente de extinción  $K$ . La extinción se define como la pérdida de intensidad  $E - E_0$  después de recorrer la distancia  $L$  a través del aire del túnel con respecto a la intensidad de la fuente  $E_0$ . De acuerdo con la ecuación 2.3.2, el coeficiente de extinción se expresa como:

$$K = -\frac{1}{L} \cdot \ln\left(\frac{E}{E_0}\right) \quad (2.3.2)$$

Alternativamente, la visibilidad también puede ser representada por la transmisión  $S$ . La transmisión es el porcentaje de la intensidad del haz  $E$  que se pierde en relación con la intensidad de la fuente  $E_0$  después de recorrer la distancia  $L$ . Se define sobre la base de la ecuación 2.3.3:

$$S(100\%) = 100 \cdot e^{-KL} \quad (2.3.3)$$

Los coeficientes de extinción utilizados para el diseño del sistema de ventilación se dan a continuación:

- $K = 0.003 \text{ m}^{-1}$  significa aire limpio del túnel (visibilidad en el orden de cientos de metros)
- $K = 0.007 \text{ m}^{-1}$  se aproxima a la turbiedad del aire del túnel
- $K = 0.009 \text{ m}^{-1}$  se aproxima a una atmósfera de niebla
- $K = 0.012 \text{ m}^{-1}$ , corresponde al valor umbral que no debe excederse durante la operación y que resulta en una atmósfera de túnel muy incómoda. Sin embargo, normalmente hay suficiente visibilidad para que un vehículo se detenga con seguridad en un obstáculo.

Las emisiones del tubo de escape del vehículo consisten en partículas muy pequeñas, principalmente en el rango de 0.01 a 0.20  $\mu\text{m}$ . Las partículas en este rango son muy efectivas en la extinción de la luz.

Además de las emisiones del tubo de escape, los vehículos también emiten partículas debido a procesos de abrasión (carreteras, neumáticos, desgaste de frenos, etc.) y la suspensión del polvo de la carretera. La razón de la visibilidad reducida es la extinción de la luz por la dispersión y absorción de la radiación en el rango de longitud de onda visible. En general, los sulfatos, nitratos, compuestos orgánicos, hollín y suelo son los principales componentes que dispersan y absorben la luz en la atmósfera. Con excepción de las partículas de abrasión y suspensión basadas en minerales, la mayoría de estos componentes son abundantes en el rango de tamaño de hasta  $0.7 \mu\text{m}$ . Ésta es aproximadamente la longitud de onda de la luz visible. Debido a la similitud entre la longitud de onda y el diámetro de partícula, existe un efecto significativo sobre el deterioro de la visibilidad. En los túneles de carretera, los dos tipos de emisión de origen, “escape” y “no escape”, son relevantes. (PIARC Technical Committee C.4 Road Tunnel Operation, 2012)

### 2.3.5. Dióxido de azufre ( $SO_2$ )

El  $SO_2$  es el componente mayoritario del grupo de óxidos de azufre gaseosos ( $SO_x$ ). Otros  $SO_x$  gaseosos (como  $SO_3$ ) se encuentran en la atmósfera a concentraciones mucho más bajas que el  $SO_2$ .

Por lo general, se puede esperar que las medidas de control que reducen el  $SO_2$  reduzcan la exposición de las personas a todos los  $SO_x$  gaseosos, disminuyendo la formación de  $SO_x$  particulado tal como partículas de sulfato fino.

Las emisiones de  $SO_2$  que conducen a altas concentraciones de  $SO_2$  en el aire generalmente también conducen a la formación de otros óxidos de azufre ( $SO_x$ ). Los  $SO_x$  pueden reaccionar con otros compuestos en la atmósfera para formar material particulado (sulfatos), los cuales pueden penetrar profundamente en los pulmones y causar problemas de salud adicionales, especialmente a niños, ancianos y personas con asma.

Este contaminante al igual que el  $NO_2$  reduce la visibilidad en túneles de carretera.

## 2.4. Elección del parámetro técnico más apropiado

Se realiza una revisión de distintas fuentes bibliográficas, con el fin de identificar los indicadores técnicos más apropiados.

### 2.4.1. Austroad

Según la guía para túneles de carretera de Australia (Austroads), la calidad del aire dentro del túnel debe ser adecuada para su uso propuesto. Se pueden aplicar diferentes límites de exposición para los usuarios y para los trabajadores de mantenimiento en diferentes jurisdicciones. Los contaminantes que deben considerarse son el dióxido de nitrógeno, el monóxido de carbono y el material particulado. Además, se considera el dióxido de azufre e hidrocarburos que son más relevantes cuando pueden

ocurrir exposiciones de larga duración dentro del túnel. Si se asegura la dilución de los contaminantes principales ( $CO$ ,  $MP$ ,  $NO_2$ ) los que están en menor proporción también se puede asegurar (Austroad, 2010).

#### 2.4.2. Federal Highway Administration (FHWA)

La Administración Federal de Carreteras (FHWA) reconoce la existencia de 5 contaminantes principales sin embargo al momento de diseñar se tienen en cuenta solo 3, los cuales corresponden al monóxido de carbono, material particulado y óxidos nitrosos. (FWHA Road Tunnles). Este mismo manual hacer referencia a los estándares de la EPA (Environment Protection Agency) la cual establece que, al decidir el tipo y el diseño del sistema de ventilación a instalar, deben tenerse en cuenta los niveles de dióxido de nitrógeno ( $NO_x$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ) y material particulado (Federal Highway Administration, 2004).

#### 2.4.3. Norwegian Public Road Administration (NPRA)

Según los criterios para ventilación en la NPRA, los contaminantes claves para evaluar la calidad del aire en túneles son la visibilidad y los gases de escape  $CO$  y  $NO_x$ . Por otro lado, se expresa textualmente que la concentración de otros gases tóxicos no presenta un riesgo para la salud si se logra una dilución suficiente de los gases  $CO$  y  $NO_2$  (Norwegian Public Roads Administration, 2004).

#### 2.4.4. PIARC: World Road Association

En el manual técnico “Road Tunnels: Vehicle emissions and air demand for ventilation” publicado por la Asociación mundial de la carretera (PIARC) se utiliza como contaminantes principales de diseño, los gases  $CO$ ,  $NO_x$  y PM (PIARC Technical Committee C.4 Road Tunnel Operation, 2012).

Por lo tanto, en concordancia con la bibliografía revisada los parámetros para evaluar la calidad del aire dentro del túnel son  $CO$ ,  $NO_x$  y visibilidad por medio del coeficiente de extinción. Cabe destacar que para motores de gasolina y diésel los contaminantes principales son el  $CO$  y  $NO_x$  respectivamente, dada la incerteza de vehículos circulantes de cada tipo es necesario considerar ambos contaminantes.

### 2.5. Equipos para medir la calidad del aire en túneles

En general para medir la concentración de gases tóxicos en el ambiente se utilizan sensores de gases. Un sensor de gas es un elemento que sufre un cambio físico o químico, reversible, en presencia de un gas, para dar una señal (normalmente eléctrica) que es transmitida, mostrada o utilizada para operar alarmas y controles. Existen varios tipos de tecnología entre las cuales destacan:

- Sensores electroquímicos
- Sensores por semiconductor
- Sensores de conductividad térmica
- Sensores catalíticos
- Sensores infrarrojos

Dependiendo del gas a medir, la vida útil y el costo, se pueden escoger distintas alternativas, sin embargo, comúnmente para medir gases tóxicos se utilizan sensores electroquímicos (Conferencia de la Sección Española ISA, 1999).

Por otro lado, para la medición de partículas en el aire uno de los instrumentos más considerados es el opacímetro, que es un equipo diseñado para medir la opacidad de una corriente de aire o muestra parcial de este, mediante el principio de extinción y dispersión de la luz. Los medidores existentes son de dos tipos según los principios que se usen para las medidas:

- Medidores por extinción
- Medidores por dispersión

En un medidor por extinción el haz luminoso se enfoca de forma tal en la probeta que atraviesa el aire a muestrear y es recibido finalmente por un fotodetector. A falta de opacidad del aire la luz recibida corresponde al 100 % de la medición procedente de la fuente luminosa. Por otro lado, en un medidor de dispersión, cuando la luz de la fuente luminosa pasa por la probeta impacta con partículas, se produce la dispersión que, emitidas con un determinado ángulo, se recibe en otro fotodetector, corresponde a la señal de este fotodetector a la dispersión medida.

### **2.5.1. Elección del equipo de medición más apropiado**

Dada la poca variabilidad y la alta confiabilidad de los sistemas expuestos anteriormente se optará por la utilización de sensores de gases para la medición de concentración de gases tóxicos y opacímetro para la cantidad de partículas suspendidas.

## **2.6. Propuesta de evaluación del control de gases y opacidad**

### **2.6.1. Método de medición**

A continuación, se describen los métodos de medición asociados a cada uno de los indicadores escogidos.

#### **2.6.1.1. Monóxido de carbono**

La medición de monóxido de carbono se realizará con detectores de gases tóxicos instalados a lo largo del túnel, cada detector atenderá un sector específico de acuerdo al proyecto de ingeniería de detalle del sistema de ventilación. Cada una de las mediciones de concentración será contrastada con el nivel máximo permitido según el tiempo de exposición asociado a la velocidad media del flujo de vehículos.

#### **2.6.1.2. Dióxido de nitrógeno**

La medición de dióxido de nitrógeno se realizará con detectores de gases tóxicos instalados a lo largo del túnel, cada detector atenderá un sector específico de acuerdo al proyecto de ingeniería de detalle del sistema de ventilación. Cada una de las mediciones de concentración será contrastada con el nivel máximo permitido según el tiempo de exposición asociado a la velocidad media del flujo de vehículos.

#### **2.6.1.3. Opacidad (coeficiente de extinción lumínica K)**

La medición continua del grado de visibilidad (opacidad) al interior del túnel se realizará con los instrumentos de monitoreo (opacímetros) cada detector atenderá un sector específico de acuerdo al proyecto de ingeniería de detalle del sistema de ventilación. La medición es de tipo continua y corresponde a la informada por el opacímetro correspondiente. Se determinará K como la pérdida de la intensidad (E) después de recorrer una longitud (L). El nivel de opacidad K corresponderá al valor medido y será contrastado con los niveles máximos para obtener el intervalo de desempeño.

### **2.6.2. Umbrales**

A continuación, se proponen los límites y la escala de evaluación para cada indicador.

#### **2.6.2.1. Monóxido de carbono**

Los efectos del CO sobre la salud dependen de la concentración de CO, del tiempo de exposición y de la condición de la salud de cada individuo. La concentración de CO es medida en partes por millón (ppm). La mayoría de las personas no sufren ningún síntoma por exposición prolongada a niveles de CO entre aproximadamente 1 y 70 ppm, pero algunas personas con problemas del corazón podrían

experimentar un aumento en dolor de pecho. Según los niveles de CO aumentan y permanecen sobre 70 ppm, los síntomas se hacen más evidentes y pueden incluir dolor de cabeza, fatiga y náusea. Cuando la concentración de CO se mantiene sobre los 150 y 200 ppm la desorientación, la pérdida de conciencia y la muerte son posibles. (Consumer Product Safety Commission, 2019).

Para definir los umbrales que proporcionarán seguridad a los usuarios es necesario conocer la relación entre la concentración y el tiempo de exposición a los contaminantes. El manual de carreteras (Dirección de Vialidad, 2018b) en la sección 6.207.3 establece los niveles de CO máximos recomendados, en función del tiempo de exposición presentados en la tabla 2.1:

**Tabla 2.1:** Niveles máximos permitidos de monóxido de carbono (Manual de Carreteras Volumen 6 Tabla 6.207.303.A)

Niveles máximos (ppm CO)	Tiempo de exposición
100 ppm	15 min
50 ppm	30 min
35 ppm	1 hr
10 ppm	8 hr

El tiempo de exposición depende del largo del túnel y la velocidad del flujo vehicular, considerando estas variables en contraste con la realidad de túneles carreteros de Chile se puede establecer una propuesta que optimice el gasto operacional de ventiladores como la calidad del aire para el usuario. La tabla 2.2 muestra los niveles máximos permitidos de CO para cada tiempo de exposición, y la calificación en función del nivel de cumplimiento.

**Tabla 2.2:** Clasificación categórica concentración de CO(ppm)

Tiempo de exposición [min]	Nivel máximo permitido (ppm de CO)	Bueno	Justo	Malo
0 - 5	100	[0 - 70]	[70 - 100]	>100
5 - 15	70	[0 - 50]	[50 - 70]	>70
15 - 30	50	[0 - 35]	[35 - 50]	>50
30 - 45	35	[0 - 25]	[25 - 35]	>35
45 - 60	25	[0 - 10]	[10 - 25]	>25
>60	10	[0 - 5]	[5 - 10]	>10

El tiempo de exposición corresponde a la longitud del túnel dividido por la velocidad media de operación la cual es una medición continua que se obtiene por medio de cintas medidoras de velocidad (instrumentos de medición de velocidad), por medio de este simple cálculo se puede contrastar el tiempo de exposición y el nivel de CO para saber el intervalo de operación.

Para definir los valores extremos se tomó en cuenta los tiempos de exposición y concentraciones recomendados por el Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2018c) y las normas primarias de

calidad del aire (Ministerio Secretaria General de la Presidencia, 2018b), para los valores intermedios se siguió una metodología basada en el manual para diseño de túneles del Reino Unido (The Highways Agency, 1999), la cual define los tiempos de exposición en función de la longitud del túnel y una velocidad de congestión de 10 km/h tabla 2.3 . En este caso para cada intervalo se tomaron longitudes de 1, 2.5, 5, 7.5 y 10 km respectivamente.

**Tabla 2.3:** Límites de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno para usuarios de la carretera dentro de un túnel (basado en valores HSE (Health and Safety Executive) EH40 Occupational Exposure Limits).(The Highways Agency, 1999).

Substance	Application	Type	Tunnel Sensor Limit Level	EH40 Level
CO Carbon Monoxide	Tunnel Road Users	Short-term limits: Fifteen minutes, or less, average exposure.	A: 100 ppm B: 50 ppm C: 35 ppm	200 ppm
NO <sub>2</sub> Nitrogen Dioxide	Tunnel Road Users	Short-term limits: Fifteen minutes, or less, average exposure.	A: 4 ppm B: 3 ppm C: 1.5 ppm	5 ppm

A= Túneles de hasta 500 m de longitud.

B= Túneles de 500 m hasta 1000 m de longitud.

C= Túneles de 1000 m hasta 2500 m de longitud.

### 2.6.2.2. Dióxido de nitrógeno

Al igual que en el caso del monóxido de carbono (CO) para definir los umbrales que proporcionarán seguridad a los usuarios es necesario conocer la relación entre la concentración y el tiempo de exposición a los contaminantes. Para definir las concentraciones mínimas es decir las concentraciones para una hora o más se tomó en cuenta las normas primarias de calidad del aire para el NO<sub>2</sub> las cuales establecen un valor limite de 213 ppbv (partes por billón) (Ministerio Secretaria General de la Presidencia, 2018a), para el resto de los umbrales se utilizaron los valores recomendados por el manual para diseño de túneles del Reino Unido presentados en la tabla 2.3. La tabla 2.4 muestra los niveles máximos permitidos de NO<sub>2</sub> para cada tiempo de exposición, y la calificación en función del nivel de cumplimiento.

El nivel de NO<sub>2</sub> es calculado mediante sensores de gases y es contrastado con la tabla para saber el intervalo de operación.

**Tabla 2.4:** Clasificación categórica concentración de  $NO_2$ (ppm)

Tiempo de exposición [min]	Nivel máximo permitido (ppm de $NO_2$ )	Bueno	Justo	Malo
0 - 5	4	[0 - 3]	[3 - 4]	>4
5 - 15	3	[0 - 2]	[2 - 3]	>3
15 - 30	2	[0 - 1]	[1 - 2]	>2
30 - 45	1	[0 - 0.5]	[0.5 - 1]	>1
45 - 60	0.5	[0 - 0.2]	[0.2 - 0.5]	>0.5
>60	0.2	[0 - 0.1]	[0.1 - 0.2]	>0.2

### 2.6.2.3. Opacidad (coeficiente de extinción lumínica K)

Para definir los valores umbrales para la opacidad es necesario tener en cuenta que a diferencia de los gases tóxicos mayores tiempos de exposición al material particulado no influye en la salud del usuario, sin embargo, altos niveles de opacidad vinculados a velocidades bajas del flujo vehicular dificultan la visibilidad dentro del túnel, en la tabla 2.5 se muestra la relación entre la velocidad del flujo y el nivel de visibilidad asociado:

**Tabla 2.5:** Coeficiente de opacidad K para distintos casos de tráfico en un túnel, (Adaptado del Manual de diseño para túneles del Reino Unido (The Highways Agency, 1999))

Aplicación	K-Coeficiente de opacidad ( $m^{-1}$ )
Trafico Fluido $V_{max} = 60 - 80$ km/hr	$\leq 0.007$
Trafico Fluido $V_{max} = 80 - 100$ km/hr	$\leq 0.005$
Trafico congestionado	$\leq 0.009$
Túnel debe ser cerrado	$\geq 0.012$
Trabajos de mantenimiento, con tráfico en el túnel	$\leq 0.003$

El valor máximo propuesto para cualquier velocidad del flujo o tiempo de exposición en operación normal del túnel será de  $7 \cdot 10^{-3} m^{-1}$ . La tabla 2.6 muestra el valor máximo permitido de K (coeficiente de extinción lumínica) y la calificación en función del nivel de cumplimiento:

**Tabla 2.6:** Clasificación categórica nivel de opacidad K ( $10^{-3}m^{-1}$ ).

Nivel de Opacidad K máximo [ $10^{-3}m^{-1}$ ]	Bueno	Justo	Malo
7	[0 - 5]	[5 - 7]	>7

El nivel de K es calculado mediante opacímetros y es contrastado con la tabla para saber el intervalo de operación.

### 2.6.3. Evaluación global de indicadores del sistema control de gases y opacidad

Para realizar la evaluación global del sistema de control de gases y opacidad se propone lo siguiente:

- Promediar las mediciones continuas de gases y opacidad de cada estación de monitoreo del túnel en intervalos de 5 min.
- Cada de 15 min escoger el intervalo mayor dentro del túnel y contrastarlo con las tablas de evaluación de cada parámetro usando los datos de flujo promedio del túnel, es decir, tabla 2.2 para el monóxido de carbono, tabla 2.4 para el dióxido de nitrógeno y tabla 2.6 para el nivel de opacidad.
- Realizar evaluación diaria según tabla 2.7.
- Realizar evaluación mensual según tabla 2.8.

**Tabla 2.7:** Evaluación diaria según nivel de cumplimiento de cada indicador en el intervalo de 15 minutos.

		Número total de intervalos de 15 min dentro de cada rango en un día		
		BUENO	JUSTO	MALO
Calificación del indicador	MUY BUENO	96	= 0	= 0
	BUENO	≥ 48	< 48	= 0
	JUSTO	96		= 0
	MALO	-	-	1
	MUY MALO	-	-	> 1

**Tabla 2.8:** Evaluación mensual según nivel de cumplimiento de cada día.

		Número total de días dentro de cada rango en un mes				
		MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
Calificación del indicador	MUY BUENO	≥ 24	< 24	= 0	= 0	= 0
	BUENO	≥ 24		< 24	= 0	= 0
	JUSTO	30			= 0	= 0
	MALO	-			≥ 1	= 0
	MUY MALO	-			≥ 5	= 0
				-	≥ 1	

## 2.7. Conclusiones

- Se propone como concepto general de medición de gases, el tiempo de exposición del usuario a determinado contaminante.
- Se propone un método de medición independiente de la longitud del túnel, que varía en función de las velocidades promedio de operación.
- Se presentan nuevos valores de umbrales basados en revisión de manuales y estándares nacionales e internacionales.
- Se propone un método de evaluación diario y mensual discretizado para tener mayor control y claridad de los incumplimientos.

# SISTEMA DE ILUMINACIÓN

### 3.1. Introducción

El sistema de iluminación en túneles es relevante para el usuario ya que proporciona la visibilidad adecuada para una conducción segura. El túnel cuenta con zonas de iluminación específicas que tienen por objetivo la adaptación adecuada del ojo desde escenarios de mucha a poca iluminación, como es el caso de la entrada y de poca a mucha iluminación en el caso de la salida. En general existen 5 zonas de interés estas son: zona de acceso, umbral, transición, interior y salida. Por otro lado, existen fenómenos propios de iluminación asociados a cada zona y escenarios de iluminación temporales que varían con el transcurso del día, estos son: diurno alto, diurno bajo, crepúsculo y nocturno.

En el presente capítulo se define una metodología para la medición y control de la iluminación en túneles, lo que involucra una caracterización de las zonas de túnel sus principales problemas y necesidades de iluminación, la elección de los parámetros más relevantes para la seguridad del usuario, los valores umbrales de estos parámetros y el o los instrumentos de medición adecuados para un control eficiente, estos puntos se abordarán mediante la revisión de manuales y especificaciones de distintos países donde se busca tener obtener valores de alto estándar para túneles viales de Chile.

### 3.2. Estado de la práctica

En la gran mayoría de las concesiones viales los parámetros de iluminación son medidos al inicio del periodo de explotación asumiendo que las propiedades luminotécnicas de mantienen en el tiempo mientras no exista una falla directa en la luminaria. De acuerdo con las bases de licitación más actualizadas (relicitación túnel El Melón), el sistema de iluminación se mide por niveles de servicio utilizando cuatro exigencias de iluminación, estas son:

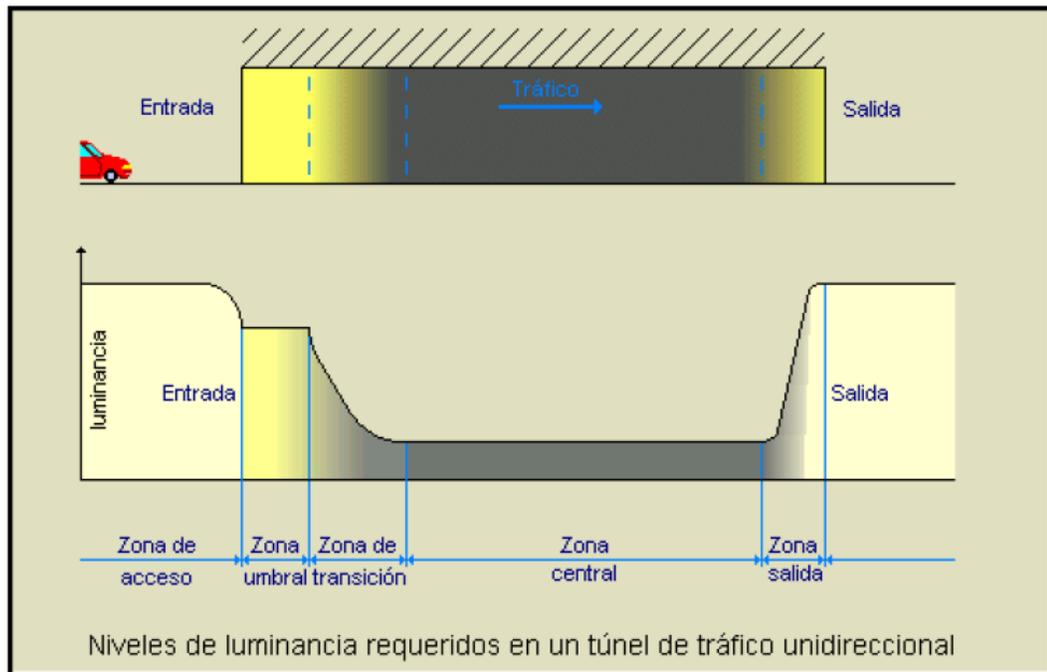
- Uniformidad general para cada zona de los túneles.
- Uniformidad longitudinal para cada zona de los túneles.
- Funcionalidad de los circuitos eléctricos, con tiempo de falla menor a 60 segundos.
- Funcionalidad de las luminarias.

Las mediciones de uniformidades son de tipo aleatoria y se realizan por el método de grilla especificado en el Manual de Carreteras Volumen 6. Por último, el valor del indicador de funcionalidad del sistema de iluminación corresponde a la suma de los días en cumplimiento de la totalidad de las exigencias por sobre los días totales del mes.

### 3.3. Zonas de iluminación en túneles

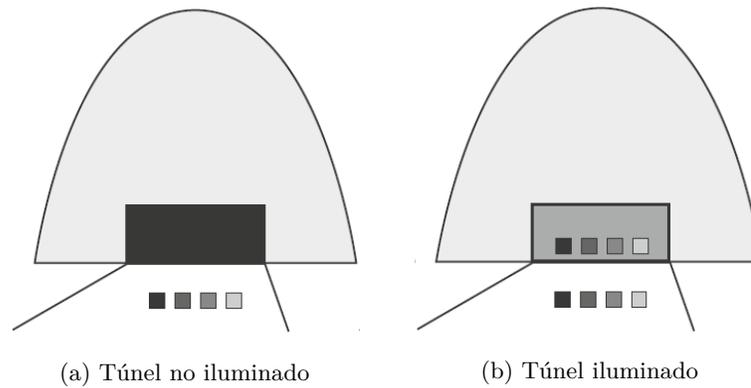
Los requisitos de iluminación de un túnel varían fuertemente con la posición longitudinal del túnel. Por lo tanto, para propósitos de especificación de iluminación, un túnel se divide en diferentes zonas, y cada zona requiere una iluminación diferente (Fig. 3.1). Durante el día, los ojos de un conductor que se acerca a la entrada de un túnel se encuentran adaptados al alto nivel de luminancia diurna. En consecuencia, si el nivel de luminancia dentro del túnel es mucho más bajo que el exterior, no se podrán ver detalles de su interior ni ningún objeto desde el exterior, y la entrada del túnel aparecerá como un “agujero negro”(Fig. 3.2). La zona en la carretera antes de la entrada del túnel donde el conductor que se aproxima debería poder ver dentro del túnel se llama zona de acceso (Fig. 3.1). La primera de las cuatro zonas en el mismo túnel que requiere una iluminación especial durante las horas de luz diurna se denomina zona de umbral. Las paredes y la superficie de la carretera en esta zona de umbral forman el fondo contra el cual el conductor, que aún se encuentra fuera del túnel en la zona de acceso, ve cualquier obstáculo (Van Bommel, 2014).

Después del nivel de iluminación relativamente alto requerido en la zona de umbral, la iluminación en el túnel puede reducirse gradualmente a un nivel mucho más bajo debido a que los ojos del conductor se adaptan gradualmente durante su recorrido por el túnel. La zona en la que tiene lugar esta reducción se denomina zona de transición. En túneles largos, la zona de transición es seguida por una zona en la que el nivel de luminancia se mantiene constante. En esta, la zona interior, la adaptación no es necesariamente completa y, por lo tanto, es necesario disponer de un nivel de luminancia que sea algo más alto en comparación con el nivel necesario en una carretera por la noche. Al aproximarse a la salida del túnel, el nivel de adaptación del conductor aumenta gradualmente porque el tamaño aparente de la salida aumenta gradualmente. Dado que la adaptación de niveles de luminancia bajos a altos se lleva a cabo de manera prácticamente instantánea, y debido a que los obstáculos en la salida se destacan claramente contra la salida brillante, no se necesita iluminación de adaptación adicional en la zona de salida durante el día.



**Figura 3.1:** Zonas del túnel que requieren diferente iluminación.

Fuente: Manual de Carreteras Volumen 6, 2018.



**Figura 3.2:** Durante el día, la entrada de un túnel sin una iluminación adecuada aparece para un conductor que se aproxima como un agujero negro en el que no se detectan los posibles obstáculos.

Fuente: Van Bommel, 2014

A continuación, se revisa con más detalle cada una de las zonas involucradas en la iluminación del túnel y sus principales características.

### 3.3.1. Zona de Acceso

Corresponde a la zona que se encuentra inmediatamente antes de la entrada del túnel y de una longitud igual a la distancia necesaria para que el vehículo pueda frenar sin que este ingrese al túnel (Dirección de Vialidad, 2018b). El nivel de luminancia en la zona de acceso es determinante en la iluminación requerida en la zona umbral. Considerando la gran cantidad de variables que influyen en el nivel de luz del día es de esperarse que esta no sea constante, si no que esté cambiando continuamente con la hora del día, temporada y condiciones climáticas. El sistema de iluminación de túneles debe diseñarse de modo que se logren condiciones de tráfico seguras con los niveles de iluminación más altos que ocurren regularmente. El criterio de diseño es a menudo el nivel de luz diurna probable que solo se supera durante un cierto porcentaje en un año (por ejemplo, 2%, que corresponde a las 4000 horas de luz de día anuales, 80 h por año). En los momentos en que el nivel de luz diurna sea más bajo, la iluminación eléctrica en el túnel debe estar parcialmente apagada o atenuada.

Los valores de luminancia en la zona de acceso dependen de la luz del día en combinación con la dirección de la visión del conductor y la reflectancia de las superficies. La Tabla 3.2 proporciona una estimación de los valores de luminancia para diferentes direcciones de viaje de un conductor que se aproxima a la entrada del túnel, lo que corresponde a una situación de luz diurna de alrededor de 100.000 lx de iluminación horizontal. El bajo valor de luminancia para pintura oscura establece la posibilidad de disminuir las luminancias en el campo de visión del conductor que se aproxima y, por lo tanto, disminuir el nivel de iluminación requerido en el túnel. Esto se puede lograr pintando el portal del túnel y sus estructuras circundantes en un color oscuro. Plantar árboles y arbustos sobre la entrada del túnel es otra posibilidad.

**Tabla 3.1:** Ejemplos de valores de luminancia ( $\text{kcd} / \text{m}^2$ ) en la zona de acceso que corresponden aproximadamente a 100.000 lx de iluminación horizontal (Basado parcialmente en CIE 2004).

Dirección de conducción	Cielo	Carretera	Rocas	Edificios	Pasto	Arbustos	Montaña nevada	Piso nevado	Pintura oscura
Norte	16	5	1	4	2	1	5	15	0.75
Este y Oeste	12	4	2	6	2	1	10	15	0.75
Sur	8	3	3	8	2	1	15	15	0.75

Existen distintos métodos para calcular la luminancia promedio de la zona de acceso, uno de ellos es el método estipulado por la CIE88, en la que se miden las luminancias parciales en todas las superficies que rodean el acceso de túnel y sus porcentajes de campo de visión en el cono de  $20^\circ$ , por otro lado, se encuentra la luminancia de velo que requiere de un cálculo más riguroso. A continuación, se expone una breve explicación de cada método.

### 3.3.1.1. Concepto $L_{20}$

Según el Manual de Carreteras “La luminancia de la zona de acceso  $L_{20}$  es la media contenida en un campo de visión cónico con el vértice en el ojo del conductor, situado a una distancia del túnel igual a distancia de parada, y orientado el cono de  $20^\circ$  a un punto situado a una altura de  $1/4$  de la boca del túnel. La determinación de este valor es trascendental para el diseño de la iluminación del túnel. La luminancia en la zona de umbral, a través de una serie de factores, está en relación con este valor a través de un parámetro  $k$  ( $L_{th} = k L_{20}$ )” (Dirección de Vialidad, 2018b).

Se necesita evaluar cuál es el valor  $L_{20}$  máximo que se da con una frecuencia suficiente a lo largo del año. Este valor es dependiente, tanto de las condiciones estacionales como de las meteorológicas.

Se trata de evaluar, dentro del cono de visión de  $20^\circ$  (Figura 3.3), qué porcentaje de cielo, ruta y alrededores hay, para ponderar las distintas luminancias que se les suponen (Tabla 3.2) y así llegar a una luminancia media del cono de visión.

**Tabla 3.2:** Valores de luminancia de cielo, carretera y alrededores ( $kcd/m^2$ ), (Manual de Carreteras Volumen 6, 2018)

Dirección de Conducción	Cielo $L_c$	Carretera $L_r$	Rocas	Alrededores		
				Edificios	Nieve	Praderas
N	16	5	1	4	5(V)-15(H)	2
E-W	8	4	2	6	10(V)-15(H)	2
S	12	3	3	8	15(V)-15(H)	2

Se visualiza que en el diseño de la iluminación de los túneles con acceso por el sur debe considerarse una mayor iluminación en el acceso en razón de que el conductor está mirando hacia el norte, que presenta mayor luminosidad que hacia el lado sur.

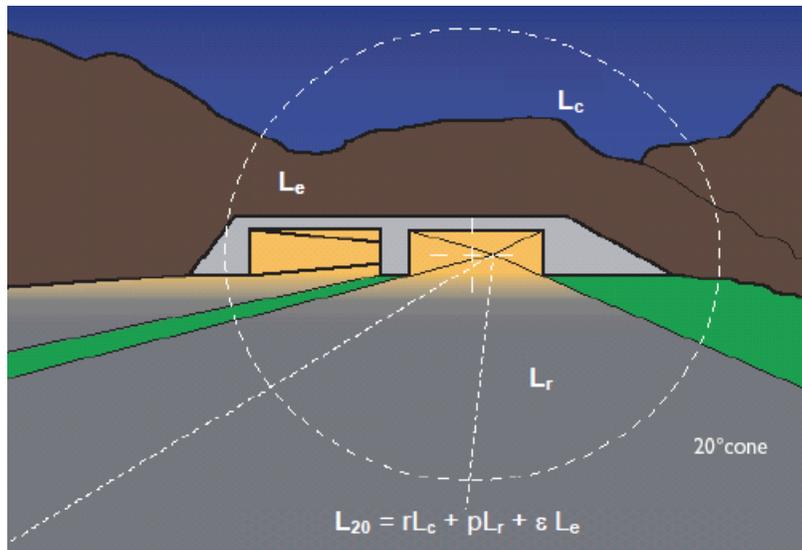
Se puede concluir que el diseñar una boca de un túnel y unos alrededores lo más oscuros posibles, reducen  $L_{20}$  de forma significativa, lo que, es muy aconsejable desde el punto de vista luminotécnico, por las consecuencias en los costos de inversión y explotación.

A modo de ejemplo, utilizando la figura anterior, dentro del cono en forma aproximada se tiene  $140^\circ$  para el camino (39%),  $40^\circ$  de prado (11%), cerros (35%) y cielo (15%). Para el caso de un acceso desde el sur se obtiene la siguiente ponderación:

$$L_{20} = 0,39 \cdot 5 + 0,11 \cdot 2 + 0,35 \cdot 1 + 0,15 \cdot 16$$

$$L_{20} = 4,92kcd/m^2$$

El concepto  $L_{20}$  todavía se usa a veces como una alternativa simple al concepto de luminancia de velo más preciso pero más complicado que se describirá en la siguiente sección.



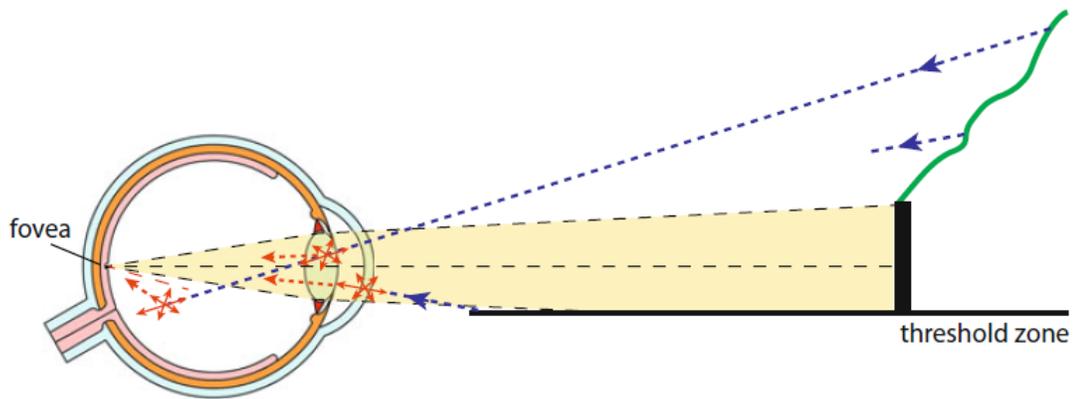
**Figura 3.3:** *Visión en el cono de 20°.*

*Fuente: Manual de Carreteras Volumen 6, 2018*

### 3.3.1.2. Concepto de luminancia de velo

Luminancias más cercanas al centro del campo visual, es decir, más cerca de la entrada del túnel, contribuyen más al estado de adaptación del conductor que se aproxima que a las luminancias hacia el campo de visión exterior. Este efecto de “posición” de las luminancias circundantes no se tiene en cuenta en el concepto  $L_{20}$ : todas las posiciones tienen el mismo peso mientras promedian el cono de 20°. Hace mucho tiempo se propuso un concepto que tiene en cuenta este efecto de posición y ahora constituye la base de las últimas recomendaciones internacionales para la iluminación de túneles (CIE, 2004). Se considera el entorno brillante del túnel como muchas fuentes de deslumbramiento que reducen el contraste percibido de los objetos en el túnel a través de la dispersión de la luz dentro del ojo (Fig. 3.4).

Este proceso es exactamente el mismo que el que experimentan los automovilistas en una carretera abierta durante la noche, desde las deslumbrantes luminarias de alumbrado de la carretera mientras miran hacia la carretera más oscura que hay por delante. La luz proveniente de las áreas brillantes que rodean la entrada del túnel y que ingresa a los ojos del conductor que se aproxima, se dispersa parcialmente en la lente ocular y el globo ocular y se redirige hacia la fovea. Esta luz crea un velo brillante que se superpone con la imagen nítida obtenida desde el centro del campo visual, a saber. La entrada del túnel y cualquier objeto dentro de ella. El valor de la luminancia de velo correspondiente depende de la posición de cada área brillante y puede expresarse con exactamente la misma fórmula que la utilizada para el resplandor de las luminarias de alumbrado de carreteras:

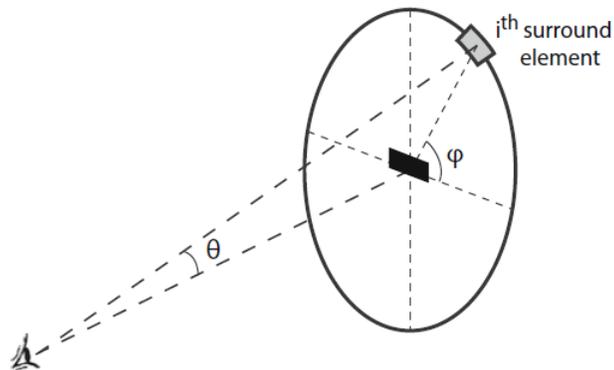


**Figura 3.4:** Entorno de la entrada del túnel como pequeñas fuentes de resplandor, cuya luz se dispersa en el ojo hacia la fovea donde se superpone con la imagen nítida obtenida desde el centro del campo visual. Dibujo no a escala.

Fuente: Van Bommel, 2014.

$$L_{seq} = \frac{10E_{eye,i}}{\theta_i^2}$$

Donde  $L_{seq}$  es la luminancia de velo equivalente causada por las luminancias circundantes y  $E_{eye,i}$  es la iluminancia en el ojo causada por el elemento de luminancia  $i$  (Fig. 3.5).

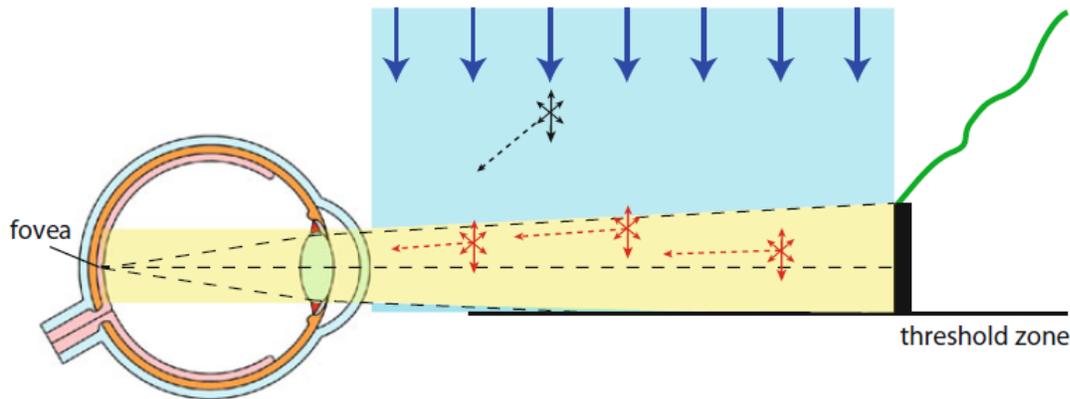


**Figura 3.5:** Geometría para el cálculo de luminancias de velo  $L_{seq}$ .

Fuente: Van Bommel, 2014.

El efecto final del velo es una reducción del contraste de los objetos según lo percibe el conductor que se aproxima.

Como se mencionó anteriormente, la dispersión de la luz diurna por la capa de atmósfera que contiene partículas de polvo y suciedad entre el conductor y la entrada del túnel dificulta la visibilidad de los objetos en la zona de umbral. Parte de la luz que se dispersa dentro del cono de visión llega directamente a la fovea, donde se superpone con la imagen nítida de la entrada del túnel (Fig. 3.6). Esto puede tener un importante efecto adicional de reducción de contraste. Parte de la luz que se dispersa fuera del cono de visión en la dirección del ojo todavía puede alcanzar la fovea debido a la dispersión de la luz dentro del ojo. Este efecto de dispersión secundaria de la luz atmosférica (en la figura 3.6 dibujada en negro) es pequeño y generalmente se descuida.



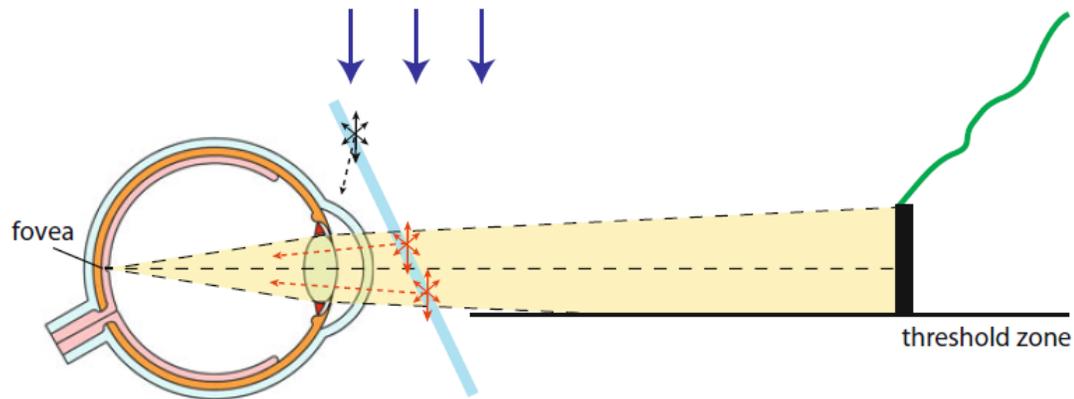
**Figura 3.6:** *Dispersión de la luz (dentro y fuera del cono de visión, que se muestra en rojo y gris respectivamente) desde la capa atmosférica de aire entre el ojo del conductor y la entrada del túnel hacia la fovea del conductor. Dibujo no a escala.*

*Fuente: Van Bommel, 2014.*

Si la luz brillante del día cae sobre el parabrisas de un automóvil, parte de esta se dispersará en el parabrisas en la dirección de los ojos del conductor para producir un efecto de disminución del contraste. Los parabrisas sucios aumentan la gravedad de este efecto. Esa parte de luz que se dispersa en el parabrisas para entrar en el cono de visión se irradia hacia la fovea, donde se superpone con la imagen nítida de la entrada del túnel para reducir el contraste de los objetos que se ven allí (Fig. 3.7). El efecto secundario de luz dispersada desde partes fuera del cono de visión (dispersión dibujada en negro) es pequeño y se desprecia.

Los tres tipos diferentes de luminancia de velo se originan de:

- Dispersión de la luz en el ojo de la luz de los alrededores del túnel brillante ( $L_{seq}$ ),
- Dispersión de la luz desde la capa de aire hacia la fovea ( $L_{atm}$ ),
- Dispersión de la luz desde el parabrisas hacia la dirección de la fovea ( $L_{ws}$ )



**Figura 3.7:** *Dispersión de la luz del parabrisas de un automóvil hacia la fovea del ojo del conductor. Dibujo no a escala.*

Fuente: Van Bommel, 2014.

por lo tanto, todos tienen un efecto de reducción de contraste para los objetos en la zona de umbral de un túnel como lo ve un conductor que se aproxima desde la zona de acceso.

Se puede determinar la luminancia de la zona de umbral necesaria para adquirir un cierto valor mínimo de contraste percibido (CIE, 2004). La fórmula es:

$$L_{th} = \left\{ \frac{\tau_{ws} L_{atm} + L_{ws} + L_{seq}}{\tau_{ws}} \right\} / \left\{ \frac{1}{C_{perc}} \left( \frac{\rho}{\pi q_c} - 1 \right) - 1 \right\}$$

Donde:

- $C_{perc}$  : Contraste percibido mínimo requerido.
- $\rho$  : Reflectancia del objeto crítico.
- $q_c$  : Coeficiente de contraste del sistema de iluminación (simétrico o asimétrico).
- $\tau_{ws}$  : Transmisión del parabrisas.

Un valor típico para la luminancia del velo atmosférico ( $L_{atm}$ ) es  $200 \text{ cd/m}^2$  y para la luminancia del velo del parabrisas ( $L_{ws}$ )  $100 \text{ cd/m}^2$ . Estos valores corresponden a altos niveles de luz diurna de alrededor de  $100.000 \text{ lx}$  de iluminación horizontal. En áreas más contaminadas o con parabrisas sucios, estos valores serán mayores. La transmisión del parabrisas suele ser de unos  $0.80$ , lo que significa que la cantidad de luz de las luminancias circundantes y de la capa de aire atmosférico se reduce por el mismo factor.

### 3.3.1.3. Influencia de la velocidad del tráfico

Existe un vínculo importante entre la velocidad del tráfico para la cual se diseñó el túnel y el valor de los niveles de iluminación que deben proporcionarse en este. La velocidad del tráfico tiene una influencia directa en el nivel de iluminación requerido en la primera parte de la zona del túnel, la zona de umbral. Cuanto mayor sea la velocidad, mayor será el nivel de iluminación. Debe tenerse en cuenta que esto también tiene una consecuencia para la cantidad de luz requerida en las otras zonas: con un nivel de zona de umbral más alto, la iluminación en la zona de transición debe comenzar en un nivel más alto, y tardará más tiempo antes de que pueda ser reducida al bajo nivel de iluminación requerido en el interior.

#### Estado de adaptación

Durante su aproximación a un túnel, la entrada relativamente oscura del túnel y su entorno, ocupan una parte cada vez mayor del campo de visión total del conductor. Como consecuencia de esto, el estado de adaptación de los ojos del conductor disminuye gradualmente. Sin embargo, en cualquier momento durante la aproximación, su estado de adaptación está determinado no solo por la distribución de luminancia en su campo de visión sino también, debido al “retraso”, generado por la distribución de luminancia experimentada poco antes de su acceso a la entrada del túnel. En general, ha quedado claro que la luminancia que debe proporcionarse en la zona de umbral del túnel se determina mejor sobre la base de las luminancias del entorno del túnel en el punto donde el conductor debe poder percibir un objeto en la entrada del túnel. Para un objeto que se encuentra en la boca del túnel, este momento está definido por el “punto de decisión de parada”, que es el punto fuera del túnel en el que el conductor debe comenzar a frenar para detenerse en la entrada del túnel. Cuanto mayor sea la velocidad, más lejos estará el punto de decisión de parada.

#### Dispersión atmosférica

Una razón secundaria de la influencia que la velocidad de aproximación tiene sobre los niveles de iluminación necesarios en la zona de umbral tiene que ver con la dispersión de la luz atmosférica. Esto ocurre debido al polvo y otras partículas suspendidas en el aire entre el conductor y la entrada del túnel. El problema causado por esta forma de dispersión de luz perturbadora es familiar para aquellos que alguna vez han conducido en la niebla: la luz dispersada desde el aire cargado de humedad hacia los ojos del conductor dificulta su visibilidad. Incluso con un cielo relativamente despejado durante el día, el mismo fenómeno dificulta la visibilidad de los objetos en la zona de umbral para un conductor que se encuentra fuera del túnel. Con una mayor velocidad de aproximación, la capa de aire entre el conductor en el punto de decisión de parada y la entrada del túnel es más gruesa y, por lo tanto, la dispersión tiene una influencia más negativa. Esto tiene que ser compensado por un mayor nivel de iluminación en el túnel.

#### Dificultad de la labor de conducir

Obviamente, la tarea de conducción es más difícil a velocidades de conducción más altas. En distancias de detención mayores asociadas con velocidades más altas, los objetos subtienden un ángulo más

pequeño. Para poder ver un objeto en tales condiciones de alta velocidad, el contraste del objeto debe ser mayor, lo que a su vez requiere niveles de iluminación más altos.

### 3.3.2. Zona umbral

Como define el Manual de Carreteras “Es la primera zona al interior del túnel que encuentra el conductor, y su longitud es equivalente a la distancia de parada para ese sector, que no es igual a la de acceso. Esta zona es la que debe permitir al conductor que entra al túnel percibir un cambio relativamente suave del nivel de luminancia. La longitud de esta zona depende de la velocidad a la que se desplaza el vehículo”(Dirección de Vialidad, 2018b).

Una forma práctica de reducir la luminancia de la zona umbral es rebajar el límite de velocidad en el túnel y que los vehículos usen sus propias luces. De esta manera se facilita el proceso de adaptación y se reduce la distancia de frenado y por tanto la longitud de la zona de umbral.

Asimismo, conviene emplear materiales no reflectantes oscuros en calzada y fachadas en las zonas aledañas al acceso de modo tal de disminuir la luminosidad reflejada. También es conveniente evitar que la luz directa del sol actúe como fondo de la entrada del túnel. A tal efecto conviene maximizar el tamaño de la entrada, plantar árboles y arbustos que den sombra sobre la calzada, usar celosías o para sol.

En estos últimos casos hay que tener cuidado en regiones frías porque en invierno pueden favorecer la aparición de hielo en la calzada además de otros problemas. Por último, es posible crear una zona iluminada con farolas antes de la entrada para favorecer la orientación visual y atraer la mirada del conductor hacia el túnel (Dirección de Vialidad, 2018b).

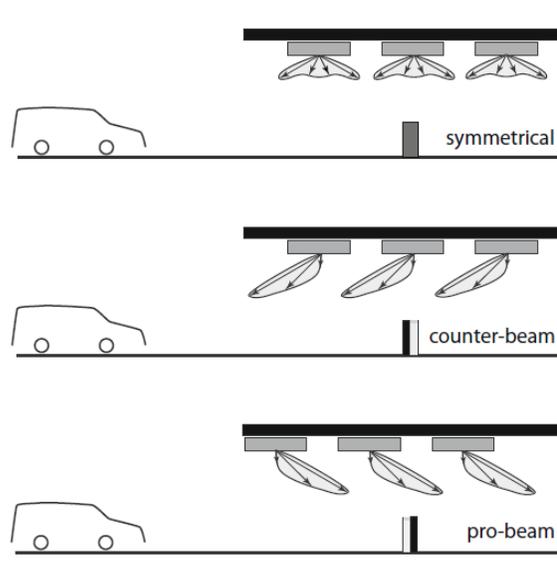
#### 3.3.2.1. Longitud de la zona umbral

La iluminación de la zona umbral sirve para producir una luminancia de fondo contra la cual un conductor que se aproxima a la entrada del túnel pueda ver claramente un obstáculo en cualquier parte de la superficie de la carretera dentro de la zona. Por lo tanto, la iluminación de la zona umbral debería extenderse hacia el túnel una distancia igual a la distancia de parada segura. El estado de adaptación visual del conductor que se aproxima, aunque no sigue inmediatamente los cambios de luminancia, disminuye en cierta medida durante su recorrido desde el punto de decisión de parada hasta la entrada del túnel porque la entrada del túnel relativamente oscura constituye gradualmente una parte mayor de su campo visual. Por lo tanto, la iluminación de la zona umbral en la parte más distante de esta puede disminuir gradualmente. CIE (2004) permite una disminución lineal de aproximadamente el 60 % de su valor original desde la mitad de la distancia de parada hasta el final de la zona.

### 3.3.2.2. Iluminación simétrica, contra-flujo y pro-flujo

Se pueden emplear tres sistemas de iluminación distintos para la zona umbral dentro del túnel: un sistema simétrico, un de contra-flujo y un sistema de pro-flujo. Cuál de estos sistemas se utiliza tiene una influencia en el nivel de rendimiento visual y la sensación de confianza de los conductores, y por lo tanto en los niveles de iluminación requeridos. Los tres sistemas se caracterizan por la distribución de luz longitudinal de las luminarias empleadas (Fig. 3.8):

- Los sistemas de iluminación simétrica proyectan el haz de luz simétricamente hacia el adelante y hacia atrás,
- Los sistemas de iluminación de contra-flujo proyectan la parte principal del flujo de luz en la dirección contraria a la dirección del tráfico,
- Los sistemas pro-flujo proyectan la parte principal del flujo de luz en la misma dirección del tráfico.



**Figura 3.8:** *Sistemas de iluminación de túneles simétricos, asimétricos de contra-flujo y pro-flujo.*

*Fuente: Van Bommel, 2014*

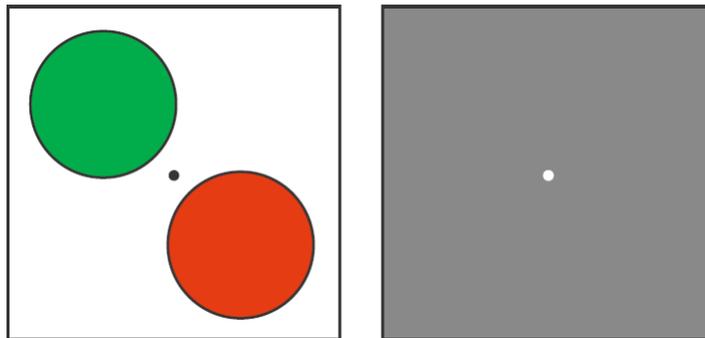
Los sistemas simétricos y de contra-flujo pueden clasificarse de acuerdo con el llamado “coeficiente revelador de contraste” ( $q_c$ ), que se define como:

$$q_c = L_{calzada} / E_{vert} \quad (3.3.1)$$

Cuanto más limitada sea la iluminancia vertical (en el plano que enfrenta a los conductores que se aproximan), mayor será el coeficiente revelador de contraste. En muchos estándares y recomendaciones para la iluminación de túneles, los sistemas de contra-flujo se definen como sistemas con un coeficiente revelador de contraste  $q_c$ , igual o superior a 0.6. Un valor típico de  $q_c$  para sistemas simétricos es 0.2.

### 3.3.3. Zona de transición

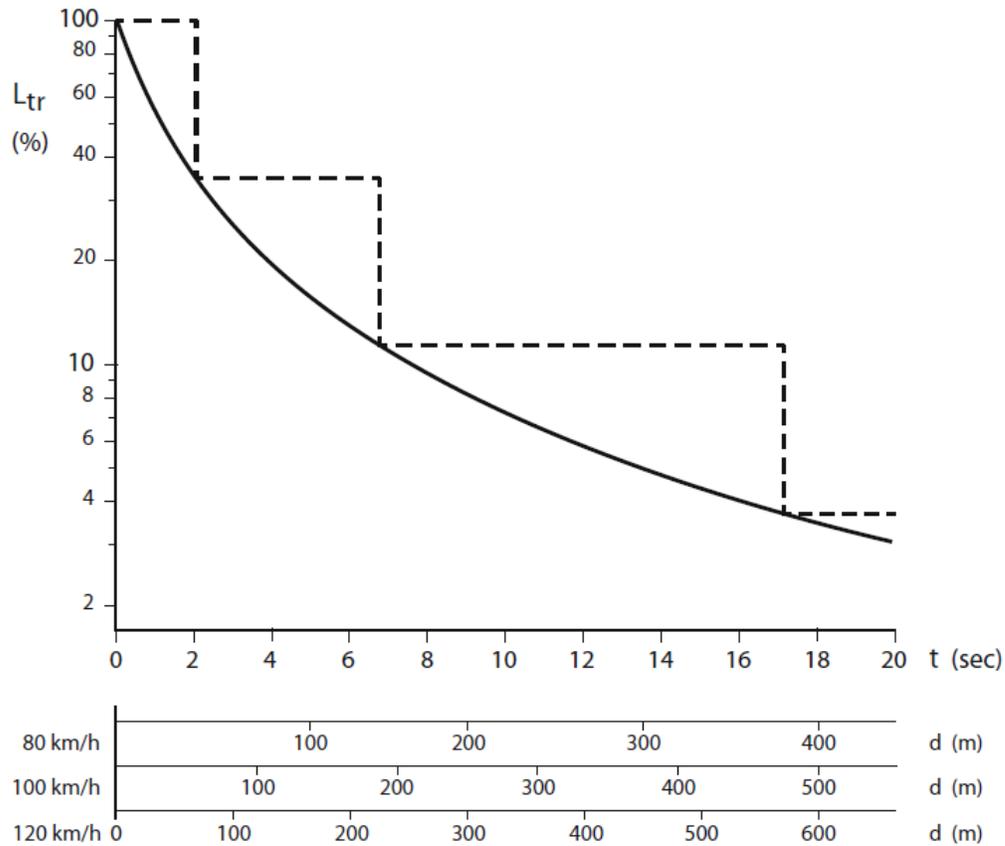
La zona de transición es aquella que permite que el conductor adapte su visión desde la zona umbral hasta la zona interior del túnel (Dirección de Vialidad, 2018b). Después de los niveles de iluminación relativamente altos requeridos en la zona umbral, la iluminación en la zona de transición puede reducirse gradualmente a un nivel mucho más bajo. El estado de adaptación del conductor que se aproxima no seguirá inmediatamente los cambios de luminancia, por lo que solo se puede obtener una adaptación parcial. Por lo tanto, si la disminución de iluminación en la zona de transición es demasiado rápida, la visibilidad y el confort visual se deteriorarán. Un efecto negativo principal asociado con la adaptación parcial es la aparición de imágenes posteriores. Estas son imágenes débiles de escenas visuales que se han visto poco tiempo antes, cuando las condiciones eran mucho más brillantes. La imagen posterior se ve en contraste y color invertido (Fig. 3.9).



**Figura 3.9:** Se puede producir una imagen secundaria cuando, después de concentrarse durante unos 20 s en la imagen brillante (fijar el punto negro), una se concentra posteriormente en el área más oscura (fijar el punto blanco).

*Fuente: Van Bommel, 2014.*

La CIE definió una curva de reducción de luminancia para la zona de transición que se basa en parte importante en las evaluaciones no publicadas realizadas por los miembros del comité técnico en una gran cantidad de túneles diferentes. La figura 3.10 muestra la misma curva CIE con ejes horizontales adicionales donde el tiempo se transforma en distancias para una velocidad de conducción determinada. El punto de 100% corresponde al valor de luminancia al final de la zona de umbral. Si se utiliza un sistema de iluminación en el que la atenuación continua de las lámparas no es factible, la curva suave se puede aproximar por pasos, siempre que las etapas siguientes tengan transiciones menores a 3: 1 y que ningún paso haga que el nivel de iluminación sea inferior al de la curva.



**Figura 3.10:** Curva de reducción de luminancia CIE que muestra la tasa máxima permitida de disminución en la zona de transición.

Fuente: Van Bommel, 2014.

### 3.3.4. Zona interior

En túneles largos, la zona de transición es seguida por una zona en la que el nivel de luminancia se mantiene constante porque los ojos del conductor están razonablemente bien adaptados. Como hemos visto en la sección anterior, al comienzo de esta zona interior, la adaptación aún no está completa y, por lo tanto, es necesario disponer de un nivel de luminancia bastante alto en comparación con el nivel necesario en una carretera abierta por la noche. Incluso en túneles muy largos donde la adaptación se completa gradualmente, el nivel de iluminación debe ser más alto que en una carretera abierta de noche. La razón de esto es que en un túnel hay menos espacio para corregir un error y menos espacio para evitar obstáculos; y si ocurre un accidente, es probable que las consecuencias sean más graves. La experiencia práctica ha demostrado que se deben recomendar niveles de 2 a 10  $\text{cd} / \text{m}^2$  para la zona interior, siendo aceptables los niveles inferiores para túneles con baja densidad de tráfico y velocidad de conducción (Van Bommel, 2014).

### 3.3.5. Zona de salida

El manual de carreteras define que la zona de salida corresponderá a los últimos 60 m de túnel y tendrá una luminancia 5 veces mayor a la luminancia interior del túnel.

En la salida, las condiciones de iluminación son menos críticas pues la visión se adapta en menor tiempo al pasar de ambientes oscuros a claros. Los vehículos u otros obstáculos se distinguen con facilidad porque sus siluetas se recortan claramente sobre el fondo luminoso que forma la salida. Esto se acentúa, además, si las paredes tienen una reflectancia elevada. En estas condiciones, la iluminación sirve más como referencia y basta en la mayoría de los casos con  $20 \text{ cd/m}^2$  con los cuales se obtienen buenos resultados (Dirección de Vialidad, 2018b).

### 3.3.6. Iluminación nocturna

En ausencia de luz diurna, iluminar un túnel resulta más sencillo. Basta con reducir el nivel de luminancia en el interior del túnel hasta el valor de luminancia de la ruta donde se encuentra o si ésta no está iluminada, la relación entre las luminancias interior y exterior no pase de 3 a 1 para evitar problemas de adaptación. En este último caso se recomienda un valor aproximado entre 2 y  $5 \text{ cd/m}^2$  (Dirección de Vialidad, 2018b).

Hay que tener en cuenta que, aunque no se presente el efecto del agujero negro en la entrada, sí se puede dar en la salida. Por ello es recomendable iluminar la ruta adyacente a partir de la salida unos 200 m como mínimo para ayudar en la adaptación visual.

## 3.4. Parámetros de calidad del sistema de iluminación

Para fines de especificación y diseño, la calidad de una instalación de iluminación se puede evaluar mediante parámetros de calidad que, a grandes rasgos, se pueden agrupar en dos categorías:

- Parámetros basados únicamente en unidades fotométricas, como el nivel de iluminación, la uniformidad y la restricción del deslumbramiento.
- Parámetros basados en las métricas del rendimiento de la tarea visual, como el poder revelador, el índice de visibilidad, la visibilidad del objetivo pequeño y la identificación facial.

La primera categoría depende únicamente de los aspectos de instalación de la iluminación. La superficie de la carretera se considera como parte de la instalación de iluminación. La segunda categoría, depende de una combinación de aspectos de la instalación y otros que no dependen de ella, como el tipo de objetivo (tamaño, forma, reflectancia, etc.), tipo de maniobra que se debe realizar (mantener la distancia, reaccionar a los cambios de posición de otros automóviles, bicicletas y peatones, etc.).

Una métrica de desempeño solo puede cumplir uno o un número limitado de aspectos de tareas visuales y, por lo tanto, ignora los demás. Las métricas de rendimiento también ignoran la importancia

de los aspectos de comodidad visual. Esto puede llevar a conclusiones erróneas en cuanto a la calidad general de la instalación de alumbrado vial. Se considera que lo mejor y más práctico es basar la calidad de las instalaciones de iluminación vial en unidades fotométricas puras. La consideración cuidadosa de la influencia de los diferentes valores de estos parámetros fotométricos en las métricas de desempeño relevantes para una situación dada, debería ser la base para definir las especificaciones (Van Bommel, 2014).

### 3.4.1. Nivel de iluminación

#### 3.4.1.1. Luminancia media de la superficie de la calzada

El parámetro de calidad de iluminación empleado para el nivel de iluminación es la luminancia promedio de la superficie de la carretera entre 60 y 160 m frente al conductor. El área de camino hasta unos 160 m es el área de fondo contra la cual se deben detectar los objetos para la mayoría de las velocidades de conducción. Se considera que el área entre 0 y 60 m no es tanto la responsabilidad de la iluminación fija de la carretera, ya que es cubierta por los faros del propio vehículo. El área entre 60 y 160 m determina en gran medida el estado de adaptación de los ojos del automovilista.

La posición lateral del conductor para determinar la luminancia promedio de la superficie de la carretera se toma típicamente en un cuarto del ancho de la calzada desde el borde del lado cercano. El símbolo utilizado para la luminancia media de la superficie de la carretera es  $L_{av}$ .

### 3.4.2. Uniformidad

#### 3.4.2.1. Uniformidad global

En el caso de un patrón de luminancia en la carretera en el que hay una gran diferencia entre el valor de luminancia de la parte más oscura y el valor de la luminancia promedio de la superficie de la carretera, puede ser difícil detectar objetos contra la parte más oscura porque el ojo se adapta a la luminancia promedio más alta. Es por esta razón que se considera el concepto de uniformidad global de luminancia.

Se define como la relación entre la luminancia mínima de la superficie de la carretera y la luminancia media,  $L_{mín} / L_{av}$ . Es indiferente en qué parte del camino se encuentre la luminancia mínima, porque un automovilista necesita poder ver objetos en todos los puntos posibles en todo el camino. El símbolo utilizado para la uniformidad general es  $U_o$ . Para la determinación de  $U_o$ , la posición lateral del conductor se toma principalmente como un cuarto del ancho de la calzada desde el borde del lado cercano.

### 3.4.2.2. Uniformidad longitudinal

Se define como la relación entre la luminancia mínima y máxima de la superficie de la carretera en una longitud longitudinal paralela a la longitud del eje de la carretera ( $L_{\text{mín}} / L_{\text{máx}}$ ). El símbolo utilizado es  $U_1$ .

Una secuencia continua de puntos brillantes y oscuros en el camino frente a un conductor puede ser extremadamente incómodo. Este aspecto de incomodidad de una instalación de alumbrado vial puede limitarse especificando un valor mínimo para la uniformidad longitudinal.

### 3.4.3. Limitación del deslumbramiento

En general, se distinguen dos tipos de deslumbramiento, deslumbramiento fisiológico o incapacitivo y deslumbramiento molesto. El deslumbramiento incapacitivo es aquel que produce una pérdida de sensibilidad al contraste y el deslumbramiento molesto es aquel que resulta incómodo, independientemente de si se produce o no una pérdida de rendimiento visual.

#### 3.4.3.1. Incremento de umbral

Se define como el porcentaje de pérdida de percepción visual de un objeto por el deslumbramiento de las fuentes luminosas, debido a la reducción del contraste de dicho objeto a consecuencia de la luminancia de velo, que es la luz de las fuentes deslumbrantes que se esparce en dirección de la retina provocando que un velo brillante se superponga a la imagen nítida de la escena que se observa. La luminancia de velo se puede calcular como:

$$L_v = 10 \frac{E_{\text{ojo}}}{\theta^2}$$

donde:

$L_v$  : Luminancia de velo ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )

$E_{\text{ojo}}$  : Nivel de iluminancia vertical en el ojo ( $\text{lx}$ )

$\theta$  : Ángulo del eje de visión con la dirección de la luz incidente de la fuente

Para luminancias medias comprendidas entre  $0.05$  y  $5 \text{ cd}/\text{m}^2$ , el Incremento de Umbral se calcula mediante la siguiente expresión:

$$TI = 65 \frac{L_v}{L_{av}^{0.8}}$$

donde:

$TI$  : Incremento de umbral correspondiente al deslumbramiento perturbador.

$L_v$  : Luminancia de velo ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )

$L_{av}$  : Luminancia media de la calzada ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )

## 3.5. Equipos para medir las características del sistema de iluminación

### 3.5.1. Equipos para medir iluminancia

#### 3.5.1.1. Luxómetro

Consiste en una fotocelda, que convierte la luz incidente sobre ella en energía eléctrica, cuya cantidad se puede medir e interpretar. Los luxómetros pueden tener distintas escalas en función de la cantidad de luz que se quiera medir, para tener una precisión más exacta en caso de que la iluminancia sea más fuerte o débil.



**Figura 3.11:** *Luxómetro.*

*Fuente: Konica Minolta.*

#### 3.5.1.2. Sistemas dinámicos

Se han desarrollado aplicaciones para simplificar y automatizar el proceso de recolección de medidas de iluminancia, montando sensores de iluminancia y posición GPS en vehículos, con el fin de tomar medidas georreferenciadas del nivel de iluminancia mientras éste circula por la vía. También se han desarrollado sistemas que combinan sensores de iluminancia con dispositivos de medición de distancia.

### **ALMS**

En 2014 se desarrolló el Advanced Lighting Measurement System (ALMS) en Florida, capaz de registrar lecturas de iluminación mientras viaja a velocidades de conducción. El sistema consiste en un microcontrolador Arduino, instrumento de medición de distancia, módulo USB, registrador de eventos, módulo GPS, luxómetros y módulo micro SD. El sistema requiere una mínima interacción del usuario y acelera rápidamente la medición de iluminación a lo largo de las carreteras (Johnson et al., 2014).

### **LX-GPS**

En España se desarrolló la aplicación LX-GPS, la cual consiste en una serie de luxómetros instalados sobre el techo de un vehículo, integrados con GPS, que pueden almacenar datos de iluminancia a medida que el vehículo se desplaza por la vía. (Sanz and Sierra, 2011).

### **Sistema móvil del CUTR**

En 2008, el Centro de Transporte e Investigación Urbana (CUTR) de la Universidad del Sur de la Florida implementó un sistema móvil para medir la iluminación vial. Este sistema fue probado a lo largo de las principales carreteras de Florida con la intención de integrar los resultados en la base de datos de carreteras del Departamento de Transporte de la Florida. (Zhou et al., 2009)

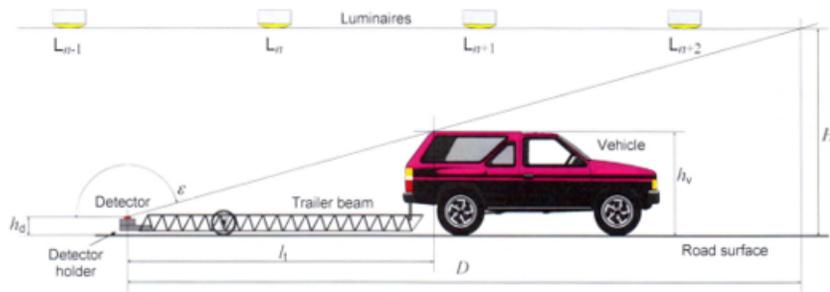
El sistema creado por CUTR usa medidores de luz montados en la parte superior de un vehículo, un DMI y una computadora portátil. Este sistema se basó en una computadora portátil y un software para integrar datos entre los medidores de luz y el DMI. Este diseño no incluye datos de ubicación GPS. Al depender únicamente del DMI para la ubicación, el sistema es vulnerable a problemas de precisión de ubicación, ya que no hay forma de verificar dónde se realizaron las mediciones. El uso de una computadora portátil en lugar de un sistema integrado reduce el grado de automatización, lo que requiere una mayor participación del usuario.

### **Sistema Tráiler**

Sistema descrito en el reporte CIE 194:2011 “On site measurement of the photometric properties of road and tunnel lighting”. Consiste en un arreglo en el cual uno o más luxómetros van montados en un tráiler diseñado para minimizar la influencia de las sombras del vehículo de medición (figura 3.12).

Esta técnica es una extensión del método de medición manual, pero tiene varias restricciones de operación:

1. El sistema de medición debe ser remolcado lenta y cuidadosamente, debido al largo remolque.
2. Las mediciones en carreteras abiertas al tráfico podrían ser peligrosas y en algunas situaciones es necesario el cierre temporal de la carretera.
3. El sistema debe estar alineado normal al eje longitudinal de la carretera, y el conductor debe estar continuamente rectificando la posición del vehículo, intentando reducir la oscilación transversal del



**Figura 3.12:** Sistema con Tráiler.

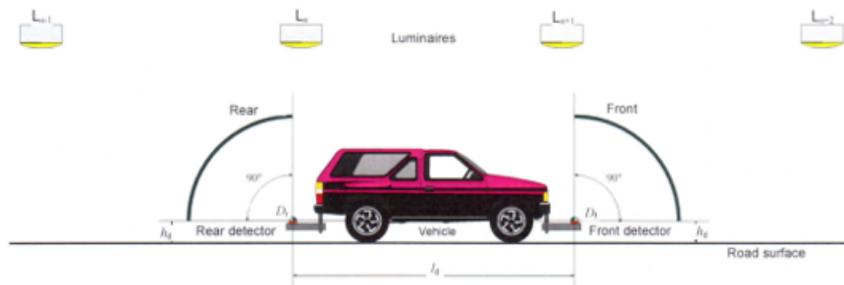
Fuente: CIE (2011).

detector y minimizando así la incertidumbre en la posición efectiva de medición del detector. Esta tarea podría ser muy cansadora y molesta para el conductor.

- Para reducir los errores de medición debido a la sombra proyectada sobre los detectores de fotos por el mismo vehículo de remolque, el tráiler debería ser muy largo: esto puede causar dificultades al cambiar la dirección de medición, cuando es necesario repetir mediciones a lo largo de distintas líneas longitudinales de una pista.

### Sistema de detector dividido

Sistema descrito en el reporte CIE 194:2011 “On site measurement of the photometric properties of road and tunnel lighting”. Consiste en un arreglo en el cual se utilizan dos sensores, el primero mide la luz en la media hemiesfera en la dirección frontal en un punto definido, el segundo mide la luz en la media hemiesfera en la dirección posterior en el mismo punto, y la iluminancia en esos puntos está dada por la suma de las lecturas de los dos detectores (figura 3.13).



**Figura 3.13:** Sistema con detector dividido.

Fuente: CIE (2011).

El sistema de detector dividido soluciona los problemas principales del sistema tráiler, pero necesita un algoritmo de medición más complejo y una elaboración de la señal medida más sofisticada.

Hay dos formas de obtener la señal de salida de un detector dividido:

1. La señal del detector frontal se muestrea cuando el odómetro del vehículo de medición lo registra en la posición longitudinal deseada, luego se toma una muestra del detector trasero cuando cruza el mismo punto.
2. El detector frontal y el trasero son muestreados sincrónica o asincrónicamente a una tasa definida. En el mismo instante el contador del odómetro es leído y registrado junto con los valores de iluminancia.

### **3.5.2. Equipos para medir luminancia**

#### **3.5.2.1. Luminancímetro**

Ya que las células fotoeléctricas miden la luz incidente sobre su superficie, es la iluminancia lo que se mide. En fotometría, por lo tanto, todas las cantidades fotométricas que se miden deben ser convertidas a iluminancias. Para mediciones de luminancia esto significa que la imagen de la superficie cuya luminancia se debe medir, como por ejemplo el área brillante de una luminaria o el área de una sección de carretera o un punto de la carretera tiene que ser proyectado en la cara de la fotocelda. Un luminancímetro, por lo tanto, contiene una fotocelda con un sistema óptico en el frente que proyecta una imagen de la escena a ser medida en la cara de la fotocelda.

Mediante empleo de un diafragma ajustable, el tamaño del área proyectada en la célula puede ser cambiada de una medición puntual a una medición de área más grande. Empleando un diafragma trapezoidal que coincida con la vista en perspectiva de la superficie de la calzada frente al medidor, la luminancia media puede ser medida directamente. Dichos medidores son llamados luminancímetros integradores. Para mediciones puntuales muy pequeñas, se necesitan fotocélulas muy sensibles debido a la pequeña cantidad de luz que finalmente alcanza la celda.

#### **3.5.2.2. Dispositivo de medición de luminancia de imagen, ILMD**

Un ILDM (Image Luminance Measurement Device, dispositivo de medición de iluminancia de imagen) es un dispositivo electrónico digital, equipado con lentes, un filtro fotométrico adecuado, un sensor compuesto por una matriz de detectores (píxel), y calibrado para medir las distribuciones de luminancia de una escena. En un ILMD, cada píxel se calibra para determinar los valores de luminancia de las imágenes proyectadas en su superficie (UNE, 2016). Estos dispositivos, también llamados luminancímetros “multidireccionales”, son capaces de medir valores de luminancia en varias direcciones de vista a la vez.

La matriz de píxeles se realiza generalmente con sensores CCD (sensores de carga acoplada – charge coupled device) o CMOS (semiconductor de óxido de metal complementario – complementary metal oxide device).



**Figura 3.14:** *Luminancímetro.*

*Fuente: Konica Minolta.*

Los sistemas de medición basados en estos dispositivos han avanzado desde prototipos de investigación experimental a instrumentos comerciales, acabados con software de medición y elaboración de datos.

### **Equipos Comerciales**

#### **Medidor de luminancia de imagen CX-3B/2B**

De acuerdo a lo informado por el fabricante, las características principales del equipo son:

- Alta precisión: El ajuste espectral del sistema óptico a la función  $V(\lambda)$  puede alcanzar el nivel de clase A o clase B (DIN 5032-7).
- Medición de alta resolución: CX-3B equipa CCD de alta calidad de más de 8 millones de píxeles para realizar una super alta resolución. CX-2B equipa CCD de imagen de alta calidad de más de 1,4 millones de píxeles para medir la luminancia de cada punto en el campo una vez por muestreo.
- Alto rango dinámico (HDR – High Dynamic Range): La tecnología de alto rango dinámico, realiza la medida exacta de objetos con gran diversidad de la luminancia, el rango de medida puede ser de  $0.001 \text{ [cd/m}^2\text{]}$  a  $200 \text{ [kcd/m}^2\text{]}$ .
- Buena Estabilidad: Los modelos adoptan la tecnología avanzada del enfriamiento para adquirir buena estabilidad y repetibilidad.

- Excelente calidad de imagen: Equipamiento con objetivo de gama alta de gran apertura para medir el objeto de corta a muy larga distancia.
- Alimentado por el suministro de red o la fuente de alimentación de CC externa, y tiene un interfaz del USB, es conveniente para la medida del laboratorio y en terreno.



**Figura 3.15:** *Medidor de Luminancia de Imagen CX-2B.*

*Fuente: OxyTech.*

El dispositivo es capaz de realizar las siguientes mediciones:

- Luminancia en los puntos de la retícula definidos por el usuario sobre la imagen del vial o del túnel según las CIE140-2000, EN 13201:2015 e IESNA RP-8-00.
- Cálculo de las uniformidades longitudinales y transversales.
- Valoración de la luminancia en la zona de acceso a los túneles de carreteras según las CIE88-2004, UNE-CR 4380:2007.
- Cálculo del deslumbramiento TI.



**Figura 3.16:** Medición de luminancia en todos los puntos de la grilla, cálculo de incremento de umbral.

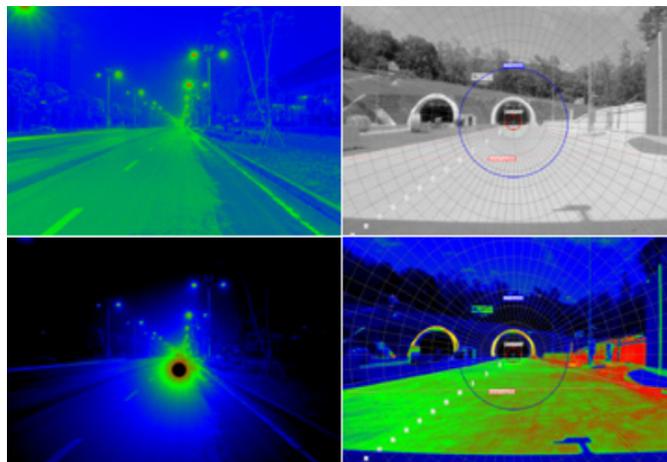
Fuente: OxyTech.

### LMK mobile air

Luminancímetro de imagen basado en una cámara digital réflex Canon 70D. Permite realizar mediciones de deslumbramiento mediante TI, mediciones de  $L_{20^\circ}$  en entradas de túneles (CIE 88), distribuciones de luminancias de acuerdo con norma EN13201 en carreteras y túneles.

Restricciones:

- No puede ser usado para medir fuentes de luz de color (LED).
- Uso limitado para medir fuentes de luz moduladas con fuerte modulación.

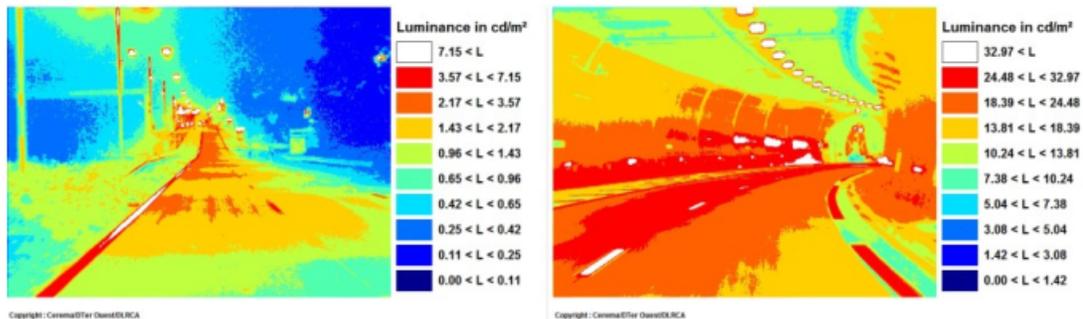


**Figura 3.17:** Determinación del deslumbramiento mediante Incremento de Umbral, medición de la luminancia  $L_{20^\circ}$  en la zona próxima a la entrada de un túnel.

Fuente: Techno Team.

### 3.5.2.3. Cyclope

Es un sistema automático de medición de desempeño de la iluminación de carreteras y túneles, desarrollado por el Département Laboratoire et CECP d'Angers (DLRCA) de Cerema (Instituto Público de la red científica del Departamento de Transportes de Francia). El sistema combina un dispositivo de medición fotométrico y colorimétrico con algoritmos de detección y ajuste de demarcaciones viales. La grilla de medición normativa para el cálculo del rendimiento se proyecta directamente en las imágenes. Las imágenes de CYCLOPE están georeferenciadas, los resultados se pueden integrar directamente en un Sistema de Información Geográfica, ofreciendo la oportunidad de evaluar globalmente el nivel de servicio de la infraestructura. (Grefer et al., 2015)



**Figura 3.18:** Imágenes procesadas cyclope, con escalas de valores para cada píxel.

*Fuente: (Grefer et al., 2015)*

En la figura 3.19 se muestra un ejemplo de un reporte de medición del sistema CYCLOPE, en la cual se pueden ver para distintos puntos la luminancia media, uniformidad global y longitudinal a lo largo de una calle. Las mediciones de luminancia se muestran también en modo cartográfico y todas las mediciones pueden ser importadas en un Sistema de Información Geográfica.

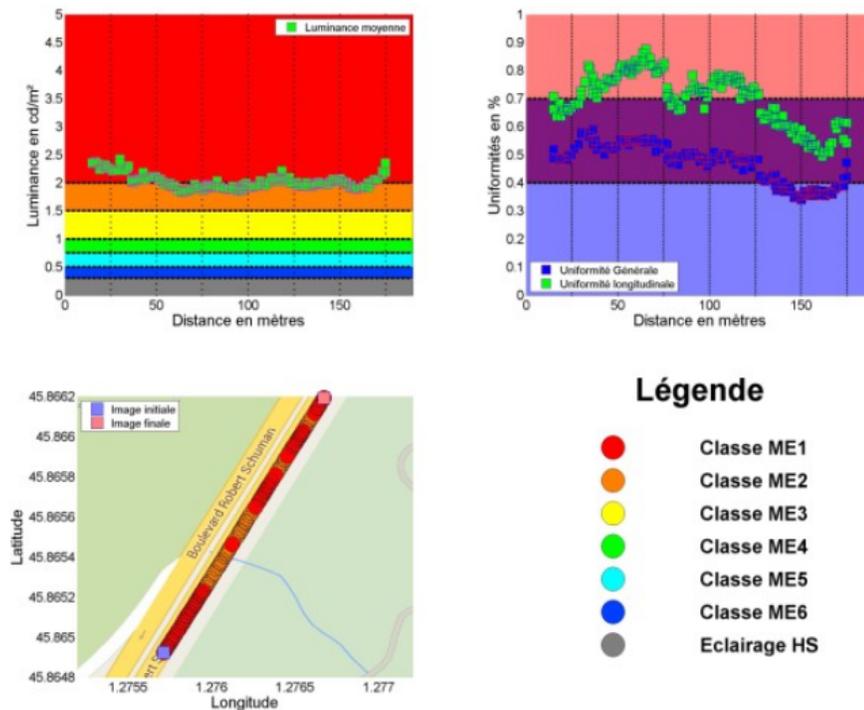


Figura 3.19: Reporte típico CYCLOPE (en francés).

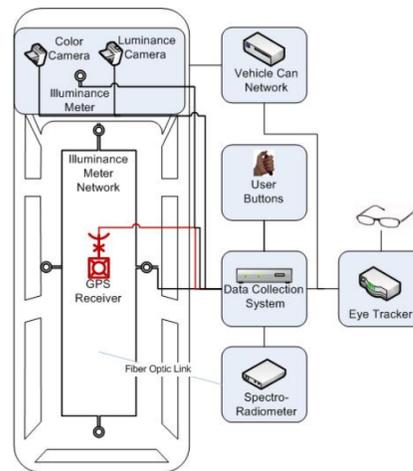
Fuente: (Grefer et al., 2015)

### 3.5.3. Sistemas mixtos

#### 3.5.3.1. RLMMS

El Grupo Lighting and Infrastructure Technology del Virginia Tech Transportation Institute (VT-TI), bajo el patrocinio del Centro National Surface Transportation Safety for Excellence (NSTSCE), desarrolló un sistema mixto de medición llamado Roadway Lighting Mobile Measurement System (RLMMS), el cual provee método evaluación de iluminancia, contenido Espectral, deslumbramiento, rendimiento visual y condición del vehículo. El sistema fue desarrollado para ser transportable a cualquier parte del mundo y montado en cualquier vehículo, fue programado enteramente en LabView y permite una variedad de configuraciones de colección de datos. Ha sido utilizado en varios proyectos de iluminación en Anchorage, Alaska; Honolulu, Hawai; y San Diego, California. (Gibbons et al., 2018)

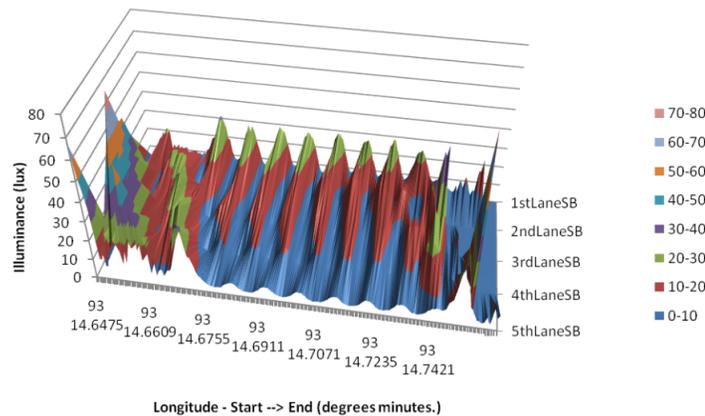
El RLMMS cuenta con 5 luxómetros; 4 miden la iluminancia en la línea del centro y las huellas del vehículo, uno mide la luminancia vertical a la altura del ojo del conductor, una cámara calibrada para medir luminancia y una para medir el color de la escena. Puede vincularse a la red interna del vehículo para obtener medidas de velocidad y distancia. Pueden incorporarse herramientas adicionales como un espectrorradiómetro y un rastreador ocular. Se muestra el esquema del RLMMS con todos sus componentes en la Figura 3.20.



**Figura 3.20:** Esquema Road Lighting Mobile Measurement System (RLMMS).

Fuente: Gibbons, R; Meyer, J.; Edwards, J. (2018)

(Gibbons et al., 2018) reporta análisis de repetitividad y reproducibilidad (R& R) para las mediciones de iluminancia horizontal y vertical, para tener en cuenta el nivel de coherencia de los datos en el tiempo (repetitividad) y entre diferentes usuarios (reproducibilidad). Los resultados indican que para la medición de iluminancia horizontal se puede atribuir un 13% de la variabilidad al sistema de medición, mientras que para la iluminancia vertical obtiene un 26%. Ambos resultados, de acuerdo con la escala que se define, podrían considerarse como aceptables. También se reporta comparación de medidas de iluminancia horizontal con respecto a métodos manuales, obteniendo resultados aceptables.



**Figura 3.21:** Reporte RLMMS.

Fuente: (Gibbons et al., 2018)

Hasta Julio 2017, el sistema había medido más de 5000 millas de iluminación. Como ejemplo, se muestran los resultados de una recopilación de datos del Minneapolis-St. Paul Bridge en la figura 3.21, en la cual se ilustra la iluminancia de cada una de las luminarias en cada una de las cinco pistas. Esto se realizó para direcciones tanto hacia el norte como hacia el sur. Se espera tomar estas mediciones cada 3-6 meses para monitorear los cambios en el sistema de iluminación en el puente. Este proyecto permite monitorear el rendimiento del sistema LED durante un largo período de tiempo para establecer los factores de diseño asociados con el sistema LED relacionados con la suciedad y los cambios en la salida del sistema.

## 3.6. Normas y recomendaciones

Muchos de los resultados de investigación se han traducido en recomendaciones prácticas para la iluminación de túneles. A menudo, estas recomendaciones también se basan en las evaluaciones realizadas por los miembros del comité de cada país en diferentes túneles existentes con instalaciones de iluminación muy diferentes. En esta sección, primero se tratarán las recomendaciones para la iluminación de túneles en Chile presentado en el manual de carreteras volumen 6. Posteriormente se tratarán las recomendaciones para la iluminación de túneles de la comisión internacional de iluminación (CIE) y Estándares Norteamericanos.

### 3.6.1. Recomendación Manual de Carreteras Volumen 6: Seguridad Vial

La última recomendación del Manual de Carreteras volumen 6 se publicó en 2017 y contiene la sección denominada “Diseño luminotécnico de túneles”.

#### 3.6.1.1. Luminancia en la zona umbral

El nivel requerido al comienzo de esta zona es proporcional a  $L_{20}$  (tabla 3.3 ) a través de un factor  $k$  (tabla 3.4), este factor  $k$  de relación entre el nivel en la zona exterior ( $L_{20}$ ) y el nivel en la zona de umbral ( $L_{th}$ ) depende de:

- Sistema de alumbrado adoptado: simétrico (transversal o axial) y asimétricos (contra-flujo, pro-flujo)
- Distancia de parada
- Clase de alumbrado

**Tabla 3.3:** Luminancia promedio  $L_{20}$  en el cono de visión de 20 del campo de visión,  $cd/m^2$

Estado de brillo en el campo de visión	Porcentaje de cielo en el cono del campo de visión de 20															
	35 %				25 %				10 %				0 %			
	Normal		Nieve		Normal		Nieve		Normal		Nieve		Normal		Nieve	
	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)	(3)	(3)	(2)	(2)	(3)	(3)
SD = 60 m	(4)	(4)	(4)	(4)	4000	5000	4000	5000	2500	3500	3000	3500	1500	3000	1500	4000
SD = 100-160 m	4000	6000	4000	6000	4000	6000	5000	7000	3000	4500	3000	5000	2500	5000	2500	5000

(1) Este efecto dependerá además de la orientación del túnel

- Bajo: Hemisferio Sur: Entrada Norte
- Alto: Hemisferio Sur: Entrada Sur
- Para entradas de Este a Oeste corresponderá al valor medio entre los valores alto y bajo del túnel escogido.

(2) Este efecto dependerá más del deslumbramiento del entorno del túnel

- Bajo: reflectancia baja del entorno
- Alto: reflectancia Alta del entorno

(3) Este efecto dependerá de la orientación del túnel

- Bajo: Hemisferio Sur: Entrada Sur
- Alto: Hemisferio Sur: Entrada Norte
- Para entradas de Este a Oeste corresponderá al valor medio entre los valores alto y bajo del túnel escogido.

(4) Para distancia de detención de 60 m con alto porcentaje de aporte de cielo de 35 %, por lo general es muy difícil encontrar en la práctica.

**Tabla 3.4:** Valores para el factor k

Distancia de parada	Sistema de Iluminación Simétrico ( $L/E_v \leq 0.2$ )	Sistema de Iluminación Asimétrico ( $L/E_v \geq 0.6$ )
	$k=L_{th}/L_{20}$	$k=L_{th}/L_{20}$
60 m	0.05	0.04
100 m	0.06	0.06
160 m	0.1	0.07

Ejemplo: si la luminancia  $L_{20}$  medida es de  $4.000 \text{ cd/m}^2$  y el sistema de iluminación elegido es simétrico, para una distancia de parada de 60 m, de la tablas mencionadas se tiene:

$$L_{Th} = L_{20} \cdot k$$

$$L_{Th} = 4.000 \cdot 0,05 = 200(\text{cd}/\text{m}^2)$$

Cuando se utilicen luminarias con fuentes lumínicas LED, podrá disminuirse el valor de la luminancia en la zona umbral en el mismo porcentaje en que se mejore la uniformidad general hasta un límite de 20 %. Para determinar los valores a adoptar, debe tenerse presente lo siguiente:

- Para el caso en que la distancia de parada sea distinta a los valores entregados en tabla 3.4, se deberá interpolar.
- Lo mismo ocurrirá con el factor k, según el sistema elegido.
- La uniformidad general  $U_0$  de luminancia en la calzada no podrá ser inferior a 40 %. En caso de existencia de curvas o sectores conflictivos, se debe considerar una uniformidad general de 50 %.
- La uniformidad longitudinal de cada carril  $U_l$  de luminancia en la calzada no podrá ser inferior a 60 %. Por las mismas razones que en  $U_0$ , se debe considerar una uniformidad longitudinal de 70 %.

Para efectos de medición de las luminancias, uniformidades general y longitudinal, se debe contemplar el uso de la normativa de procedimiento CIE - 140 para todos los casos mencionados tanto anteriores como siguientes:

- Luminancia media corresponderá al promedio de los valores medidos que estén contenidos en el protocolo.
- Luminancia mínima será el mínimo valor de las luminancias medidas.
- Luminancia máxima será el máximo valor de la(s) luminancia(s) medida(s).
- Uniformidad general ( $U_0$ ) será la relación entre la luminancia mínima y la luminancia media, determinadas de acuerdo con lo indicado en CIE - 140.
- Uniformidad longitudinal se determinará por la relación de luminancia máxima y luminancia mínima, medida sobre la línea central de cada pista, como se indica en CIE 140.

#### 3.6.1.2. Luminancia en la zona de transición

La luminancia de transición corresponderá en su primera subzona a un valor equivalente de 40 % del valor de la luminancia de umbral; las posteriores gradientes de luminancias de las restantes subzonas no podrán superar una relación 3:1 con la luminancia que le antecede, hasta llegar al valor de la luminancia interior.

En general los niveles de luminancia en las entradas del túnel son muy superiores a los del interior, por lo que debe crearse una zona de transición que debe cumplir las prescripciones siguientes:

- Se establecerán escalones de iluminación decreciente entre el nivel de la entrada y el nivel del interior, de forma que superen los valores de la curva de adaptación, que representan las variaciones de las adaptaciones temporales y espaciales.

- Las longitudes donde se implanten estos escalones de iluminación estarán comprendidas entre un tercio y la mitad de la distancia efectiva de parada.
- Los niveles de iluminación de dos escalones sucesivos variarán de 2:1 a 3:1, determinados por la envolvente externa de la curva de adaptación. La luminancia media de las paredes hasta 2 m de altura debería ser similar a la de la calzada en ese tramo del túnel.

Para el ejemplo comentado, las subzonas de transición comenzarán con un valor mínimo de:

$$L_{Tr1} = 200 \cdot 40\% = 80 \text{ (cd/m}^2\text{) (luminancia subzona transición 1)}$$

$$L_{Tr2} = 80 / 3 = 27 \text{ (cd/m}^2\text{) (luminancia subzona transición 2)}$$

$$L_{Tr3} = 27 / 3 = 9 \text{ (cd/m}^2\text{) (luminancia subzona transición 3)}$$

$$L_{Tr4} = 9 / 3 = 3 \text{ (cd/m}^2\text{) (luminancia subzona transición 4)}$$

La uniformidad general  $U_0$ , de luminancia en la calzada no podrá ser inferior a 40% y la uniformidad longitudinal de cada carril  $U_l$  de luminancia en la calzada no podrá ser inferior a 60%. En caso de existencia de curvas o sectores conflictivos, se debe considerar una  $U_0$  de 50% y una  $U_l$  de 70%.

Cuando se utilicen luminarias con fuentes lumínicas LED, podrá disminuirse el valor de la luminancia en la zona de transición en el mismo porcentaje en que se mejore la uniformidad general, hasta un límite de 25%.

### 3.6.1.3. Alumbrado en la zona interior

Cuando el conductor llega a la zona interior, sus ojos se han adaptado en una forma segura desde los altos niveles de la zona exterior inmediata al túnel hasta los bajos niveles interiores. Los siguientes son los valores de luminancia en el interior, considerando una distancia de parada, volumen de tránsito y velocidad como parámetros relevantes:

**Tabla 3.5:** Luminancia promedio zona interior  $\text{cd/m}^2$  ( $L_{int}$ )

Distancia de parada	Flujo de tránsito (intensidad)		
	Bajo <100 vehículos / h (TMDA < 10000)	Medio >100 vehículos / h <1000 vehículos / h (1000 <TMDA < 20000)	Alto >1000 vehículos / h (TMDA > 20000)
160 m	5	10	15
100 m	2	4	6
60 m	1	2	3

Para el ejemplo comentado, si el flujo vehicular es de 500 vehículos/h, entonces el valor de luminancia interior, para una distancia de parada de 60 m y un flujo vehicular medio, es de:  $L_{\text{int}} = 2$  ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ).

La uniformidad general  $U_0$ , de luminancia en la calzada no podrá ser inferior a 40% y la uniformidad longitudinal de cada carril  $U_1$ , de luminancia en la calzada no podrá ser inferior a 60%.

Cuando se utilicen luminarias con fuentes lumínicas LED, podrá disminuirse el valor de la luminancia en la zona interior en el mismo porcentaje en que se mejore la uniformidad general, hasta un límite de 25%.

Cualquier objeto situado en el interior de un túnel tiene una luminancia muy baja comparada con la de otros objetos que ocupan el campo visual (el cielo, las montañas, la ruta, etc.), pero similar a la de la entrada. Esto hace que al estar cerca, y por tanto ver grande la entrada, se puedan diferenciar; pero que estando lejos, y ver la entrada pequeña, sea imposible distinguirlos.

#### 3.6.1.4. Alumbrado en la zona de salida

El problema que se plantea en la salida del túnel no es de adaptación a los niveles exteriores; el pasar de una luminancia interior baja a una exterior elevada no plantea problemas de adaptación para el ojo, debido a que la adaptación de un nivel inferior de luminancia a otro superior es más fácil y bastante más rápida que la inversa.

El problema es la entrada de luz diurna por brocal de salida. Se debe reforzar ligeramente la iluminación para que la salida al exterior no sea muy brusca, iluminando directamente los vehículos de manera que los más pequeños resulten visibles, no apareciendo ocultos detrás de los vehículos grandes, debido al deslumbramiento de la luz diurna entrante.

Si el túnel es bidireccional, el efecto anterior no se aplica y los dos brocales se convierten en entrada.

En los túneles largos unidireccionales, la luminancia en la zona de salida  $L_{\text{ex}}$  deberá aumentar linealmente a lo largo de una distancia como mínimo igual a la distancia de parada, a partir de la zona del interior ( $L_{\text{ex}} = L_{\text{in}}$ ) hasta un nivel 5 veces superior al de la zona del interior ( $L_{\text{ex}} = 5 L_{\text{in}}$ ) de 20 m a 60 m antes de llegar a la boca de salida del túnel y se estabiliza en ese valor hasta la salida.

#### 3.6.1.5. Alumbrado nocturno

Durante la noche se deberá iluminar todo el interior del túnel con un valor mínimo igual al de la zona interior, salvo algunas excepciones que se indican a continuación:

- Si el túnel está en una ruta iluminada, se recomienda dotar al túnel con un nivel entre 1,5 y 2 veces el correspondiente a la iluminación nocturna exterior.
- Si la ruta no está iluminada, se recomienda iluminar la zona exterior inmediata a la salida del túnel en una longitud igual a 2 veces la distancia de parada, con un mínimo de 200 m, y un nivel mínimo igual a la iluminación diurna de la zona interior.

La uniformidad general  $U_o$  de luminancia en la calzada no podrá ser inferior a 40 % y la uniformidad longitudinal de cada carril  $U_1$  de luminancia en la calzada no podrá ser inferior a 60 %.

### 3.6.1.6. Deslumbramiento

El deslumbramiento reduce la visibilidad. La instalación de alumbrado debe limitar el deslumbramiento producido por la(s) fuente(s) de luz sobre el ojo del conductor. Este deslumbramiento se manifiesta como una iluminación directa al ojo en una línea divergente respecto al eje de visión del conductor. Esta iluminación al ojo genera un velo que perturba la visión, ya sea en el momento que se produce como después en la adaptación.

Existe un concepto denominado incremento de umbral, que en porcentaje mide lo que habría que elevar el nivel de luminancia para contrarrestar el efecto de deslumbramiento directo producido por los aparatos de alumbrado.

Por lo tanto, es extremadamente importante minimizarlo en el alumbrado de túneles. El deslumbramiento perturbador, definido como el incremento de umbral de contraste (TI) necesario para ver un obstáculo cuando hay deslumbramiento, queda dado conforme las siguientes expresiones:

$$TI = 65(L_{velo}/L_{prom}^{0,8}) \text{ en } \% \text{ para } 0,05 \leq L_m \leq 5 \text{ cd/m}^2$$

$$TI = 95(L_{velo}/L_{prom}^{1,05}) \text{ en } \% \text{ para } L_m > 5 \text{ cd/m}^2$$

donde:

$TI$  : Incremento de umbral correspondiente al deslumbramiento perturbador.

$L_{velo}$  : Luminancia de velo total en  $\text{cd/m}^2$ .

$L_{prom}$  : Luminancia media de la calzada más el producido por la paredes del túnel en  $\text{cd/m}^2$ .

El incremento de umbral durante el día debe ser menor de 15 % para la zona umbral, de transición y zona interior, y para todas las zonas durante la noche. Para la zona de salida durante el día no existe limitación en el deslumbramiento perturbador.

### 3.6.2. Recomendaciones Internacionales

#### 3.6.2.1. CIE 2004

La última recomendación de la CIE para la iluminación de túneles se publicó en 2004 y se denomina “Guía para la iluminación de túneles de carreteras y pasos subterráneos” (CIE, 2004).

##### Zona de acceso

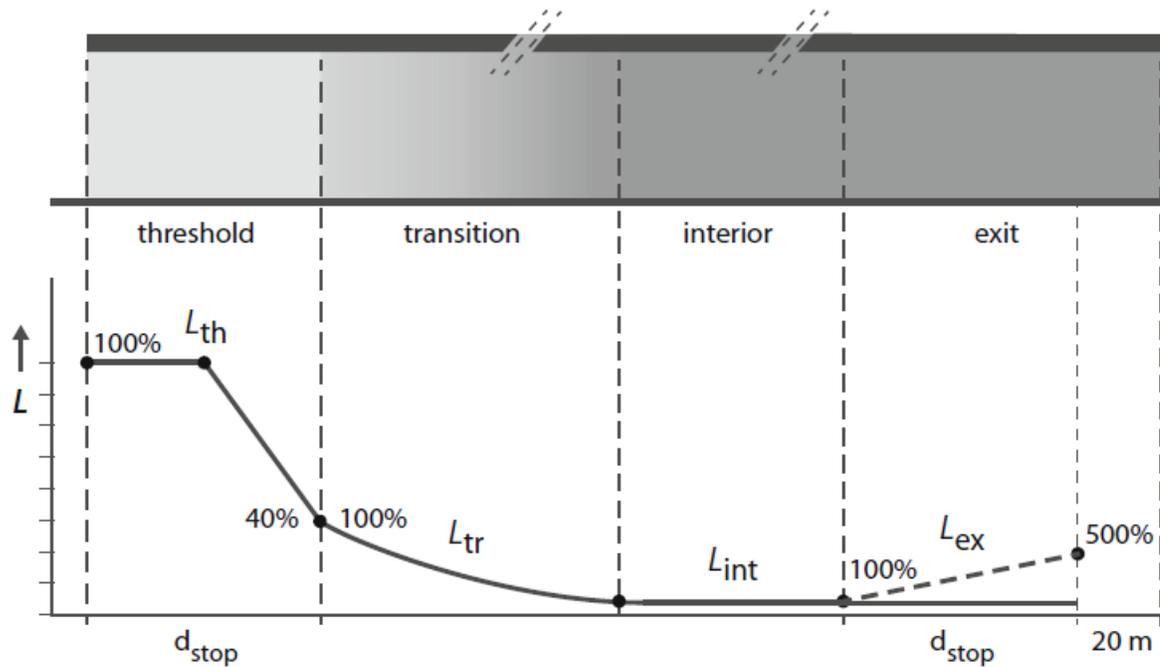
Para el nivel de iluminación más alto que se instalará en la zona umbral, la CIE propone el uso de la luz diurna que se produzca durante al menos 75 h / año como base. Para determinar la iluminación en la zona umbral para esa situación, CIE prescribe el “método de contraste percibido”, que es el método descrito en la sección 20.2.6 como el “concepto de luminancia de velo”. Las luminancias de velo debidas a la dispersión en el ojo de la luz del entorno del brillante túnel, debido a la dispersión en la atmósfera, y debido a la dispersión en el parabrisas juntas determinan la iluminación requerida en la zona umbral. La fórmula para calcular este valor de luminancia de zona umbral requerido a partir de estos parámetros ya se ha dado en la sección 20.2.6 bajo el encabezado “concepto de luminancia de velo”. En esta fórmula, el valor recomendado de CIE para el contraste percibido mínimo requerido,  $C_{perc}$ , se toma como 0.28 con un valor de reflectancia del objeto ( $\rho$ ) de 0.20. De nuevo según CIE, el coeficiente que revela el contraste ( $qc$ ) es 0.2 para sistemas simétricos y 0.6 para sistemas de contraflujo.

##### Zona umbral

La longitud requerida de la zona umbral es igual a la distancia de parada segura. En la primera mitad de esta distancia, la luminancia debe ser constante, pero a partir de la mitad de la distancia de parada en adelante, el nivel de iluminación puede disminuir linealmente a un valor, al final de la zona umbral, del 40 % del valor al comienzo de la zona umbral (fig. 3.22). Tenga en cuenta que los gráficos de nivel de iluminación a menudo se dan en una escala logarítmica donde la línea lineal de la escala lineal parece curvada. La disminución gradual puede ser, en el caso de un sistema de iluminación con el cual no se puede realizar una atenuación continua, en pasos, siempre que los niveles de luminancia no caigan por debajo de los valores correspondientes a la disminución lineal gradual.

##### Zona de transición

La reducción de la luminancia en la zona de transición sigue la curva dada en la Fig. 3.10. El punto del 100 % de esta curva coincide con el punto del 40 % al final de la zona umbral (Fig. 3.22). En el caso de un sistema de iluminación con el cual la atenuación continua no es factible, la curva suave puede reemplazarse por una escalonada con niveles que nunca caen por debajo de la curva. La diferencia máxima entre cada paso debe ser menor que un factor de 3, mientras que el último paso debe ser menor que el doble de la luminancia de la zona interior.



**Figura 3.22:** Según CIE (2004), la luminancia en la zona umbral puede disminuir linealmente desde la mitad de la distancia de parada hasta el 40 %. Este punto del 40 % es, posteriormente, el inicio del punto del 100 % de la curva de transición.

Fuente: Van Bommel, (2014).

### Zona interior

El nivel de iluminación requerido en la zona interior depende de la distancia de detención (y, por lo tanto, de la velocidad de conducción para la cual está diseñado el túnel) y del flujo de tráfico. Para túneles de alta velocidad (distancia de parada de 160 m) y flujo de tráfico pesado, el nivel de iluminación requerido es de  $10 \text{ cd} / \text{m}^2$ , mientras que para túneles de baja velocidad (distancia de parada de 60 m) y flujo de tráfico bajo, es de  $3 \text{ cd} / \text{m}^2$ . Para túneles muy largos (más largos que una distancia recorrida en 30 s, por ejemplo, para  $100 \text{ km} / \text{h}$ , unos 850 m, el nivel de iluminación puede, después de esta distancia, reducirse a 4,5 y  $1 \text{ cd} / \text{m}^2$  respectivamente.

### Zona de salida

Normalmente, el nivel de iluminación requerido en la zona de salida es el mismo que en la zona interior adyacente. En situaciones donde se esperan peligros adicionales cerca de la salida del túnel, y en túneles muy largos, la luminancia en la zona de salida debe aumentar linealmente en una distancia igual a la distancia de detención a un nivel cinco veces mayor que la de la zona interior adyacente a una distancia de 20 m del portal de salida (línea discontinua en la Fig. 3.22).

### Uniformidad y restricción al deslumbramiento

Los valores requeridos para la uniformidad general y longitudinal,  $U_o$  y  $U_l$  respectivamente, son los mismos que los requeridos por CIE para carreteras abiertas durante la noche, es decir. 0.4 y 0.6 respectivamente.

En lo que respecta al deslumbramiento, CIE requiere que el valor de incremento de umbral sea inferior al 15 % en todas las zonas del túnel, tanto durante el día como por la noche.

#### 3.6.2.2. Estándar Norteamericano

El Estándar estadounidense de iluminación de túneles se estableció en 2011 en el Documento RP-22-11 de ANSI / IES (American National Standards Institute y Illuminating Society of North America respectivamente) (ANSI/IES, 2014).

#### Zona umbral

El informe proporciona un método para una estimación preliminar de la iluminación de la zona umbral y uno más avanzado para la determinación final de la zona umbral. El método preliminar se basa en un conjunto de ocho bocetos de diferentes escenas de túneles, adaptado de CIE (CIE 1990). Los niveles de iluminación de la zona umbral se dan para cada una de las ocho escenas de túnel según la velocidad del tráfico. Al comparar una escena de túnel real con los ocho bocetos, el boceto más similar da así una primera estimación del nivel de iluminación de la zona de umbral requerido.

El método más avanzado que se debe utilizar para la determinación final de la zona umbral se basa en la determinación de la luminancia del velo,  $L_v$ , debido a la dispersión en el ojo de la luz del entorno del túnel brillante (consulte la Sección 20.2.6 en “Concepto de luminancia de velo”). La iluminación de zona umbral requerida para el valor  $L_v$  resultante se basa en un método descrito en un anexo de la anterior Recomendación CIE para iluminación de túneles (CIE 1990). La relación resultante está en el estándar ANSI / IES dado como:

$$\frac{L_{th}}{L_v} = 1.41$$

No se hace ninguna diferencia para los diferentes sistemas de iluminación (simétricos y anti simétricos). El método  $L_v$  utilizado por ANSI / IES no tiene en cuenta el efecto de la dispersión atmosférica y del parabrisas como se describe en la sección. 20.2.6 bajo el concepto de luminancia de velo también se utiliza en las últimas recomendaciones de CIE (CIE, 2004). Sin embargo, el Estándar ANSI / IES describe este último método CIE en su anexo B. Este anexo concluye con:

*Hay mucha discusión sobre la cantidad de contraste (aparente) requerido y los factores de transmisión para la atmósfera y el parabrisas. Los expertos en iluminación de túneles ahora están tratando de determinar los mejores valores para estas variables y, una vez establecidos, ayudarán a cuantificar mejor la cantidad necesaria de iluminación para los túneles.*

Mientras tanto, los valores utilizados en CIE 2004 se han confirmado en la práctica de iluminación de túneles.

Al igual que en la recomendación CIE, el nivel de iluminación en la primera mitad de la zona umbral debe ser constante, pero en la segunda mitad, el nivel de iluminación puede reducirse linealmente al 40 % al final de la zona umbral.

### **Zona de transición**

Exactamente como en la recomendación CIE, la reducción de la luminancia en la zona de transición sigue la curva dada en la Figura 3.10. El punto del 100 % de esta curva, nuevamente como en CIE, coincide con el punto del 40 % al final de la zona umbral. La reducción se puede hacer en escalones, siempre que los valores de los pasos nunca caigan por debajo de los de la curva. Las longitudes de paso no deben ser inferiores a las correspondientes al tiempo de conducción de 2 s.

### **Zona interior**

El nivel de iluminación requerido en la zona interior depende de la velocidad y el flujo del tráfico: nuevamente, es similar a la Recomendación CIE. Los valores varían desde 10 cd / m<sup>2</sup> para velocidades altas y flujo de tráfico intenso hasta 3 cd / m<sup>2</sup> para velocidades bajas y flujo de tráfico ligero es el mismo rango que en CIE.

### **Zona de salida**

No se especifican requisitos especiales en el estándar americano para la salida del túnel.

### **Uniformidad y restricción al deslumbramiento**

La uniformidad de luminancia para la superficie de la carretera y las paredes se especifica en términos de luminancia promedia-mínima (el recíproco de la uniformidad global de CIE) como mayor que 2: 1, y para la luminancia máxima sobre mínima como mayor que 3,5: 1. Contrariamente a CIE, este último no usa los valores máximo y mínimo en una línea longitudinal, sino los valores de luminancia máxima y mínima absolutos donde quiera que ocurran. El requisito de restricción de deslumbramiento se da en términos de la relación de luminancia de velo,  $L_v / L_{av}$ , como también la utiliza ANSI / IESNA para carreteras abiertas durante la noche, el valor debe ser inferior a 0,3.

## 3.7. Propuesta de evaluación del sistema de iluminación

### 3.7.1. Parámetros a evaluar

Se propone evaluar el sistema de iluminación en túneles interurbanos mediante niveles de servicio, usando las características y parámetros recomendadas en normativas nacionales e internacionales, las que se muestran a continuación en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6:** Parámetros técnicos a evaluar.

Característica	Parámetro técnico a evaluar	Valor en juego
Nivel de iluminación	Luminancia media $L_{av}$	Seguridad
Uniformidad global	Uniformidad global $U_o$	Seguridad
Uniformidad longitudinal	Uniformidad longitudinal $U_l$	Comodidad

### 3.7.2. Zona a evaluar parámetros luminotécnicos

La medición se realizará de forma continua en todos los tramos homogéneos, con una medición de la grilla normativa utilizada para el cálculo fotométrico. A fin de tener una imagen global del desempeño del sistema de iluminación, se medirá grilla por grilla los parámetros normativos de luminancia en todas las zonas homogéneas consideradas en la memoria de cálculo fotométrica. Lo anterior permitirá identificar aquellos tramos donde se presenten valores inadecuados de los parámetros de iluminación evaluados. En la figura 3.23 se muestran las diversas configuraciones de grillas de acuerdo a la geometría de la instalación.

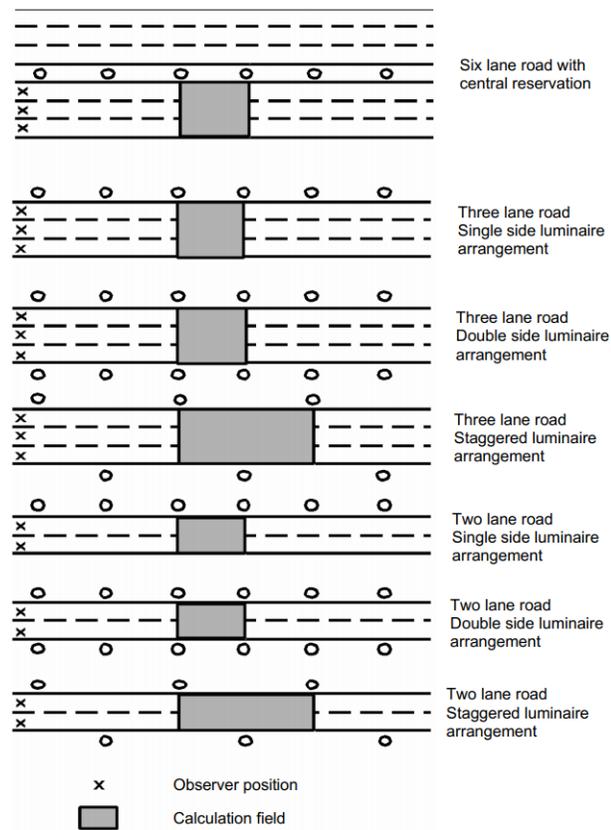
Ademas de la configuración espacial de la medición se evaluara cada zona del túnel, es decir se tendrá un total de 4 mediciones correspondientes a las zonas umbral, transición, interior y salida.

### 3.7.3. Escalas de valores de los parámetros

En base a la revisión de las principales recomendaciones y estándares internacionales, se adoptarán los valores establecidos en el capítulo 6.700 del Manual de Carreteras, que están ampliamente basados en las recomendaciones de la CIE y, en algunos casos, exceden sus requerimientos.

#### 3.7.3.1. Luminancia media y uniformidad global

Debido a que se permite una disminución en el nivel de iluminación si se aumenta la uniformidad, hasta un límite de un 25 % en las zonas destinadas al tránsito motorizado, los parámetros de luminancia media  $L_{av}$  y uniformidad global  $U_o$  se evaluarán de forma conjunta para considerar el efecto de ambos parámetros sobre el rendimiento visual.



**Figura 3.23:** Área de medición y posiciones del observador para distintas configuraciones de la instalación (en inglés).

Fuente: (CIE, 2000)

Se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- El uso de nuevas tecnologías permiten aumentar en gran medida los niveles de uniformidad.
- Se permite una disminución en el nivel de iluminación si se aumenta la uniformidad en la misma medida, hasta un límite de un 20 % en la zona umbral y un 25 % en el resto de la zonas del túnel.
- En ningún caso los valores de luminancia media disminuidos en función del punto anterior pueden quedar por debajo de la curva de adaptación presentada en la figura 3.10.
- Niveles por debajo de los mínimos calificarán como “Pobre” y “Muy Pobre”, salvo para el nivel de luminancia media en los casos en que se cumpla con las condiciones de uniformidad global que permitan su reducción.

**Tabla 3.7:** Escala de evaluación conjunta para  $L_{av}$  y  $U_o$ 

Rango del Indicador	Lav/ $U_o$	Rango del Indicador Uniformidad Global [-]				
		$\geq U_o + 0.2$	$[U_o + 0.2, U_o + 0.1]$	$[U_o + 0.1, U_o]$	$[U_o, U_o - 0.1]$	$< U_o - 0.1$
Luminancia Media [cd/m <sup>2</sup> ]	$> 0.8 L_{av}$	MUY MALO				
	$[0.8 L_{av}, 0.9 L_{av}]$	JUSTO	MALO	MUY MALO	MUY MALO	MUY MALO
	$[0.9 L_{av}, L_{av}]$	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO	MUY MALO
	$[L_{av}, 1.2 L_{av}]$	MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO

### 3.7.3.2. Uniformidad longitudinal

Considerando que  $U_l$  en la tabla 3.8 es el valor mínimo dado en el Manual de Carreteras, se propone la siguiente escala de evaluación:

**Tabla 3.8:** Escala de evaluación para  $U_l$ 

Niveles de desempeño				
Muy bueno	Bueno	Justo	Malo	Muy Malo
Rango Uniformidad Longitudinal [-]				
$> U_l + 0.1$	$[U_l + 0.1, U_l + 0.05]$	$[U_l + 0.05, U_l]$	$[U_l, U_l - 0.1]$	$< U_l - 0.1$

### 3.7.4. Procedimiento de medición

#### 3.7.4.1. General

Se medirán los parámetros escogidos es decir luminancia media, uniformidad general y longitudinal, para cada una de las zonas del túnel y para cada escenario de diseño; Diurno Alto, Diurno Bajo, Crepúsculo, Nocturno, etc.

#### 3.7.4.2. Condiciones de medición

- Las luminarias requieren un periodo de tiempo para que sus flujos luminosos se estabilicen y se deben hacer todas las mediciones después de este periodo de estabilización. Se da una guía sobre el periodo de estabilización para diferentes tipologías de lámpara en la Norma EN 13032-1. El reporte de la IES (Photometric Measurement of Roadway and Street Lighting Installations), propone que, en ausencia de información, se utilice un tiempo de dos horas para luminarias iluminación de estado sólido (LED) y al menos una hora para lámparas de descarga.
- La medición debe realizarse con el sistema en régimen normal de funcionamiento, es decir se excluyen las situaciones de emergencia.
- Las mediciones de luminancia se deben realizar sólo cuando la superficie del pavimento esté seca.
- Cualquier sombra o interferencia procedente de sistemas de medición u operadores se debe reducir al mínimo posible.

### 3.7.4.3. Selección de la grilla de medición

La posición nominal de los puntos de la grilla en la cual se toman las mediciones, así como las posiciones nominales del observador deben ser las indicadas en el Anexo 6.700A del Manual de Carreteras, basado en CIE140-2000: “Road Lighting Calculations”.

Algunos puntos de la grilla pueden estar situados en la sombra de un objeto o en una mancha de aceite, etc. en tales casos, se recomienda no considerar estos puntos en la determinación de la luminancia media y de los valores de uniformidad, y registrar estos puntos en el informe de ensayo.

### 3.7.4.4. Equipo de medición

La medición se realizará con un ILMD (Imaging Luminance Meter Device, dispositivo de medición de luminancia de imagen). Actualmente se encuentra pendiente de publicación el reporte CIE TC2-59 “Characterization of imaging luminance measurement devices”. En ausencia de una guía para la caracterización de estos dispositivos, se considerarán los siguientes parámetros de acuerdo a dispositivos encontrados en el mercado:

- Ajuste espectral a la función  $V(\lambda)$  clase A o B según DIN-5032.
- Resolución mínima de 1360x1024 píxeles
- Rango de medición de Luminancia: 0.001 20.000 kcd/m<sup>2</sup>
- Precisión: + 5 %
- Repetibilidad: +1 %
- Debe poseer sistema de control de temperatura.

La luminancia para cada punto de la grilla se determinará promediando las lecturas de píxeles adyacentes, de forma que las condiciones del ángulo subtendido de las superficies cumplan con los siguientes requisitos:

- El ángulo subtendido de la superficie de la carretera media no debe ser mayor de 2 min de arco en el plano vertical y no mayor de 20 min de arco en el plano horizontal.
- El ángulo subtendido mínimo no debe ser menor de 1 min de arco.

#### 3.7.4.5. Informe de medición

El informe de medición debe incluir al menos:

- Los detalles de los instrumentos usados, sus números para una identificación sin ambigüedades y sus condiciones de calibración (fecha, validez y trazabilidad metrológica).
- Los detalles sobre el clima, y las condiciones medioambientales en el momento de la medición, esto con el fin de tener claridad sobre el escenario medido.
- Los parámetros medidos en cada zona del túnel.
- La razón, justificación y consecuencias de la selección de zonas de la instalación, si esta no es medida en su longitud total.
- Documento que presente un resumen comparativo de los parámetros medidos, de los respectivos valores entregados por los cálculos del proyecto y los valores esperados por diseño.

#### 3.7.4.6. Validación del equipo de medición

El equipo de medición debe ser validado por una entidad competente, con mediciones en terreno y se deben contrastar los resultados obtenidos con los resultados que se obtienen con una medición punto por punto con un luminómetro convencional. Las condiciones ambientales para ambas mediciones deben ser las mismas. En caso de encontrarse discrepancias significativas, se evaluará utilizar el ILDM como sistema de medición de referencial, en este caso, en base a los resultados reportados, el inspector fiscal podrá solicitar que se realicen mediciones con un método estándar para constatar el cumplimiento o incumplimiento de las exigencias, en las zonas que estime conveniente.

### 3.7.5. Propuesta de evaluación global de indicadores del sistema de iluminación

En túneles urbanos e interurbanos la iluminación artificial es permanente y se encuentra a lo largo de todo el túnel, sin embargo la iluminación se divide en zonas y cada zona posee características de luminancia distintas que deben respetarse para una correcta adaptación del conductor. Para calcular la nota global se propone realizar una medición en cada zona, posteriormente las mediciones se contrastarán en la escala de valores para obtener una nota asociada a cada zona. La evaluación total de iluminación del túnel corresponderá a la nota de la zona más deficiente.

### 3.8. Conclusiones

- Se adoptan como parámetros representativos del sistema de iluminación las exigencias de luminancia media, uniformidad global y uniformidad longitudinal.
- Se medirá cada zona del túnel, es decir se tendrá un total de cuatro mediciones correspondientes a las zonas umbral, transición, interior y salida.
- Se propone un nuevo instrumento de medición con características y propiedades especificadas, que agiliza el proceso de evaluación del sistema de iluminación.
- El procedimiento de medición utilizado corresponde al descrito en el Manual de Carreteras Volumen 6.



# SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

## 4.1. Introducción

Un evento de incendio está conformado por múltiples variables que deben ser coordinadas para lograr un buen resultado es decir mantener en todo momento el control del incendio y del humo para la correcta evacuación y seguridad del usuario, estas variables pueden ser clasificadas implícitamente por dos aspectos, pasivos y activos.

Los aspectos pasivos están relacionados con el proyecto y la construcción de nuevos túneles o la renovación de los existentes. El mantenimiento del conjunto del sistema debe asegurar su adecuado funcionamiento.

Los aspectos activos incluyen todas las actividades de explotación y funcionamiento en los que el término “control” debe ser entendido y aplicado en su intrínseco y verdadero significado, donde, el establecimiento de procedimientos operativos y la formación del personal de explotación es de máxima importancia.

De esta manera una correcta consideración de los aspectos pasivos tendrá como resultado un equipamiento dimensionado acorde a los requisitos característicos del incendio, estos son potencia, emisiones de humos, temperatura y evolución temporal del incendio. Por otro lado, aspectos activos bien ejecutados completaran el éxito en la extinción del incendio.

El informe de protección contra incendios consta de cuatro partes, primeramente, se hace una caracterización de los incendios y las principales variables que los constituyen, posteriormente se

exponen las fases de desarrollo de un incendio y los tiempos asociados a cada fase, luego se analizan las características de explotación en donde se exponen los principales actores en operación, para luego hacer una revisión de la normativa nacional e internacional respecto del tema. Finalmente se hace una propuesta basada en la información precedente para evaluación del sistema de protección contra incendios en túneles.

## 4.2. Estado de la práctica

Actualmente el sistema de protección contra incendios se ejecuta de manera que incluye solo acciones pasivas, es decir, se busca estar lo mas equipado posible para la correcta detección y control del incendio. Un ejemplo, es la concesión de la ruta 68 la cual considera en las bases de licitación la explotación de túneles nuevos Lo Prado 2 y Zapata 2. Frente a un evento de incendio se debe disponer de un sistema que permita detectar rápidamente el incendio y facilite los medios para su extinción, además se establece lo siguiente:

La detección de incendios dentro del túnel se realizará a través de:

- Incremento de humos con superación del límite de opacidad de 0,012m-1
- Incremento del nivel de monóxido de carbono en valores superiores a 250 ppm.
- Utilización de un extintor.
- Aviso desde un teléfono de emergencia.
- Detección, por el sistema de aforos e incidencias, de un vehículo parado.
- Supervisión a través del circuito cerrado de televisión.
- Detección de un incremento de la temperatura por medio de un sistema de detección lineal de incendios.

La Sociedad Concesionaria deberá disponer como mínimo del siguiente equipamiento de Control de Incendios, en cada uno de los túneles:

- Bolsas “Air Bag” para aislamiento de zonas del Túnel, una unidad en cada acceso.
- Equipos de respiración autónoma, de una capacidad mínima de 30 minutos, ocho en cada acceso.
- Carros con extintores de fuego, de un mínimo de 90 kg, tres unidades en cada acceso, con las siguientes características: dos unidades de Polvo ABC al 90 % con válvula de salida de  $\frac{3}{4}$  pulgada, una unidad Light water AB con válvula de salida de  $\frac{3}{4}$  pulgada.
- Carros porta mangueras, una unidad en cada acceso con tres mangueras con protección externa de caucho de 30 m. Dos mangueras de ataque de 1  $\frac{1}{2}$  pulgadas y una de avance de tres pulgadas y gemelo de 3 x 1  $\frac{1}{2}$  x 1  $\frac{1}{2}$  pulgadas.

- Trajes asbesto aluminizado tipo MCA o equivalente, completos, al menos una unidad en cada acceso.

Existen otras concesiones más modernas (relicitación túnel El Melón) donde se aborda el problema desde el punto de vista de la gestión y el equipamiento, se profundizará este punto más adelante, incluyendo dichas bases de licitación.

### 4.3. Características de un incendio en túneles

Las características del incendio producido dentro del túnel dependen en gran medida de los vehículos implicados en el mismo, sistema de ventilación, geometría y los sistemas de extinción de incendios. Los materiales con los que han sido fabricados o que son transportados influyen de forma decisiva. Sin embargo, para poder definir las características del incendio es posible emplear diversas magnitudes que lo cuantifiquen de forma global (energía total disipada) o temporal (potencia calorífica, temperatura). Aunque todas las magnitudes están relacionadas, la evolución de la temperatura frente al tiempo se emplea para evaluar la resistencia de la estructura ante el incendio y la evolución de la potencia o las concentraciones de contaminantes influyen en las pautas de evacuación o actuación para salvaguardar a los usuarios del túnel.

#### 4.3.1. Potencia

La potencia máxima es el principal parámetro para calcular la capacidad del sistema de ventilación y motivo de preocupación para la seguridad de los bomberos durante la fase de extinción del incendio. Para diseño estructural y la clasificación de la resistencia al fuego del equipamiento del túnel se usa el concepto “temperatura en función del tiempo” en lugar de potencia de incendio (PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera, 2017). El incendio de proyecto se caracteriza fundamentalmente por la potencia calorífica liberada (dada habitualmente en MW).

La tabla 4.1 resume los rangos aceptados normalmente para la máxima potencia de incendio de diferentes tipos de vehículos.

**Tabla 4.1:** Máxima potencia de incendio de diferentes vehículos (PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera, 2017)

Tipo de vehículo	Potencia de incendio (MW)
Vehículo de pasajeros	5 - 10
Vehículo ligero de carga	15
Autobús	20
Camión hasta 25 toneladas	30 - 50
Camión entre 25 y 50 toneladas	70 - 150
Camión Cisterna	200 - 300

A pesar de ser una característica fundamental del incendio, la potencia por sí sola no define el resultado final del incendio. Por otro lado, el incendio de proyecto en un túnel de carretera normalmente se basa en el supuesto de desarrollo en un único vehículo. Sin embargo, algunos de los incendios más importantes que han sucedido se deben a colisiones que involucran vehículos con una cantidad considerable de combustible y que a menudo es el resultado de la propagación del incendio a otros vehículos cercanos.

### 4.3.2. Emisión de humo

Otro parámetro empleado para el dimensionamiento de la ventilación es el caudal de humos ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) producido durante el mismo. Así los humos producidos en los incendios en túneles dependen del tipo de vehículos y mercancías siniestradas (PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera, 2017). La tabla 4.2 muestra los valores de caudal de humo producidos en un incendio para distintos tipos de vehículos.

**Tabla 4.2:** Valores de caudal de humo producido en un incendio para distintos tipos de vehículos (PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera, 2017)

Tipo de vehículo	Caudal de humos ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) según diferentes fuentes.			
	AIPCR (1984)	RABT (Alemania 1994)	CETU (Francia 1997)	NPFA (USA 1998)
Vehículo ligero	20	20 - 40	20	20
Autobús	60	60 - 90	80	60
Camión	-	-	50 - 80	-
Camión Cisterna	100 - 200	150 - 300	300	100 - 120

### 4.3.3. Temperatura

Al igual que ocurría con la potencia calorífica máxima producida en el foco del incendio, la temperatura máxima que se puede obtener depende en gran medida de las condiciones de ventilación y la geometría del túnel. A modo de orientación la tabla 4.3 muestra diferentes valores de temperatura máxima, asociados a ensayos de distintos tipos de vehículos.

Para diseño estructural y la clasificación de la resistencia al fuego del equipamiento del túnel se usa el concepto “temperatura en función del tiempo” en lugar de potencia de incendio.

**Tabla 4.3:** Valores de la temperatura máxima alcanzada en un incendio para distintos tipos de vehículos. (PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera, 2017)

Tipo de vehículo	Temperaturas máximas (°)
Vehículo ligero	400
Autobús	700
Camión	1000
Camión Cisterna	1200

#### 4.3.4. Evolución temporal del incendio

La evolución del incendio a lo largo del tiempo es más importante que los niveles máximos que pueden darse en el foco, ya que los tiempos transcurridos desde el inicio del mismo determinan la posibilidad de salvamento de los usuarios involucrados en el incidente.

En Europa se han realizado diversos ensayos a escala real en túneles, estos son, proyecto EUREKA 499, Benelux, Runehamar, Memorial túnel y las pruebas de extinción de incendio RWS en Runehamar. Al igual que en cualquier prueba a escala real hay pocas oportunidades de repetir escenarios idénticos, desde la fuente de combustible, principalmente un vehículo, que es muy posible que sea difícilmente reproducible. Además, puesto que la pruebas se llevan a cabo en diferentes túneles, existen variaciones debidas a la sección transversal y a la ventilación del túnel, como también por la carga del incendio en sí. (PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera, 2017).

La tabla 4.4 proporciona una breve recopilación de la duración media del incendio y de la máxima potencia de este.

**Tabla 4.4:** Resumen de mediciones de ensayos, (PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera, 2017).

Proyecto	Fuente de combustible	$t_{inc}$ (min)	$t_g$ (min)	$t_s$ (min)	$t_d$ (min)	$t_T$ (min)	Máxima potencia del incendio (MW)
Eureka	Heptano	0	46	35	17	98	12 - 13
	Camionetas/Bus	3	5	48	41	97	6.1 - 28
Benelux	Camionetas	5	4	12	9	30	16 - 26
Eureka	Camión	8	4	30	15	57	130 - 320
Runehamar	Camión	3	7	30	13	53	69 - 201

Donde:

- $t_{inc}$  : Tiempo desde la ignición hasta que el incendio produce llama (zona de combustión lenta o inicio).
- $t_g$  : Tiempo desde el final de la zona de inicio hasta la máxima potencia de incendio (zona de crecimiento del incendio).
- $t_s$  : Duración de tiempo de la zona de régimen permanente.
- $t_d$  : Tiempo de descenso de la potencia de incendio (zona de descenso).
- $t_T$  : Duración total del incendio.

Los datos experimentales son generalmente la fuente más fiable de información. Sin embargo, muchos de ellos se han obtenido en túneles con una sección transversal pequeña, lo que conduce a una mayor velocidad de ventilación y a una mayor radiación reflejada por las paredes del túnel si se compara con la sección media de túneles viales. Estos datos tienden a mostrar elevadas potencias, con crecimientos muy rápidos, que deberían evaluarse en el contexto de una sección transversal mayor. A pesar de esto los ensayos en general, muestran una serie de fases en su comportamiento. Inicialmente, después de la ignición el incendio se desarrolla sin llama. Después de esta “incubación” o “combustión sin llama” el incendio se extiende y crece rápidamente. Este período se conoce como fase de “crecimiento del incendio”. A continuación, se alcanza una fase constante con la máxima potencia del incendio, al final de la cual la intensidad del incendio comienza a decaer y finalmente se extingue. Esta similitud en el comportamiento de los resultados experimentales sugiere una curva “idealizada” la cual se presenta en la figura 4.1.

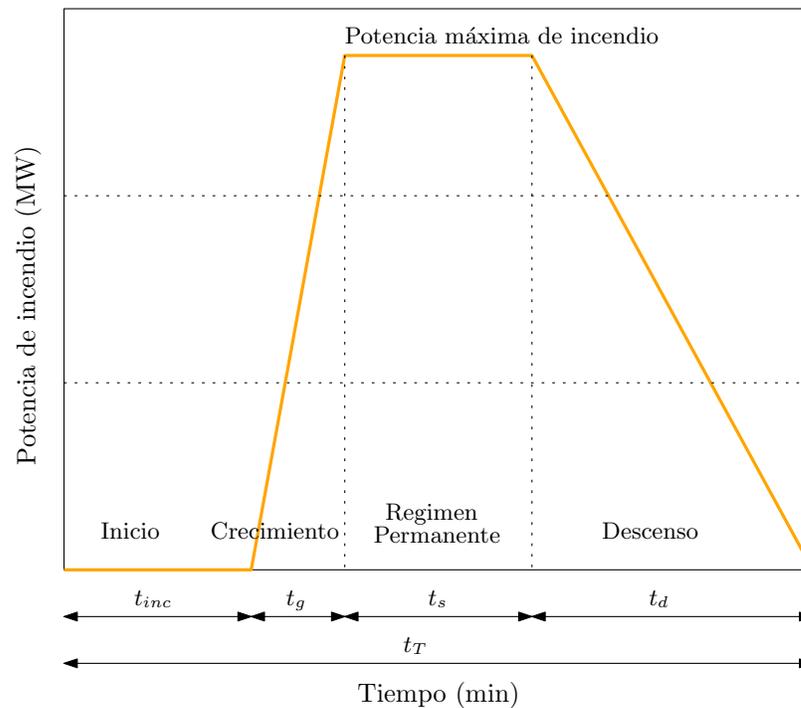
## 4.4. Fases de desarrollo de un incendio

A diferencia del modo normal de operación en un incendio las condiciones del túnel evolucionan rápidamente, dando lugar a escenarios de riesgo para el usuario, que dependen de la capacidad de respuesta del sistema de emergencia, por este motivo es necesario identificar y caracterizar previamente las fases de desarrollo de un incendio tipo.

La figura 4.2 muestra el desarrollo de un incendio caracterizado por eventos puntuales que dan lugar a fases definidas y acontecimientos. Posterior a la fase de ignición o inicio del fuego se deben proporcionar las condiciones necesarias para la auto evacuación y posteriormente, una vez que lleguen los servicios de emergencia facilitar la evacuación asistida.

Los tiempos hacen referencia a:

- $t_0$ : Inicio del fuego, acontecimiento “a”.
- $t_{0+}$ : Inicio del autorescate. El desfase retraso con relación a  $t_0$  depende de varias circunstancias tales como la conciencia y el tiempo de reacción del usuario, factor que variará entre individuos.



**Figura 4.1:** Curva de referencia de la potencia de un incendio.

Fuente: Comité técnico 3.3 Explotación de túneles de carretera PIARC, 2017.

- $t_1$ : Detección del fuego representado por el acontecimiento “b”. Puede detectarse por diversos medios tales como DAI (Detección automática de incidentes), sensores de calor, visualización por parte del operador, etc.
- $t_2$ : Confirmación del fuego representado por el acontecimiento “c” (puede coincidir prácticamente con  $t_1$ , en el caso de sistemas de detección automática del incendio). La confirmación del incidente da lugar a una alarma general de incendio y al desencadenamiento de la explotación de emergencia.
- $t_3$ : Ejecución completa de las condiciones de ventilación de emergencia (retraso debido al tiempo de arranque).
- $t_4$ : Llegada de los servicios de intervención, representado por el acontecimiento “d”.
- $t_5$ : Inicio del rescate asistido.
- $t_6$ : Inicio de la lucha contra el incendio por los servicios de intervención.
- $t_7$ : Final de la evacuación.
- $t_8$ : Final de la explotación de emergencia.

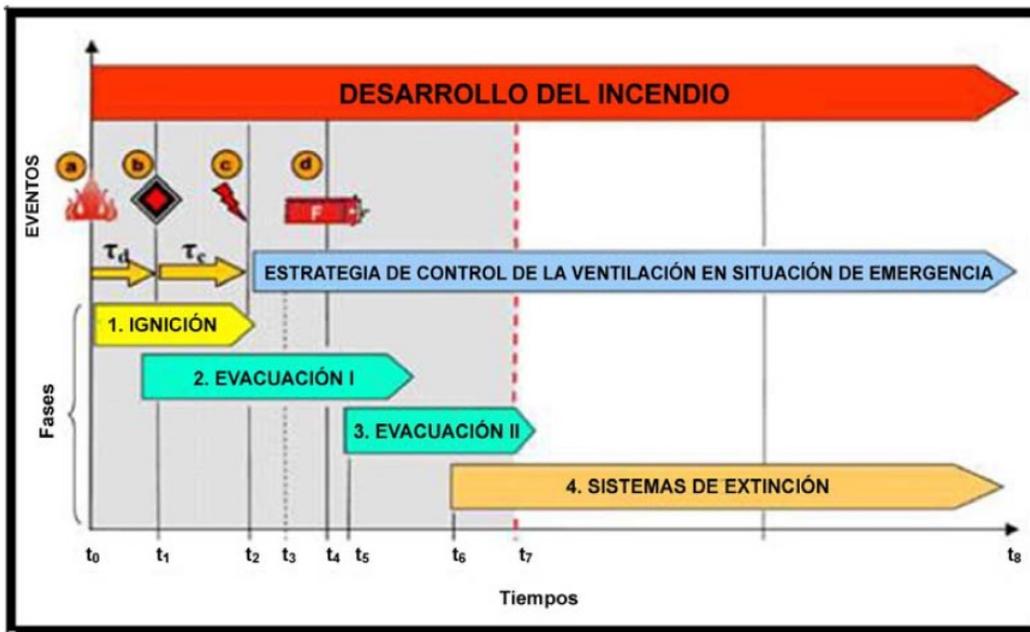


Figura 4.2: Fases típicas de un incidente de incendio y acontecimientos.

Fuente: Comité técnico 3.3 Explotación de túneles de carretera PIARC, 2011.

Las secuencias entre las fases del desarrollo del incendio y la de los acontecimientos pueden no ser coincidentes. Por ejemplo, los servicios de intervención pueden llegar al emplazamiento con anterioridad a haber realizado una completa ventilación de emergencia ( $t_3 > t_4$ ).

Estos tiempos determinan los siguientes periodos:

- $t_{0+} - t_0$ : Tiempo de reacción, tiempo transcurrido hasta que los usuarios empiezan a abandonar el túnel (inicio de la evacuación 1). Varía en función de cada usuario.
- $t_1 - t_0$  ( $T_d$ ): Tiempo de detección del incendio. El objetivo debe ser el de minimizar este valor.
- $t_2 - t_1$  ( $T_c$ ): Tiempo de evaluación y validación desde la detección del incidente hasta su confirmación. La confirmación da lugar al inicio de la estrategia de explotación de la ventilación en situación de emergencia. Uno de los objetivos principales es el minimizar este tiempo mediante el uso de sistemas de detección de incendios rápidos y altamente fiables.
- $t_3 - t_2$ : Tiempo de arranque y puesta en funcionamiento del sistema de ventilación. En  $t_3$  se alcanzan las condiciones de ventilación de emergencia adecuadas para la evacuación del túnel. Este tiempo debe ser minimizado.
- $t_7 - t_5$ : Fase de rescate asistido por los servicios de emergencia (Evacuación 2).
- $t_8 - t_7$ : Fase del incendio.

Como se puede apreciar el tiempo de respuesta de toda la cadena de operaciones, esto es, la detección, identificación, validación de la alarma de intervención, debe ser reducido para optimizar las condiciones durante la fase de evacuación. El resultado final se verá afectado por la capacidad de diseño, nivel de los equipos instalados y el tiempo de respuesta de los encargados de operación y explotación del túnel. (PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera, 2011).

#### 4.4.1. Tiempo de reacción de los usuarios

El tiempo empleado por cada usuario en evacuar el túnel, depende entre otras cosas de la información que tenga este frente a un evento de incendio, cada persona reacciona distinto al enfrentarse a situaciones de riesgo y es necesario dar instrucción del comportamiento adecuado a seguir, así como las medidas de seguridad que los usuarios deben adoptar para minimizar el riesgo y el tiempo de evacuación.

#### 4.4.2. Detección del incendio

El tiempo de detección del incendio depende en gran manera del equipamiento del túnel, en general un sistema de detección puede basarse en:

- Sensores de detección automática: Desarrollados específicamente para la detección de incendios y de humo. Emiten una señal de alarma en el momento que un incidente se produce (por ejemplo, detección de calor, información CCTV, detección de humo).
- Activados manualmente: Activan una alarma que se dispara de forma manual por parte del operador, según la información emitida por diversas fuentes, tales como CCTV (por ejemplo, incidente o humo), llamadas de los teléfonos de emergencia, señales provenientes del interior del túnel (botones de emergencia, retirada de un extintor, apertura de puertas, etc.) o informaciones procedentes de los sistemas de detección automática, que requieren la respuesta de un operador para su validación.
- Detección indirecta (automática): Este tipo de detección sería el resultado de una interpretación lógica y de un proceso de correlación de señales emitidas por diferentes fuentes (concentración de CO y/o partículas, velocidad del aire, velocidad del tráfico, etc.)

La detección de un incendio es de la máxima importancia, ya que si el incidente no se percibe a tiempo dará lugar a la pérdida de tiempo muy valioso. Ello implica que debe aceptarse un cierto número de falsas alarmas, aunque por otra parte si son excesivas podría ocasionar el cansancio del operador y hacer que éste las cancele sin prestarles atención. Por lo tanto, la fiabilidad del sistema de detección de incendios es muy importante.

### 4.4.3. Evaluación y confirmación del evento

Una vez detectado el incidente es necesaria la evaluación y puesta en marcha del plan de emergencia por parte de los operadores, es de suma importancia que exista la experiencia suficiente en el manejo de situaciones de incendios en túneles y que cada participante este capacitado y entienda claramente el rol que debe desempeñar.

## 4.5. Características de explotación

La ocurrencia de un incendio en un túnel provoca una necesidad de respuesta por parte de los usuarios del túnel, los operadores y los servicios de emergencia. Es necesario definir respuestas de cada uno de estos grupos y así determinar las mejores prácticas que deben adoptarse para garantizar un alto nivel de seguridad.

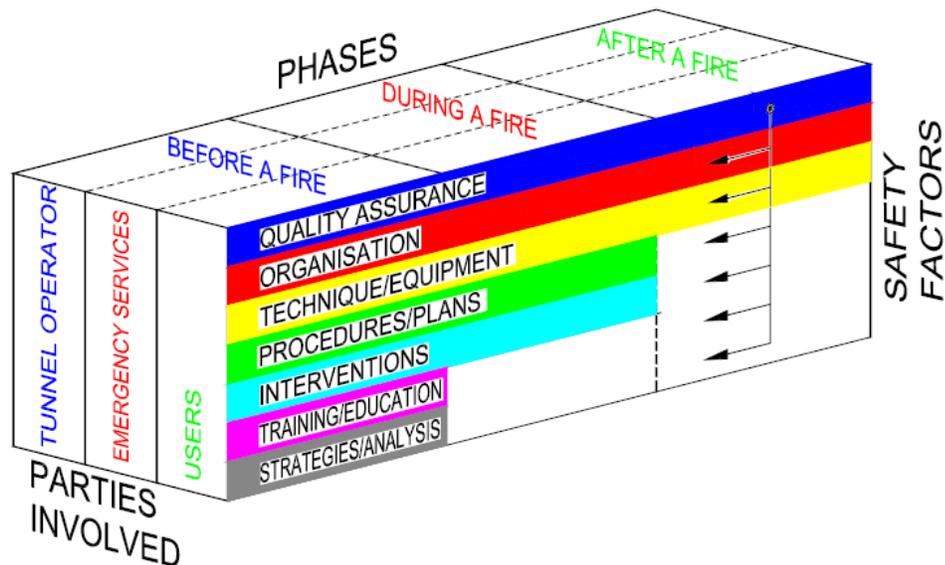
Los usuarios del túnel probablemente no estarán familiarizados con su entorno y con las características técnicas disponibles en el túnel. Puede existir la intención de tomar medidas con respecto al auto rescate antes de la llegada de los servicios de emergencia. Esto puede depender de su educación previa con respecto a la seguridad del túnel.

El operador del túnel entiende las posibilidades disponibles y debe tomar las medidas adecuadas para implementar los procedimientos, lo que minimizará el peligro para los usuarios. El operador llamará a los servicios de emergencia y generalmente seguirá un plan prescrito.

Los servicios de emergencia se enfrentan a una situación impredecible con respecto al incendio. Se requiere una comprensión de los detalles del túnel un conocimiento de las posibilidades operativas del túnel para tomar el control de la situación y comenzar la operación de rescate con la máxima seguridad. La complejidad de esta fase no puede ser subestimada, ya que existe la necesidad de interpretar la información posiblemente incompleta en una situación que puede cambiar rápidamente y además tratar con problemas de comportamiento humano.

El concepto de integración de las partes involucradas se presenta en forma de una matriz tridimensional, la Figura 4.3, muestra la complejidad de la seguridad del túnel y enfatiza las conexiones requeridas entre las diferentes partes para crear un procedimiento de seguridad de un alto nivel y equilibrio. La primera dimensión se compone de las partes involucradas en las diferentes fases, es decir, el operador del túnel (tunnel operator), los servicios de emergencia (emergency services) y los usuarios del túnel (users). La segunda dimensión cubre las fases conceptuales, a saber, antes de un incendio (before a fire), durante un incendio (during a fire) y después de un incendio (after a fire). La tercera dimensión se compone de los factores de seguridad para cada fase y cada parte involucrada, estos son, seguro de calidad (quality assurance), organización (organisation), equipo técnico (technique equipment), procedimientos/planes (procedures/plans), intervenciones (interventions), capacita-

ción/educación (training/education) y estrategias/análisis (strategies/analysis) (European Thematic Network Fire in Tunnels, 2006). El éxito en el control de un incendio depende de la correcta interacción entre los distintos aspectos de la matriz.



**Figura 4.3:** Matriz de seguridad del túnel.

*Fuente: European Thematic Network Fire in Tunnels, 2006.*

Los factores de seguridad deben evaluarse para cada túnel individual, ya que se supone que cada operador de túnel u otra organización puede, a partir de su propio conocimiento y competencia, juzgar la conveniencia de la implementación. Es importante destacar que la operación del túnel a un alto nivel de seguridad y con un manejo eficiente de incidentes y accidentes se puede lograr solo en una cooperación cercana entre las tres partes involucradas: el operador del túnel, los servicios de emergencia y los usuarios del túnel.

#### 4.5.1. Plan de emergencia

El plan de emergencia tiene por objetivo reunir todos los aspectos mencionados anteriormente, por lo tanto, se deben establecer protocolos claros de actuación frente a incendios de distinto tipo y grados de complejidad. Entre los sistemas involucrados se encuentran el sistema de detección de incendios, sistema de ventilación, sistema de iluminación de emergencia, sistema de citofonía y megafonía; por otro lado, se debe coordinar la participación con los servicios de ambulancia, bomberos y carabineros así también la correcta gestión del tráfico para mantener despejada la zona de riesgo.

En caso de alarma de incendio, un plan de emergencia debe incluir las siguientes actuaciones:

- Emitir una alarma a los servicios de intervención y al operador.
- Detener la entrada del tráfico en el tubo que se ha producido el incidente.
- Detener la entrada de tráfico en todos los tubos que se utilicen como vías de evacuación o de acceso para los servicios de emergencia y reducir la velocidad del tráfico que se aproxima al túnel.
- Activar la ventilación apropiada en el tubo que tenga lugar el incendio.
- Activar la ventilación apropiada en los itinerarios de evacuación, por ejemplo, un tubo paralelo.
- Activar la iluminación y señales de emergencia en todos los tubos afectados.
- Informar a los usuarios del túnel del comportamiento a seguir (por ejemplo, mediante paneles de mensajería variable, altavoces o radio).

Es fundamental el tiempo y la activación inmediata del plan de emergencia ya que proporciona a los usuarios mayores posibilidades de supervivencia. No obstante, algunos sistemas de detección de incendios pueden ser poco fiables para garantizar la activación inmediata del plan de respuesta, por lo que en estos casos el plan de emergencia se puede subdividir en dos fases con la finalidad de disponer de tiempo para poder validar la alarma. La detección del incendio es considerada inicialmente como una “pre-alarma” lo que conlleva a que se efectúen al menos las siguientes acciones:

- Activación de una alarma al operador,
- Activación de la ventilación adecuada en el tubo o en el lugar del incidente,
- Activación en los tubos afectados, de los escenarios de emergencia.

A continuación, el operador dispone de un tiempo limitado (no más de unos pocos minutos) para evaluar la pre-alarma. Si no reacciona en este tiempo, la pre-alarma se considera válida y se activa automáticamente el plan de emergencia. (PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera, 2011).

#### 4.5.2. Ensayos

Los ensayos de situaciones de emergencia constituyen una de las alternativas más directas de conocer el real funcionamiento los sistemas diseñados y los protocolos establecidos, conforme al avance del proyecto de explotación existen dos tipos de ensayos estos son los ensayos de puesta en servicio y los ensayos periódicos del sistema.

#### 4.5.2.1. Ensayos de puesta en servicio

Antes de la puesta en marcha de la fase de explotación deberían ejecutarse ensayos a los sistemas que contengan las siguientes etapas:

- Primera etapa, comprende ensayos de los componentes individuales, se lleva a cabo por el fabricante durante las pruebas en fábrica. Su finalidad es certificar que todos los requerimientos de los equipamientos se cumplen.
- Segunda etapa (caracterización) debe permitir la verificación “in situ” de las capacidades tal y como se definen en el proyecto.
- Tercera etapa, incluye diferentes verificaciones de la funcionalidad del sistema. Los ensayos van dirigidos a comprobar las estrategias o protocolos definidos en la fase de proyecto.

Con frecuencia se realizan ensayos con humos fríos y calientes (por ejemplo, el humo procedente de una cubeta de combustible o de un vehículo ligero) cuando se realizan ejercicios de coordinación. Los ensayos con humos calientes se prescriben en diferentes normativas nacionales, y constituyen única forma de evaluar el comportamiento conjunto del sistema en caso de incendio.

#### 4.5.2.2. Ensayos periódicos en fase de explotación

Es necesario llevar a cabo ensayos periódicos para poder verificar la correcta funcionalidad de la totalidad del sistema. Éstos deberán ser realizados al menos una vez al año y deberán basarse en un escenario real incluyendo toda la sucesión de eventos, desde la activación del procedimiento de emergencia por el operador, una vez detectado el incidente, hasta la respuesta operativa de la ventilación. Los ensayos periódicos de los equipamientos deben incluir:

- Calibración de los sensores de control de polución y de los anemómetros,
- Las órdenes telecomandadas desde los armarios o gabinetes de los locales eléctricos,
- El control de la velocidad de ventilación en base a los datos suministrados por los sensores de polución,
- La verificación del sistema de detección automática de incendios mediante simulación de un incendio en diferentes puntos del túnel,
- La activación desde el centro de control de los dispositivos de extracción de humo afectados al identificar una situación de incendio,
- Los ensayos de control remoto de los ventiladores de turbina por parte de los bomberos si están instaladas las cajas de control,

- El funcionamiento de los equipamientos en modo degradado,
- El funcionamiento y control de las trampillas de extracción de humos.

Al menos cada cuatro años deberán llevarse a cabo simulacros “in situ” en condiciones tan realistas como sea posible, cerrándose el túnel al tráfico únicamente cuando se habiliten desvíos alternativos aceptables. Entre este tipo de simulacros se realizarán ejercicios parciales cada año. Cuando existan grupos de túneles próximos, se llevará a cabo un ejercicio a escala completa en al menos uno de ellos.

#### 4.5.2.3. Ensayos de sistemas basados en modelación

Existen herramientas de simulación que calculan rápidamente y sobre la marcha gran cantidad de datos, incluso para sistemas complejos de túneles, pudiéndose realizar programas de control para condiciones de explotación normales como para escenarios de incendio. Estas herramientas pueden utilizarse para ensayos de control especificados en fábrica, sustituyendo el túnel real por un modelo informático. De esta manera, los ensayos pueden ser mucho más detallados que los que se realizan “in situ”, incrementando la fiabilidad. No obstante, ello no puede reemplazar a los ensayos del sistema ni a los simulacros a gran escala.

## 4.6. Revisión de normativa de incendios en túneles

El tema de incendios en túneles es abordado de manera distinta en cada país, en general existen dos corrientes asociadas al diseño del proyecto de sistemas y operaciones en situaciones de emergencia, estos son el enfoque prescriptivo o normativo y el enfoque prestacional. En un enfoque normativo, el incendio de proyecto está definido por códigos o normativas y el proyectista no tiene elección: los riesgos establecidos por el titular se aceptan implícitamente. En un enfoque prestacional, durante el desarrollo del proyecto se evalúan y establecen los niveles de riesgo que son aceptables. El punto de partida pueden ser los valores fijados por la normativa, modificados en función de las medidas de mitigación y los niveles aceptables de riesgo. Entre estos dos enfoques hay opciones intermedias que permiten un proyecto prestacional siguiendo los principios fijados por las normativas. Teniendo en cuenta estas diferencias se realiza una revisión de la literatura con el fin de encontrar directrices en el servicio de gestión ante incendios.

### 4.6.1. Chile

#### 4.6.1.1. Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño

El Manual de Carreteras Volumen 3 (Dirección de Vialidad, 2018a) establece los conceptos básicos a tener en cuenta para el diseño de un túnel vial. En la sección 3.805 “Criterios de diseño de instalaciones

electromecánicas, de control y seguridad”se encuentran las recomendaciones para el sistema de control de incendios, estas se dividen en sistemas de detección de incendio y sistemas de combate de incendios las cuales se revisarán a continuación.

**Sistemas de detección de incendios.** El proyecto de especialidad debe indicar los sistemas con que se detectarán los eventuales incendios y/o siniestros equivalentes, estableciendo el tipo, la cantidad, localización e interconexión de los elementos sensores o detectores (calor y humo) y el control de la información (Central de detección de incendio) como asimismo de la red de transmisión.

Del mismo modo se deberá abordar el proyecto de los elementos de indicación y operación (detectores de apertura de puertas, detectores de posición de válvulas, de niveles de estanques, de flujo de agua en cañerías matrices de combate de incendio, pulsadores manuales dentro de gabinetes, etc.) Debe indicarse también, la tecnología con que debe procesarse la información, siendo recomendable que en este aspecto el proyecto se ajuste a la norma NPFA.

**Sistemas de combate de incendios.** El proyecto debe dimensionar los sistemas con que se pretenden combatir los incendios, incluyendo al menos, los siguientes:

a) Red de incendio con todo su equipamiento:

- Estanques (deben dar gravitacionalmente la presión requerida)
- Sala de bombas (si la hubiera)
- Red de Cañerías
- Válvulas

b) Sistema de combate manual con todo su equipamiento:

- Gabinetes de incendio y su equipamiento; cada 50 m en túneles tipo C y cada 100 m en tipo B.
  - Carrete con manguera
  - Teléfono conectado al centro de control
  - Hachas
  - Luz de emergencia
  - Extintores manuales de 6 kg
- Carros portátiles y su equipamiento
  - Carro
  - Extintores de al menos 90 kg
- Equipo de protección personal
  - Vestimenta
  - Equipos respiradores autónomos

c) Sistema manejo de aire con todo su equipamiento:

- Ventiladores extractores de humos (eventuales)
- Celosías anti humo - corta fuegos
- Sistema de iluminación anti pánico
- Red eléctrica a prueba de incendio
- Programa contingente de operación de ventilación

d) Cortinas de Agua

Por otro lado en la sección de sistemas de monitoreo y control se establece lo siguiente con respecto al sistema de detección de incendios.

**Sistemas de detección de incendios.** La detección automática de un incendio permite llevar a cabo el control y extinción de éste en forma rápida, por lo que es muy importante disponer de sistemas que permitan llevar a cabo dicha detección precoz.

Los detectores previstos deben generar un alarma ante cualquier incidencia, la cual será transmitida al centro de control.

Además del sistema detector de incendios propiamente dicho, el proyecto debe consultar procedimientos complementarios mediante la combinación e integración de los siguientes sistemas:

- Control de la ventilación. Su funcionamiento depende de los datos obtenidos de los medidores de CO y opacímetros ubicados a lo largo del túnel. Se produce un alarma cuando uno de estos medidores de CO sobrepasa una determinada concentración durante un tiempo prefijado, o cuando un opacímetro da una señal muy alta de opacidad durante un tiempo prefijado.
- Nichos de llamado de emergencia. Permite la realización de llamadas desde el interior del túnel.
- Detección de incidentes. Para detectar un vehículo detenido en el interior de los túneles se deben consultar aforadores (espiras) que permitan detectar vehículos detenidos, así como colas de vehículos, que deben inducir el inmediato cierre del túnel.

El centro de control debe realizar verificaciones sistemáticas para detectar la aparición de condiciones de incendio en los túneles y locales donde se han instalado los elementos detectores. La indicación puede llegar al centro de control por diferentes vías tal y como se ha indicado; ante esta situación el sistema debe ser capaz de tomar diferentes acciones, tales como:

- Activación de indicadores generales (registro de la alarma en ficheros históricos, aviso acústico y óptico al operador)
- Presentación en sistema de visualización del centro de control

- Presentación en pantalla gráfica del operador (indicando el punto donde se ha producido el incidente dentro del plano asociado a esta zona).
- Emisión de órdenes asociadas a dicha alarma (enclavamiento de una cámara cercana, modificación de la señalización, cierre del túnel, modificación de las condiciones de ventilación).

#### 4.6.1.2. Manual de Carreteras Volumen 6: Seguridad vial

El Manual de Carreteras Volumen 6 presenta los aspectos de seguridad vial que es necesario considerar tanto para el diseño como para la operación y mantenimiento de túneles de modo de tener un servicio seguro para los usuarios. En la fase de estudio se ubican las medidas relativas a las instalaciones electromecánicas , control y seguridad; en este contexto se presenta el apartado de sistema de control de incendios.

**Sistema de control de incendios.** Este sistema tiene la finalidad de detectar y controlar incendios que se produzcan al interior del túnel. Dependiendo de las necesidades de cada túnel, el sistema de control de incendios deberá considerar los siguientes sub-sistemas:

- Sistema de detección de incendios:
  - Alarma de incendio y emergencia, botones pulsador de alarmas de emergencias (Se ubicarán a lo largo del túnel y su función es alertar a la sala de control de algún incendio u otra emergencia).
  - Detectores de utilización de extintores.
  - Detectores de apertura puertas de gabinetes contra incendios.
  - Sistema de Videos.
  - Sensores de gases tóxicos.
  - Sensores de atascamientos.
- Sistema de combate de incendios:
  - Redes de incendio con todo su equipamiento.
  - Sistemas de combate manual.
  - Sistema de manejo de aire.
  - Sistema de cortinas de agua.

Tanto en el interior del túnel como en las instalaciones que lo rodean (centro de control, locales técnicos, centros de transformación) se dispondrá de un sistema que permita detectar rápidamente un incendio y facilite los medios para su extinción.

Dada la centralización de la totalidad de elementos del túnel, se podrá hacer una detección de incendio por varias vías, aprovechando todos los medios disponibles (opacímetros, detectores de monóxido de carbono, sensores de extracción de extintor, teléfonos de emergencia, detectores de tránsito, etc.). La detección de incendios dentro del túnel, se realizará fundamentalmente a través de:

- Incremento de humos con superación del límite de opacidad de  $0.012 \text{ m}^{-1}$ .
- Incremento del nivel de monóxido de carbono en valores superiores a 250 ppm.
- Utilización de un extintor.
- Aviso desde un teléfono de emergencia.
- Detección, por el sistema de aforos e incidencias, de un vehículo parado.
- Supervisión a través del circuito cerrado de televisión.
- Detección de un incremento de la temperatura por medio de un sistema de detección lineal de incendios.

Como sistema de extinción se instalará junto a cada teléfono de emergencia del interior del túnel, un extintor de polvo seco A, B, C de  $6 \text{ dm}^3$ .

Los extintores llevarán asociado un detector de extracción conectado con el sistema de control, de forma que en el momento en que se extraiga un extintor se produzca una alarma que avise al operador del centro de control y, automáticamente, se enclavará en el monitor principal del CCTV (circuito cerrado de televisión) la cámara que encuadra la zona en la que se encuentra el extintor. A la vez, se procederá a la grabación automática de las imágenes recogidas por dicha cámara.

Ante la detección de un incendio en el interior del túnel, el sistema de control deberá ser capaz de manejar eficientemente la ventilación, de manera de favorecer la evacuación de los humos y limitar o retardar su propagación en el interior del túnel.

Las estaciones de emergencia tienen como objetivo proporcionar diversos equipos de seguridad, pero no tienen la finalidad de proteger a los usuarios del túnel de los efectos de un incendio. Estas estaciones podrán consistir en una cabina junto a la pared o preferentemente en un nicho inserto en ella. Deberán estar equipadas, como mínimo, de un teléfono de emergencia conectado al centro de control y de dos extintores, los que deberán ser, como mínimo, del tipo  $\text{CO}_2$  de 6 kg. Habrá estaciones de emergencia cerca de las bocas y en el interior, situadas a intervalos no superiores a 150 m para los nuevos túneles y a intervalos no superiores a los 250 m para los túneles existentes.

A través de señalización variable, se deberán atender los siguientes eventos:

- Accidente en la calzada: Señalar disminución de velocidad, la pista ocupada y el evento.

- Lluvia o neblina: Señalar velocidad máxima y algún tipo de advertencia.
- Trabajos de mantenimiento: Señalar algún tipo de advertencia.

#### 4.6.1.3. Manual de Carreteras Volumen 7: Mantenimiento vial

El Manual de Carreteras Volumen 7 entrega un conjunto mínimo de criterios que permiten manejar las principales actividades de mantenimiento y operación de un túnel, en consecuencia cada túnel debe contar con un plan de mantenimiento y explotación propio, que considere adecuadamente sus peculiaridades. En la sección 7.203.212 se presenta lo referente a alarmas y sistema de extinción de incendios, como se muestra a continuación.

**Alarmas y sistemas de extinción de incendios.** Las alarmas son elementos vitales para que en el menor tiempo posible comiencen a operar los procedimientos de rescates o de puesta en marcha de los sistemas de apoyo; la rapidez en la reacción es un factor importante para aliviar las consecuencias que pueden derivar de accidentes graves. En general las alarmas más usadas son:

- Detectores de incendios
- Pulsadores de alarma de incendio
- De apertura de puertas de casetas S.O.S.
- De los niveles de agua de estanques para incendios
- De altura de vehículos
- Detectores de velocidad

Estas alarmas deben ser inspeccionadas preventivamente todos los meses. Para minimizar los efectos de un incendio, la red debe tener una reserva de agua suficiente de manera de asegurar la operación de dos casetas de incendios durante 4 horas a un gasto unitario de 250 litros por minuto; debe operar con una presión de 6 a 9 atm. La red completa debe ser sometida a labores de mantenimiento preventivo por lo menos una vez por año.

Los extintores multipropósitos ABC, que normalmente se instalan en las casetas S.O.S., deben revisarse visualmente y comprobar su peso cada seis meses y someterse a un mantenimiento total en una planta autorizada por el cuerpo de bomberos, una vez al año.

Las mangueras de incendio tendrán revisión funcional cada 6 meses.

#### 4.6.1.4. Base de licitación Américo Vespucio Oriente II

El concesionario estará obligado a diseñar, mantener y operar un servicio de gestión ante incendios, el que deberá estar disponible durante toda la etapa de explotación con el objetivo de evitar la pérdida de vidas, reducir daños en los bienes y minimizar el número de emergencias de esta naturaleza. Un incendio al interior de un túnel o trinchera es un accidente de alto riesgo, debido al confinamiento de personas, las que se enfrentan a un rápido aumento de temperatura y sustancias potencialmente tóxicas en un espacio reducido.

El servicio de gestión ante incendios deberá considerar, al menos, lo siguiente:

- Sistema de detección de incendios
- Sistema de ventilación durante un incendio: En situaciones en que se produzca un evento de incendio al interior del túnel y/o trinchera, el nivel de los contaminantes en los sectores que no se vean afectados por el siniestro debe cumplir lo siguiente:
  - a) Para el monóxido de carbono CO, el valor máximo permitido es de 150 ppm. Al igual que en una situación normal, la medición del monóxido de carbono se realizará con los instrumentos de monitoreo instalados a lo largo del túnel y trinchera, de acuerdo al proyecto de ingeniería de detalle del sistema de ventilación, durante intervalos de 5 minutos. Para cada intervalo de tiempo se determinará el valor máximo de las mediciones, en cada estación de monitoreo. Estos valores máximos serán promediados en el mismo intervalo de tiempo para la verificación de la exigencia.
  - b) Para la opacidad (coeficiente de extinción lumínica K), el valor máximo permitido es de  $9 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ . La medición continua del grado de visibilidad (opacidad) al interior del túnel y trinchera se realizará con los instrumentos de monitoreo (opacímetros) instalados a lo largo del túnel y trinchera, de acuerdo al proyecto de ingeniería de detalle del sistema de ventilación. Se determinará K como la pérdida de la intensidad (E) después de recorrer una longitud (L). (PIARC Technical Committee on Road Tunnel Operation). El valor de K corresponderá al máximo valor medido, en bloque de mediciones de 5 minutos, en cualquier punto del túnel o trinchera.
- Sistema de iluminación ante condiciones de incendio
- Sistema de citofonía y megafonía de emergencia
- Plan de gestión ante incendios (PGI): La sociedad concesionaria será responsable de establecer los protocolos de actuación frente a la detección incendios, de acuerdo a diferentes tipos de condiciones y del grado de complejidad alcanzado por éstos. A más tardar 90 (noventa) días antes de la fecha estimada para la solicitud de la puesta en servicio provisoria de las obras, el concesionario deberá someter a la aprobación del inspector fiscal un plan de gestión ante incendios, el cual debe ser evaluado y certificado por un organismo internacional, que cuente, a

lo menos, con 5 (cinco) años de experiencia en certificación de este tipo de planes. La aprobación de este plan, debidamente certificado por el organismo internacional ya señalado, será condición para la aprobación de la puesta en servicio provisoria de las obras. El plan definirá la intervención en casos de incendio distinguiendo por magnitud del evento y debiendo especificar a lo menos:

- (I) Programación de los distintos planes de ventilación de acuerdo a los niveles de contaminación al interior de los túneles y trincheras.
- (II) Operación de extractores de aire.
- (III) Zonas de ventilación a desconectar.
- (IV) Vías de escape.
- (v) Coordinación con los servicios de ambulancia, bomberos y carabineros.
- (VI) Tipo de evacuación a realizar (total o parcial de los túneles y trincheras).
- (VII) Medio de comunicación con los usuarios que se encuentran dentro de los túneles y trincheras.
- (VIII) Gestión de tráfico para mantener a los vehículos que se encuentren aguas abajo y aguas arriba del incendio.
- (IX) Plan de capacitación de profesionales, entre otros.

- Plan de simulacros: La sociedad concesionaria desarrollará y mantendrá vigente, a su entero cargo, costo y responsabilidad, durante toda la etapa de explotación un plan de simulacros, con el propósito de comprobar en un ambiente controlado el correcto funcionamiento de todos los sistemas y la correcta coordinación de los equipos humanos necesarios para enfrentar un incendio. Previo a la solicitud de autorización de la puesta en servicio provisoria de las obras y como condición para ésta, la sociedad concesionaria deberá ejecutar un primer simulacro, el que deberá ser informado con 60 (sesenta) días de anticipación al inspector fiscal. Conjuntamente con dicho aviso, deberá entregar al inspector fiscal un plan que contendrá el detalle de las condiciones bajo las cuales se realizará dicho simulacro, el inspector fiscal se pronunciará respecto a dicho plan en un plazo de 10 (diez) días. Si el inspector fiscal observare dicho plan, la sociedad concesionaria contará con un plazo de 10 (diez) días para hacer las adecuaciones y presentar el plan corregido al inspector fiscal, quien contará con el mismo plazo para pronunciarse o aprobarlo. Este procedimiento se seguirá hasta que el plan esté aprobado a conformidad del inspector fiscal.

Un año después de efectuado el primer simulacro la sociedad concesionaria deberá efectuar un segundo simulacro bajo las condiciones antes descritas. Posteriormente y durante toda la etapa de explotación, la sociedad concesionaria deberá efectuar un simulacro cada 5 (cinco) años, para lo cual regirá el procedimiento antes señalado.

Todo simulacro será realizado en función de las condiciones establecidas en el plan de gestión ante incendios descrito anteriormente. Durante el simulacro y en la evaluación posterior de éste, deberá hacerse un levantamiento de las falencias y omisiones en el POI, proponiendo las modificaciones que de dicho análisis se deriven. El plan actualizado deberá someterse a la

aprobación del inspector fiscal a más tardar 60 (sesenta) días después de la realización de cada simulacro.

- Plan de capacitación: En atención a que no existe la suficiente experiencia frente al manejo de situaciones de incendio en túneles y trincheras, la sociedad concesionaria deberá desarrollar, mantener y ejecutar a su entero cargo, costo y responsabilidad un plan de capacitación que recoja la experiencia internacional frente a eventos de este tipo y que involucre tanto el personal propio, así como al perteneciente a los servicios de atención de emergencias necesarios para enfrentar un siniestro en los túneles y trincheras. A más tardar 90 (noventa) días antes de la fecha estimada para la solicitud de la puesta en servicio provisoria de las obras, el concesionario deberá someter a la aprobación del inspector fiscal el plan de capacitación.

El plan de capacitación debe actualizarse anualmente, con las actividades de capacitación que la sociedad concesionaria ejecutará en el siguiente año calendario. La actualización anual deberá ser entregada para aprobación del inspector fiscal, antes del 31 de octubre del año calendario anterior a su vigencia. El plan de capacitación se desarrollará y actualizará a entero cargo, costo y responsabilidad de la sociedad concesionaria durante toda la etapa de explotación.

- Plan de difusión al usuario: La sociedad concesionaria deberá incorporar dentro del programa de información a los usuarios para la etapa de explotación que tendrá por objetivo informar a la ciudadanía sobre el comportamiento a seguir al transitar por los túneles y trincheras así como las medidas de seguridad que los usuarios deben adoptar para minimizar el impacto en caso de enfrentarse a situaciones de incendio al interior de dichas estructuras. Este plan debe ser actualizado anualmente, y entregado al inspector fiscal para su aprobación, antes del 31 de octubre del año calendario anterior a su entrada en vigencia.

#### 4.6.2. Noruega

A continuación presentan los requisitos generales establecidos en la normativa para túneles viales noruegos (Norwegian Public Roads Administration, 2004).

##### 4.6.2.1. Protección contra incendios

**General** Las regulaciones relativas a la protección contra incendios en túneles están estipuladas en la ley de protección contra incendios de 1987 y las reglamentaciones correspondientes. Se hacen recomendaciones en las reglamentaciones de que los túneles de más de 500 m se clasifican como objetos de incendio particulares. El servicio municipal de bomberos también puede determinar que otros túneles estén clasificados en consecuencia. Los túneles de más de 500 m de longitud en vías troncales deben considerarse como objetos de incendio particulares independientemente de las resoluciones municipales formales.

Se debe preparar un plan de emergencia para todos los túneles de más de 500 m. Esto debe prepararse durante la fase de planificación y en estrecha cooperación con los servicios de emergencia locales. También se incluirán otros túneles en la vecindad cuando se prepare el plan de emergencia. La consideración de un plan de emergencia simplificado para túneles más cortos se debe hacer en cooperación con el servicio de bomberos.

El Ministerio de Transporte y Comunicaciones y el Ministerio de Gobierno Local y Desarrollo Regional han preparado directrices para los procedimientos administrativos relativos a la protección contra incendios en túneles de carretera (julio de 2000). Las directrices describen la cooperación entre la Administración Noruega de Caminos Públicos y las autoridades de bomberos, los procedimientos para el análisis de riesgos, la responsabilidad y la cooperación en ejercicios, planes de emergencia y participación, y también las regulaciones estatales para la mejora de túneles existentes. De manera similar, la Dirección de Incendios y Seguridad Eléctrica (DBE) preparó un folleto sobre seguridad contra incendios en túneles de carretera (mayo de 1999).

**Potencia del incendio: especificaciones para construcciones y equipos** Los túneles se diseñarán para una potencia de incendio de 5 MW cuando AADT (10) < 10.000, y 20 MW cuando AADT (10) > 10.000. En los túneles en los que existe el riesgo de daños a la infraestructura como resultado de un incendio, se debe considerar especialmente la potencia del incendio de diseño.

Las especificaciones de los cables que deben funcionar en caso de incendio se encuentran en el Capítulo 10 “Equipo técnico”. Se deben usar cables ignífugos clase 3, en todos los conductos abiertos hasta la ubicación del equipo que debe estar operativo durante un incendio.

Para los equipos que deben funcionar durante un incendio (iluminación, ventilación, cables de señal, etc.), estos deberán instalarse vincularse de manera que el túnel esté dividido en secciones.

Para los túneles de doble tubo, se debe establecer un cortafuegos en todas las interconexiones. Todos los cortafuegos deben tener una resistencia al fuego de al menos REI-M 120 como se especifica en las regulaciones de la ley de planificación y construcción. Las puertas en el cortafuego deben tener una resistencia al fuego de EI-C 60. Todas las puertas de los cortafuegos deben diseñarse como cerraduras y deben ser a prueba de gas y humo. Las paredes en la cerradura deben tener las mismas especificaciones que el cortafuegos.

#### 4.6.2.2. Planes de emergencia

En principio, un plan de emergencia es un acuerdo entre el propietario del túnel y los servicios de emergencia sobre la responsabilidad y las tareas compartidas en caso de accidente en el túnel. El plan de emergencia comprende esencialmente tres partes:

- Una descripción del túnel, equipo en el túnel, posibilidades de redirección y equipo disponible
- Un análisis de riesgo
- Una descripción de varios escenarios importantes y los planes de entrada para cada uno de ellos con una aclaración de las responsabilidades de cada uno de los servicios de emergencia.

El plan de emergencia debe prepararse durante la etapa de planificación del túnel, y debe revisarse según las necesidades. Es importante que el plan sea simple de ejecutar y que se lleven a cabo ejercicios de práctica regulares. Se ha preparado una guía separada para mostrar el contenido del plan en detalle. Es un requisito que se realice un análisis de riesgo para túneles clasificados como objetos especiales de fuego. Se preparó una guía para indicar cómo deben llevarse a cabo estos análisis. Los análisis de riesgos también se describen en otros folletos (en noruego) preparados por la Dirección de Caminos Públicos. Como parte del plan de emergencia, se debe evaluar la restricción al transporte de mercancías peligrosas a través del túnel. La determinación de las restricciones está determinada por la Dirección de Carreteras Públicas.

## 4.7. Propuesta de evaluación del sistema de protección contra incendios

El éxito frente a un evento de incendio está determinado mediante dos aspectos, la preparación en términos de equipamiento y el factor humano. Contar con el equipamiento y tecnología necesaria es de carácter básico y esencial. Por otro lado el factor humano está presente en el personal operativo del túnel, los servicios de emergencia y usuarios, considerando estas últimas como variables de difícil medición se propone evaluar el sistema de protección contra incendios por medio de los siguientes aspectos.

### 4.7.1. Equipamiento necesario

La concesión deberá contar con el equipamiento necesario para abordar los distintos escenarios que se puedan presentar a lo largo del periodo de concesión, según el Manual de Carreteras el equipamiento es función de la longitud del túnel y en nivel de tráfico que circula por éste sin embargo, como mínimo se deberán considerar los siguientes sistemas:

- Sistema de detección de incendios
- Sistema de ventilación durante el incendio
- Sistema de iluminación ante condiciones de incendio
- Sistema de citofonía y megafonía de emergencia

- Sistema de combate de incendios
- Peneles de mensajería variable (PMV) y señalética al interior del túnel.

#### 4.7.2. Plan de gestión ante incendios

El plan de gestión ante incendios corresponde a un acuerdo en la definición de los protocolos a seguir frente eventos de incendios los cuales presentan diferentes tipos de condiciones y grados de complejidad. En este plan debe existir claridad sobre las responsabilidades y tareas compartidas entre los operadores y servicios de emergencia. El plan comprenderá esencialmente tres partes:

- Una descripción completa de los equipos del túnel.
- Un análisis de riesgo, donde se puedan comparar los distintos escenarios asociados a una probabilidad de ocurrencia y nivel de desastre.
- Una descripción de los escenarios mas importantes y los planes desarrollados para cada uno de ellos con una aclaración de las responsabilidades de cada una de las partes involucradas.

El plan definirá las intervención en caso de incendio distinguiendo por magnitud del evento y debiendo especificar a lo menos:

- Programación de los distintos planes de ventilación de acuerdo a los niveles de contaminación al interior de los túneles y trincheras.
- Operación de extractores de aire.
- Zonas de ventilación a desconectar.
- Vías de escape.
- Coordinación con los servicios de ambulancia, bomberos y carabineros.
- Tipo de evacuación a realizar (total o parcial de los túneles y trincheras).
- Medio de comunicación con los usuarios que se encuentran dentro de los túneles y trincheras.
- Gestión de tráfico para mantener a los vehículos que se encuentren aguas abajo y aguas arriba del incendio.
- Plan de capacitación de profesionales, entre otros.

Por ultimo este plan deberá ser aprobado por el inspector fiscal y por un organismo internacional, que cuente, a lo menos, con 5 años de experiencia en certificación de este tipo de planes.

### 4.7.3. Plan de simulacros

Durante toda la etapa de explotación se desarrollará un plan de simulacros, con el propósito de comprobar en un ambiente controlado el correcto funcionamiento de todos los sistemas y la correcta coordinación de los equipos humanos necesarios para enfrentar un incendio. Previo a la solicitud de autorización de la puesta en servicio provisoria de las obras y como condición para ésta, se deberá ejecutar un primer simulacro, el que deberá ser informado con 60 (sesenta) días de anticipación al inspector fiscal. Conjuntamente con dicho aviso, deberá entregar al inspector fiscal un plan que contendrá el detalle de las condiciones bajo las cuales se realizará dicho simulacro, el inspector fiscal se pronunciará respecto a dicho plan en un plazo de 10 (diez) días. Si el inspector fiscal observare dicho plan, la sociedad concesionaria contará con un plazo de 10 (diez) días para hacer las adecuaciones y presentar el plan corregido al inspector fiscal, quien contará con el mismo plazo para pronunciarse o aprobarlo. Este procedimiento se seguirá hasta que el plan esté aprobado a conformidad del inspector fiscal.

Un año después de efectuado el primer simulacro la sociedad concesionaria deberá efectuar un segundo simulacro bajo las condiciones antes descritas. Posteriormente y durante toda la etapa de explotación, la sociedad concesionaria deberá efectuar un simulacro cada 4 (cinco) años, para lo cual registrará el procedimiento antes señalado.

Todo simulacro será realizado en función de las condiciones establecidas en el plan de gestión ante incendios descrito anteriormente. Durante el simulacro y en la evaluación posterior de éste, deberá hacerse un levantamiento de las falencias y omisiones en el POI, proponiendo las modificaciones que de dicho análisis se deriven. El plan actualizado deberá someterse a la aprobación del inspector fiscal a más tardar 60 (sesenta) días después de la realización de cada simulacro.

### 4.7.4. Plan de capacitación

En atención a que no existe la suficiente experiencia frente al manejo de situaciones de incendio en túneles y trincheras, se deberá desarrollar, mantener y ejecutar un plan de capacitación que recoja la experiencia internacional frente a eventos de este tipo y que involucre tanto el personal propio, así como al perteneciente a los servicios de atención de emergencias necesarios para enfrentar un siniestro en los túneles y trincheras. A más tardar 90 (noventa) días antes de la fecha estimada para la solicitud de la puesta en servicio provisoria de las obras, el concesionario deberá someter a la aprobación del inspector fiscal el plan de capacitación.

El plan de capacitación debe actualizarse anualmente, con las actividades de capacitación que se ejecutará en el siguiente año.

#### 4.7.5. Plan de difusión al usuario

Se deberá incorporar dentro del programa de información a los usuarios para la etapa de explotación que tendrá por objetivo informar a la ciudadanía sobre el comportamiento a seguir al transitar por los túneles y trincheras así como las medidas de seguridad que los usuarios deben adoptar para minimizar el impacto en caso de enfrentarse a situaciones de incendio al interior de dichas estructuras. Este plan debe ser actualizado anualmente, y entregado al inspector fiscal para su aprobación.

### 4.8. Conclusiones

- Se propone un equipamiento mínimo y básico especificado en el Manual de Carreteras que depende de la longitud y tráfico del túnel, añadiéndose al conjunto paneles de mensajería variable y señalética al interior de este.
- Como medida de preparación frente a eventos de incendio, se exige un plan de gestión ante incendios que defina el actuar frente a determinadas situaciones de riesgo.
- Se incorpora un plan de simulacros llevados a cabo periódicamente para ensayar y preparar las situaciones de riesgo detectadas en el plan de gestión.
- Se propone un plan de capacitación periódico del personal operador del túnel, con el fin de tener un equipo humano apto para reaccionar y gestionar situaciones de riesgo.
- Se exige un plan de difusión hacia el usuario, el cual contemple la educación necesaria para la fase de auto rescate.



# SISTEMA DE DRENAJE Y SANEAMIENTO

## 5.1. Introducción

El sistema de drenaje y saneamiento está constituido por todos aquellos elementos que contribuyen a mantener la calzada libre de agua o líquidos que puedan ser perjudiciales para la estructura y para el usuario de la vía. En un túnel las entradas de agua pueden ser producto de infiltraciones (aguas subterráneas), precipitaciones, escorrentías, hidrantes, lavados del túnel y líquidos provenientes de derrames de mercancías peligrosas. El sistema de drenaje y saneamiento debe considerar estas variables e incluirlas en el diseño. En este capítulo se aborda la problemática del drenaje en túneles comenzando por las principales fuentes de emisiones de agua, posteriormente se revisan los elementos que conforman el sistema, para finalmente proponer una metodología de evaluación del sistema de saneamiento y drenaje, que involucra una revisión bibliográfica de normativas, bases de licitación y manuales técnicos. La propuesta de evaluación considera como base el manual de inspección visual de activos de saneamiento y drenaje de carreteras elaborado por Arriagada y Echaveguren (2015), con un enfoque en túneles viales.

## 5.2. Estado de la práctica

Actualmente el sistema de drenaje y saneamiento se aborda de una perspectiva de la mantención y conservación programada de los elementos que la constituyen, esto quiere decir que periódicamente se hace una limpieza y reparación de los activos. El manual de carreteras proporciona las pautas necesarias para diseño y mantención de los elementos, por otro lado, en bases de licitación más recientes se pide por separado que los elementos deber presentar características de operatividad y estabilidad estructural especificados en un plan de conservación de obras.

## 5.3. Drenaje de un túnel

### 5.3.1. Entradas de agua

El sistema de drenaje surge por la necesidad de mantener el túnel libre de sustancias liquidas que puedan dañar la estructura o afectar el tránsito seguro en este. Existen diversos fluidos que pueden afectar el buen funcionamiento del túnel, los más importantes son los líquidos inflamables y el agua. (The Highways Agency, 1999).

Las principales entradas de agua son:

- Aguas subterráneas y drenaje de la estructura del túnel
- Lavado de la pared del túnel
- Lucha contra incendios y lavado después de derrames de mercancías peligrosas dentro del túnel
- Lluvia

Se puede apreciar que las primeras tres fuentes provienen del interior del túnel y la última proviene del exterior.

#### 5.3.1.1. Agua subterránea

La cantidad de agua subterránea que fluye hacia un túnel depende de las condiciones del terreno, el diseño y la calidad de construcción de la estructura del túnel. Algunos de los factores comunes se detallan a continuación:

**Túneles debajo del nivel freático** La entrada de agua en un túnel dependerá del sistema de impermeabilización del utilizado. Con un sistema completo de impermeabilización se espera una entrada de menos de 1.0 litro/m<sup>2</sup>/día (donde el área en m<sup>2</sup> es el área de superficie interna total). Se experimentan entradas considerablemente mayores en túneles que incorporan medidas específicas para drenar el agua subterránea y bajar el nivel freático.

**Túneles sobre del nivel freático** Los túneles en esta categoría pueden experimentar solo el flujo de agua intermitente de infiltración de la lluvia ,fugas de tuberías o alcantarillado local al túnel.

#### 5.3.1.2. Lavado de pared

La cantidad de agua de las operaciones de lavado de paredes depende de las técnicas empleadas. Para fines de cálculo, se puede utilizar una tasa de uso de agua de  $5 \text{ l/m}^2$  de área de pared durante el período de limpieza.

#### 5.3.1.3. Agua hidrante

La mayoría de los túneles están equipados con hidrantes a intervalos frecuentes, alimentados desde redes húmedas. Para tales casos, un margen razonable sería que la brigada de bomberos utiliza dos hidrantes para lavar, lo que da un flujo de aproximadamente 66 l/s.

En los casos en que una tubería principal de incendios podría ser vulnerable a los daños causados por un incidente de tráfico, es posible que el servicio del sistema de bombeo tenga que incluir el caudal proveniente de una tubería rota en función de sus cálculos de presión / flujo.

#### 5.3.1.4. Precipitación y escorrentía

La cantidad máxima de precipitación que se puede esperar dentro de un área de captación de lluvia determinada se puede obtener a partir de registros e hidrogramas publicados por la Oficina Meteorológica, clasificados de acuerdo con varios "períodos de retorno de tormenta", generalmente tormentas de 20, 50 y 100 años. La cantidad máxima de agua para ser almacenada generalmente se evalúa, al integrar el área debajo del hidrograma, para una tormenta y escorrentía de 60 minutos.

La cantidad de agua de precipitación que ingresa al túnel, y que se debe evacuar dependerá de la posición y el nivel del túnel en relación con la topografía local y los tamaños de las áreas de captación.

## 5.4. Sistemas de drenaje

Como se vio en la sección anterior el agua puede proceder del interior o exterior del túnel, de esta forma es necesario proveer sistemas de drenaje con distintas características para evitar que el agua procedente del exterior (precipitación y escorrentía) haga ingreso y el agua proveniente del interior pueda ser evacuada de manera rápida y segura.

### 5.4.1. Drenaje interior

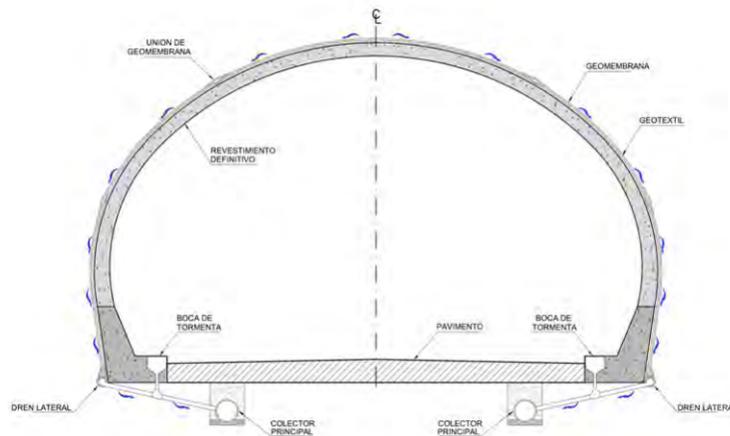
#### 5.4.1.1. Drenes en túnel

Las láminas impermeables se colocan entre el terreno y el revestimiento definitivo, recogiendo las infiltraciones hasta los tubos perforados longitudinales al túnel situados en ambos lados, al final de la lámina impermeable. Las filtraciones se conducen desde estos a un colector general o principal por medio de tubos transversales. El sistema de drenaje longitudinal conduce el agua al exterior del túnel; el agua proviene principalmente de:

- Agua de la calzada, captada mediante bocas de tormenta colocadas en las banquetas.
- Agua procedente de afloramientos y filtraciones del terreno que es encauzada mediante el sistema de impermeabilización del túnel.
- Agua que circula por las cunetas y entra al túnel al no poder evacuarse por otros lados.

Los diámetros de los drenes laterales y el colector o los colectores principales serán determinados en la etapa de proyecto tomando en cuenta el caudal esperado.

Para determinar la ubicación, el número de drenes y las bajadas al colector (o colectores) principal (es) se deberá tomar en cuenta el alineamiento horizontal y vertical del túnel. El proyectista deberá hacer todas las consideraciones necesarias para garantizar el adecuado desalojo del agua hacia el exterior del túnel.



**Figura 5.1:** Impermeabilización de bajada al dren colector principal.

*Fuente: (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016)*

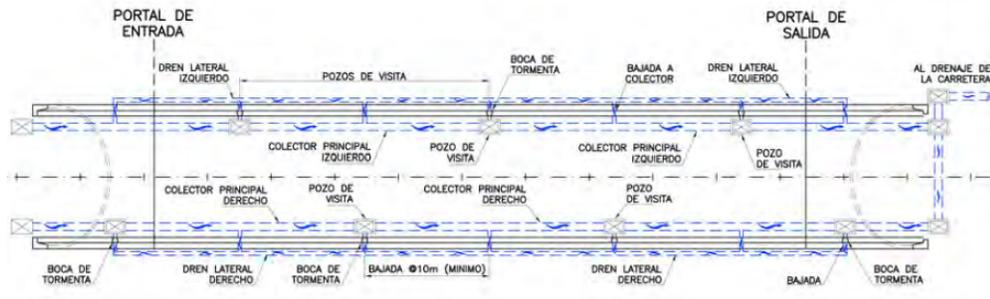


Figura 5.2: Planta de drenaje tipo (tangente).

Fuente: (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016)

#### 5.4.1.2. Cámaras de inspección

Son estructuras construidas sobre el colector principal que tiene acceso por la superficie para facilitar las labores de mantenimiento, limpieza y en algunos casos para realizar algún cambio de dirección.

Se fabrican según las necesidades del proyecto considerando la profundidad, diámetro, posición de las conexiones y con las dimensiones suficientes para realizar un mantenimiento periódico.

Las cámaras de inspección podrán ser prefabricados de concreto o de concreto hidráulico con acero de refuerzo; la losa de la parte superior de los pozos puede ser prefabricada o construida en el lugar, su espesor y tapa deberán ser suficientes para soportar el tráfico pesado del túnel; en todos los casos deberá de adaptarse a las condiciones finales del pavimento.

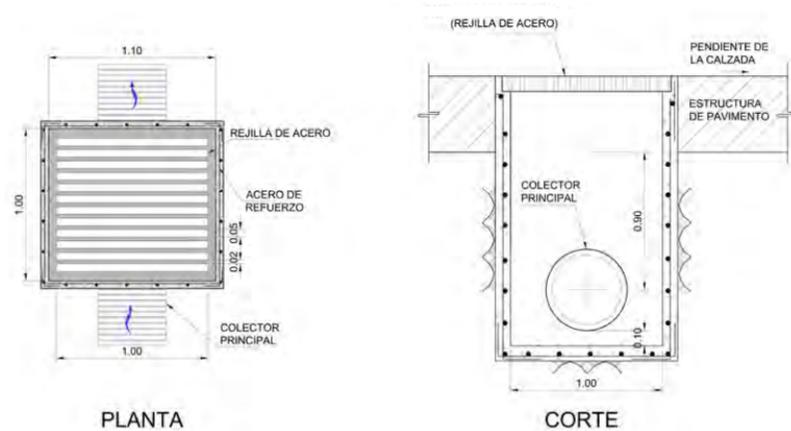


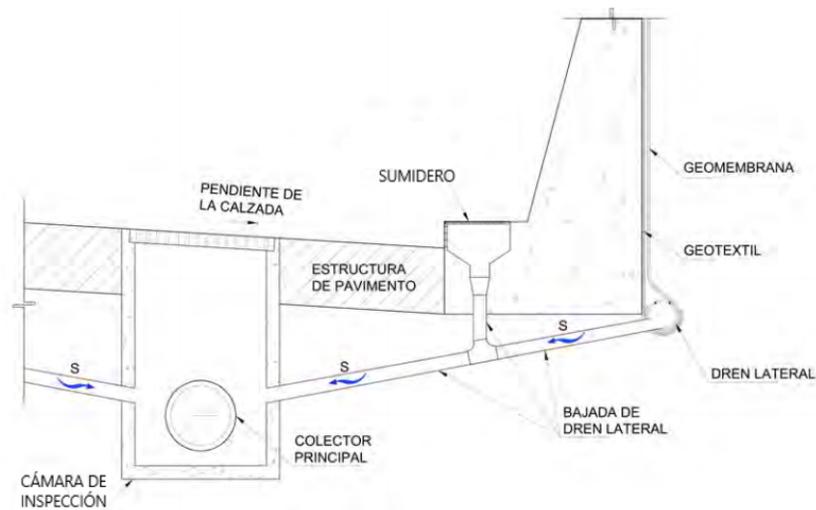
Figura 5.3: Cámara de inspección hecha en obra (tapa rectangular).

Fuente: (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016)

La separación máxima entre las cámaras de inspección debe ser la adecuada para facilitar las operaciones de inspección y limpieza.

#### **5.4.1.3. Sumideros**

Independientemente que el sistema de impermeabilización deba mantener el interior del túnel libre de agua; es necesario colocar sumideros en la zona de la acera del túnel para recoger el agua producto de la limpieza de la calzada por el derrame de residuos tóxicos, combustibles, aceites etc. Estas estructuras de captación deberán conducir el agua hasta el colector principal más cercano y deberán estar provista de una tapa para realizar el mantenimiento periódico.



**Figura 5.4:** Ubicación e instalación de los sumideros.

*Fuente: (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016)*

## 5.4.2. Drenaje Exterior

El drenaje exterior en túneles es el conjunto de obras complementarias que contribuyen a encauzar las aguas superficiales fuera de la zona de taludes y así evitar serios daños por problemas de estabilidad.

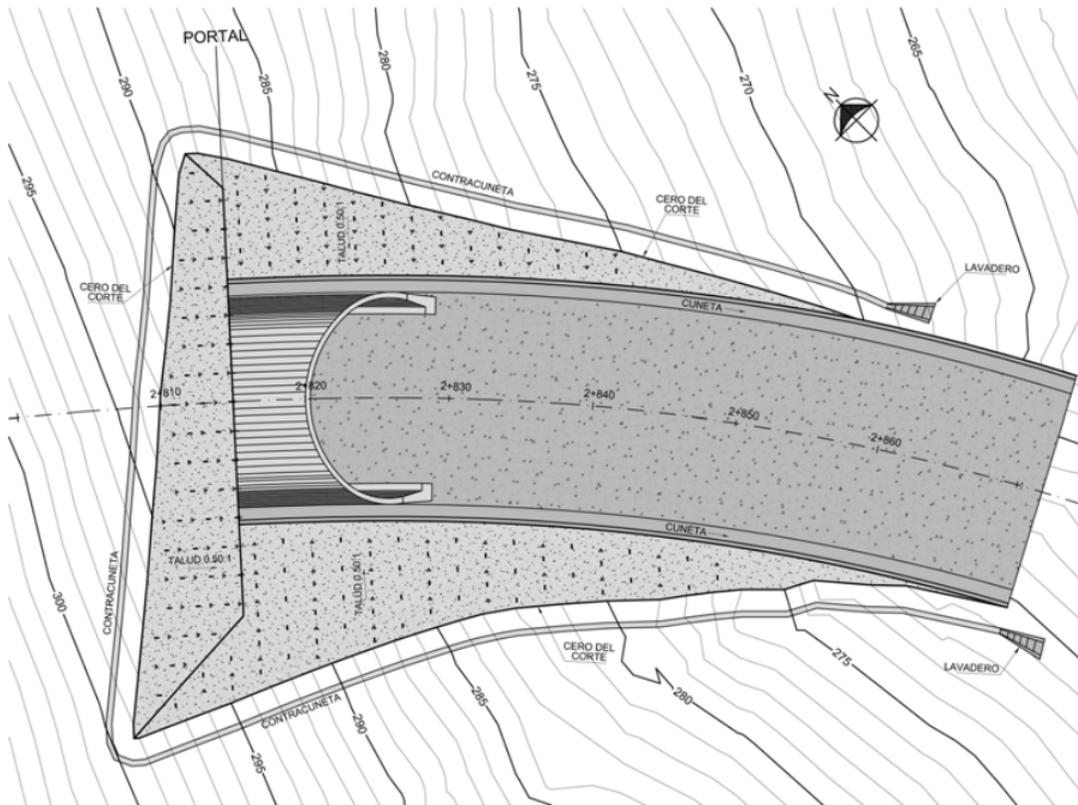
Para lograr un sistema de drenaje efectivo se requiere tomar en cuenta la geología de la zona, la topografía, el clima y la hidrología; ya que el objetivo básico para una obra de drenaje es la preservación de la vía; es así que la ubicación y el diseño de las obras de drenaje tendrá una gran importancia en el proyecto del túnel.

El correcto diseño y ejecución de las obras de drenaje buscará permitir el libre escurrimiento protegiendo de una manera óptima la infraestructura, drenando con la eficiencia necesaria el agua que llega a la vía, en la medida de lo posible, a un escurrimiento natural o a una obra de drenaje de la carretera.

### 5.4.2.1. Cunetas

Las cunetas son zanjas que se construyen con el objetivo de interceptar el agua que escurre sobre la superficie de los taludes de los cortes o del terreno contiguo, conduciéndola a un sitio donde no haga daño a la carretera o a terceros.

La pendiente longitudinal mínima que debe existir en una cuneta es de 0.5 %, regularmente será coincidente con la pendiente adoptada por la vía.



**Figura 5.5:** Tajo de acceso con obras de drenaje exterior

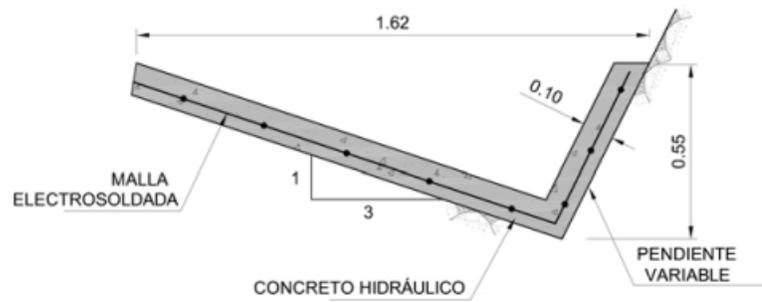
*Fuente: (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016)*

Las cunetas se construyen generalmente en sección trapezoidal o triangular siendo la sección triangular la más frecuente, el talud hacia la vía es como mínimo 3:1 y del lado del corte sigue sensiblemente la inclinación natural del talud. La sección triangular es la más conveniente y fácil de construir, se conforma al terminar la capa subrasante.

#### 5.4.2.2. Contracunetas

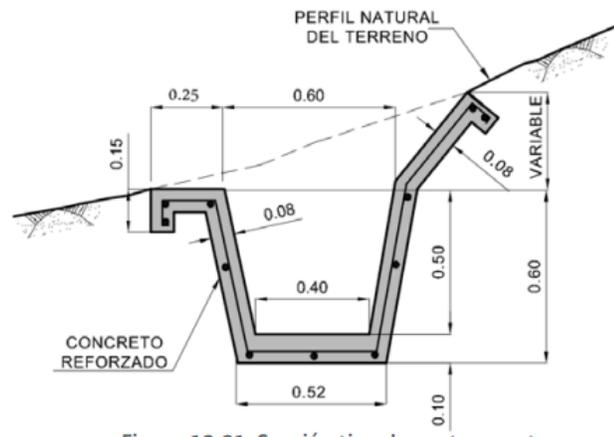
Las contracunetas son zanjas o bordes que se construyen en laderas localizadas aguas arriba de los taludes de los cortes o cerca de estos con el objetivo de interceptar el agua que escurre sobre la superficie del terreno natural, conduciéndola a una parte baja del terreno para evitar el saturamiento hidráulico de la cuneta y la erosión del corte.

El desarrollo de la contracuneta debe ser paralelo al propio corte, de esta manera el canal se va desarrollando con pendiente longitudinal, la cuneta debe conducir el agua captada a cauces naturales, o ligarse a otra obra de drenaje (Lavaderos).



**Figura 5.6:** Sección tipo de cuneta.

Fuente: (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016)



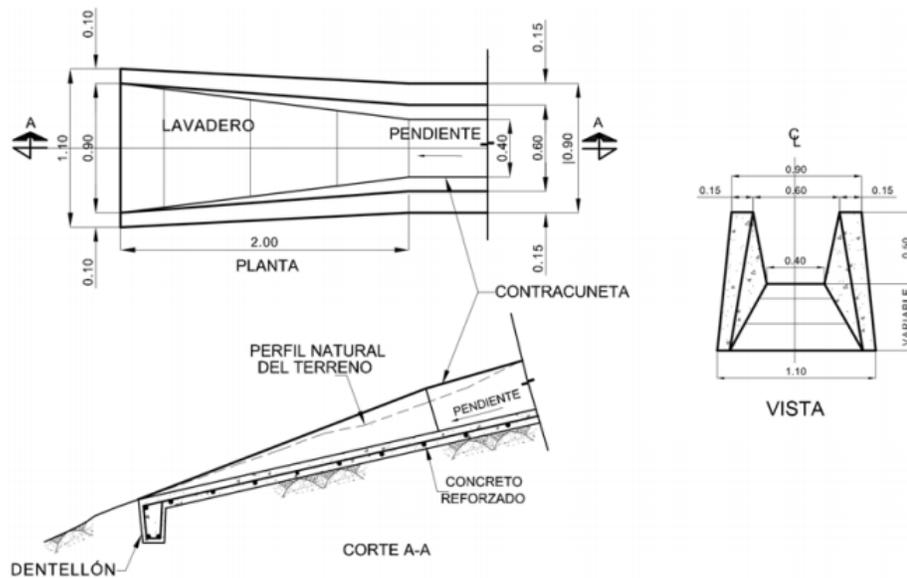
**Figura 5.7:** Sección tipo de contracuneta.

Fuente: (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016)

El criterio para definir la construcción de una contracuneta deberá basarse en consideraciones topográficas y de la naturaleza de los materiales que forman los cortes, los taludes y el terreno natural de la zona; el levantamiento topográfico definirá en mucho los escurrimientos que se deberán esperar sobre el talud.

#### 5.4.2.3. Lavadero en portales

Los lavaderos son canales que conducen y descargan el agua recolectada por las cunetas a lugares donde no cause daño a la estructura del pavimento. Los lavaderos pueden ser de mampostería o concreto hidráulico o metálicos. Si se construyen con mampostería o concreto hidráulico, generalmente tienen sección triangular, con el propósito de lograr una depresión en su intersección con el acotamiento, para facilitar la entrada del agua al lavadero.



**Figura 5.8:** Sección tipo de un lavadero triangular.

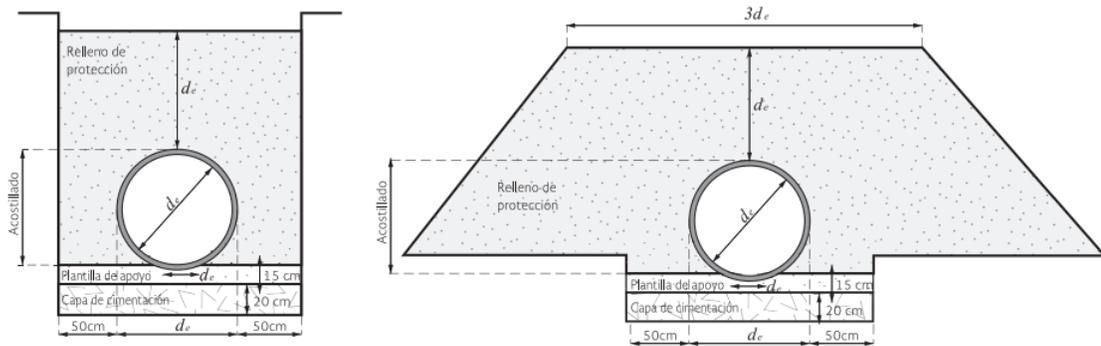
Fuente: (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016)

Debido a las fuertes velocidades con que el agua baja por el lavadero en algunos casos específicos, se hace necesario el diseño y la construcción de una caja disipadora de energía en el pie del mismo con el objeto de evitar erosiones del propio lavadero al pie, de igual manera para amortiguar la energía adquirida por el agua en la bajada se puede dar rugosidad a la plantilla del lavadero o colocando piedras ahogadas parcialmente en el concreto, regularmente los lavaderos se colocan como elementos de salida hacia un cauce natural del agua captada por las cunetas y contracunetas; por lo que la zona de unión deberá ser amplia y sin quiebres con el fin de evitar la erosión y cualquier riesgo de falla.

#### 5.4.2.4. Alcantarillas

Una alcantarilla en carreteras es un conducto colocado en una o varias líneas a través de un terraplén para dar paso libre al agua de un lado al otro de la carretera. Según el terreno donde se construyan, pueden ser en zanja, en zanja con terraplén o en terraplén; según su ubicación se clasifican en normal o inclinada. En lo que respecta a túneles, las alcantarillas se utilizarán para conducir el agua captada por las obras de drenaje exterior (cunetas, contracunetas y lavaderos) y darle paso por debajo de la carretera hacia un cauce natural de manera que no afecte los taludes de acceso.

Actualmente las alcantarillas se pueden construir con tubos de concreto, lamina corrugada de acero o de polietileno de alta densidad. La ubicación, diámetro, material, eficiencia hidráulica y estructural, serán responsabilidad del proyectista quien deberá tomar en cuenta el gasto esperado, la topografía y las necesidades de la obra.

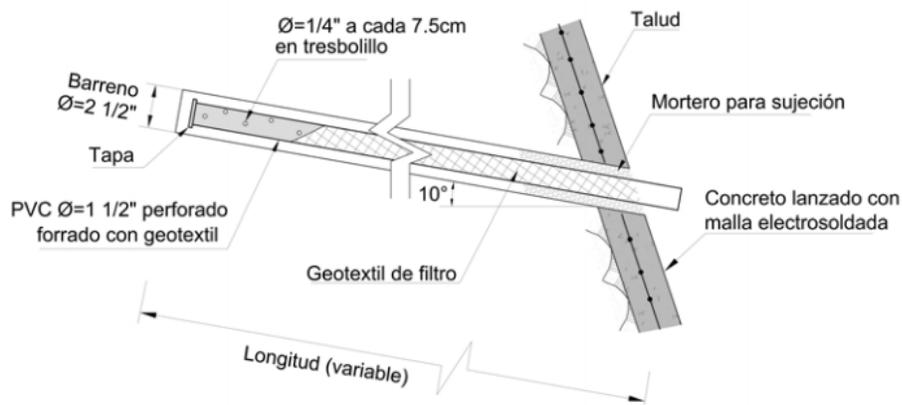


**Figura 5.9:** *Excavación y relleno en alcantarillas.*

*Fuente: (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016)*

#### 5.4.2.5. Drenes profundos en taludes

Los drenes profundos en taludes constituyen un sistema de subdrenaje que consiste en tuberías horizontales, ranuradas e insertadas transversalmente en los taludes de cortes o rellenos para aliviar la presión de poro, en la mayor parte de los casos extrayendo agua de los suelos o rocas.



**Figura 5.10:** *Dren profundo en taludes.*

*Fuente: (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016)*

## 5.5. Revisión de literatura

### 5.5.1. Manual de Carreteras Volumen 3

El Manual de Carreteras Volumen 3: “Instrucciones y Criterios de Diseño”, expone lo siguiente con respecto al sistema de drenaje y saneamiento.

El estudio hidrogeológico deberá anticipar las condiciones de infiltraciones que se encontrarán durante la construcción de la obra y su posterior operación.

Se deberá establecer un método de control de infiltraciones para de evitar el escurrimiento directo sobre las pistas de rodadura. Para esto el proyectista deberá diseñar métodos de control de infiltraciones y su posterior saneamiento o evacuación.

El control de infiltraciones puede efectuarse mediante revestimientos impermeables, ya sea a la vista o dentro del hormigón de revestimiento. Así mismo puede considerarse tomas directas de chorros específicos mediante barbacanas que son conducidas por medio de tuberías a canaletas de drenaje. El saneamiento de las infiltraciones se realizará por medio de drenajes o canaletas laterales ya sea a ambos lados del túnel o en un solo lado. Estos sistemas pueden ser cubiertos por una acera o enterrados y deben ser dimensionados para los caudales que resulten de un estudio de evaluación hidrogeológica.

Las zanjas de drenaje tendrán un mínimo de 0,5 m de profundidad y un ancho de 0,5 m en la base. Usualmente una zanja de drenaje continua en un costado del túnel es suficiente como obra de saneamiento.

En aquellos casos en que la obra cruce bajo brazos de ríos, mar, lagos u otros sistemas hídricos y que su diseño en alzado implique puntos bajos, siempre se deberá considerar el diseño de un pozo de captación para la instalación de equipos de bombeo que conduzcan las aguas al exterior.

### 5.5.2. Manual de Carreteras Volumen 6

El Manual de Carreteras Volumen 6: “Seguridad vial”, expone lo siguiente con respecto al sistema de drenaje y saneamiento.

Si se permite el transporte de cargas peligrosas, se deberán diseñar e instalar alcantarillas de ranuras bien diseñadas u otros dispositivos, situadas dentro de las secciones transversales de los túneles, que permitan el drenaje de líquidos tóxicos e inflamables. Además, el sistema de drenaje deberá diseñarse para sacar afuera de inmediato para su tratamiento los líquidos inflamables y tóxicos; y mantenerse de manera que se evite que el fuego y los líquidos inflamables y tóxicos se propaguen dentro del túnel o entre túneles paralelos.

### 5.5.3. Manual de Carreteras Volumen 7

El Manual de Carreteras Volumen 7: “Mantenimiento vial”, expone lo siguiente con respecto al sistema de drenaje y saneamiento.

Especial atención deben recibir las canaletas longitudinales a los pies de los hastiales y sus cámaras de decantación; deben siempre encontrarse limpias y en buen estado para evitar que las aguas alcancen la calzada o se infiltren en la base. Deben mantenerse limpios los desagües de la cuneta a las canaletas longitudinales, para evitar charcos de agua en el pavimento.

El programa de mantenimiento debe considerar las propiedades del agua, de manera que es aconsejable hacer un análisis anual de agresividad de las aguas infiltradas para establecer las posibilidades que induzcan deterioros en los hormigones.

Se recomienda programar la limpieza y mantenimiento del drenaje superficial con una frecuencia semestral.

### 5.5.4. Base de licitación concesión Américo Vespucio Oriente

La sociedad concesionaria será la única responsable de mantener todos los elementos y dispositivos que forman parte del sistema de drenaje y saneamiento del área de concesión conforme a las exigencias que se establecen en el presente artículo y en el plan de conservación de las obras y programa anual de conservación establecidos en las presentes bases de licitación. Para esto el concesionario deberá inspeccionar periódicamente dichas obras con el objeto de chequear su estado y funcionalidad.

El concesionario deberá cumplir las siguientes exigencias:

- a) Los elementos de drenaje deberán limpiarse, al menos, 2 (dos) veces al año.
- b) Los sistemas de drenaje y saneamiento (SDS) no deben registrar falta de elementos ni de los dispositivos necesarios para asegurar eficazmente el desagüe y drenaje de la vía.
- c) Cada SDS deberá estar siempre operativo, esto es:
  - No se debe observar sedimentos sobre la calzada y berma.
  - No se debe observar en los elementos accesibles destinados a la conducción de aguas, incluyendo alcantarillas y descargas de drenes y subdrenes, objetos que los obstruyan, alteren su sección normal u obstaculicen el libre escurrimiento de las aguas.
  - No se debe observar la presencia de objetos que impidan, obstaculicen o alteren el libre escurrimiento de las aguas en las entradas y las salidas de elementos o dispositivos del sistema de desagüe y drenaje, en la faja fiscal y hasta 50 metros aguas arriba y hasta 50 metros aguas abajo de los cauces de uso público o quebradas.

- No se debe observar evidencia de escurrimiento de aguas pluviales por cauces distintos a los diseñados para ello.
- No se debe observar basuras y desechos que obstruyan los sistemas de drenaje y saneamiento de la plataforma de la vía, entre otros: cunetas, soleras, embudos de bajadas de aguas.

d) Cada SDS debe estar estructuralmente estable, esto es:

- No se debe observar socavación en los cauces de entrada o salida o al interior de las obras de arte ni en los bordes de fosos, contrafosos y cunetas revestidas.
- No se debe observar quiebres ni daños en elementos de hormigón, que permitan filtraciones.
- No se debe observar alcantarillas metálicas con deformaciones que afecten su funcionalidad ni perforaciones o aberturas de juntas entre láminas que permitan filtraciones.
- No se debe observar alcantarillas socavadas.
- No se debe observar en las obras revestidas asentamientos ni socavaciones, ni daños del revestimiento, que permitan acumulaciones o filtraciones de agua.
- No se debe observar, en las obras de arte, falta de elementos, ni deformaciones transversales o longitudinales; tampoco roturas, grietas, abolladuras, asentamientos, enferradura a la vista en elementos de hormigón ni corrosión en elementos metálicos.

e) En el caso de una crecida hidrológica o evento aluvional que pudieran haber afectado las obras de saneamiento y drenaje, la sociedad concesionaria deberá restablecer las obras de drenaje y saneamiento afectadas al estado en que se encontraban antes del evento su entero cargo, costo y responsabilidad.

Entre los elementos que conforman el sistema de drenaje y saneamiento se consideran: obras de arte (alcantarillas y sifones), cunetas, sumideros, fosos, contrafosos y bajadas de aguas lluvia. En el programa anual de conservación se deberá programar la cantidad de obras necesarias para la conservación del sistema de drenaje y saneamiento, en coherencia con los inventarios de explotación, incorporados en el sistema BIM, que deben ser presentados en el plan de conservación de las obras.

En caso de un hecho fortuito, accidente u otro evento (actos vandálicos, hurtos) que dañara algún elemento del sistema de drenaje y saneamiento del proyecto, la sociedad concesionaria deberá reemplazarlo, a su entero cargo, costo y responsabilidad.

Cuando se detecte el incumplimiento de cualquiera de las exigencias establecidas en las letras a), b), e) y d) descritas precedentemente, el concesionario dispondrá de 7 días para subsanar el (los) incumplimiento(s). En caso señalado en la letra e) descrita precedentemente u otro hecho fortuito, (actos vandálicos, hurtos, desastre natural) el plazo será de 14 días.

## 5.6. Propuesta de evaluación del sistema de drenaje

Se evaluará que se cumplan las exigencias de estado físico y funcionalidad del sistema de drenaje y saneamiento, según el manual de inspección visual de activos de saneamiento y drenaje de carreteras elaborado por Arriagada y Echaveguren (2015). A continuación, se presenta un resumen del método de evaluación resaltando los puntos más relevantes del manual.

### 5.6.1. Activos de drenaje y saneamiento vial

Los diversos activos viales de drenaje y saneamiento cumplen la misma función en términos generales: permitir el paso de cauces sin afectar la vía y evacuar el agua de la vía respectivamente.

Se consideran cuatro grupos de activos:

- a) Activos de aguas superficiales, cuya función principal es trabajar con el agua de superficie, generalmente considerados en su diseño como canales abiertos.
- b) Activos para control de taludes, cuya principal misión es controlar la erosión en taludes por efectos del agua.
- c) Activos de aguas subterráneas, encargados de drenar el agua subterránea, evitando que esta afecte las bases de la estructura del pavimento.
- d) Activos de obras complementarias, que cumplen una función de apoyo para el correcto desempeño de otros activos, colaborando en eventos de crecidas mayores y/o capturando sedimentos, evitando así un colapso del sistema.

La tabla 5.1 agrupa los activos de drenaje y describe la función que cumplen dentro de cada grupo.

La tabla 5.2 presenta el tipo de activo, nombre, materialidad y código distintivo en función de la orientación, grupo al cual pertenece, nombre del elemento y materialidad.

La ficha de cada uno de los 18 activos de drenaje y saneamiento de carreteras se encuentran en el manual citado. Se hace notar que el activo “Carpeta de rodado” si bien ha sido considerado, asignándole un código de inspección (por ende, una ficha de activo), cuenta con un proceso de inspección propio, definido en el modelo.

### 5.6.2. Deterioros de activos de drenaje y saneamiento

Cuando se evidencia un deterioro en un activo, implica un daño de carácter físico u operacional, sin embargo, dependiendo de la severidad, será el grado de afectación que presente el activo. Se propone una clasificación de los deterioros, sin considerar el grado de afectación, sino solo el tipo de daño que originan al activo. En la tabla 5.3 se describen los cuatro tipos de deterioros con su descripción y algunos ejemplos.

Identificados los tipos de deterioros, la tabla 3.2 del Manual de inspección visual presenta los deterioros asociados a cada activo y su correspondiente materialidad.

**Tabla 5.1:** Grupos de activos de drenaje y saneamiento vial. (Arriagada and Echaveguren, 2015).

Grupo de activos	Descripción	Activos
Aguas superficiales	El drenaje superficial considera todas aquellas obras (activos viales) que actúan en la evacuación de aguas directamente en superficie, indistintamente de su origen evacuando flujos de la superficie de la vía o captando flujos para evitar que ingresen a la calzada causando desperfectos y/o riesgos de seguridad	Cuneta revestida, cuneta no revestida, solera y solera-cuneta, carpeta de rodado, alcantarilla con y sin muro de boca, sumidero y badén
Control de taludes	El objetivo de estas obras es evacuar los flujos rápidamente hacia zonas aptas para su recepción, impidiendo que estos modifiquen las condiciones mecánicas del terreno, evitando así problemas de erosión, debilitamiento del terreno y riesgos de deslizamientos	Descarga, foso y contrafoso, dissipador y revestimiento (de talud)
Aguas subterráneas	La infiltración y los fenómenos de transporte interno de flujos subterráneos de agua generalmente determinan un régimen interno de aguas subterráneas particular según su ubicación (ambiente), los cuales dependiendo de la estacionalidad (época del año), eventos de afloramientos y condiciones mecánicas (discontinuidades, grietas, fallas, estratos permeables, etc.) pueden incidir en la estabilidad del terreno (afectando las condiciones mecánicas del suelo y produciendo fenómenos erosivos desestabilizadores en las bases de la estructura). La función de este tipo de activos es impedir que ingresen estos flujos hacia la base del pavimento	Filtro sub superficial, dren longitudinal, pozo vertical de drenaje y batería de drenaje
Obras complementarias	Las obras complementarias tienen como finalidad colaborar con los demás activos de saneamiento y drenaje, protegiéndolos de la erosión por arrastre de material del cauce y almacenando caudal en eventos de crecidas, mitigando así los efectos físicos, mecánicos y medioambientales producto de estos eventos particulares	Aliviador de crecidas y zona de decantación

La significancia de un deterioro está en directa relación con su nivel de severidad, siendo esta el factor determinante que implica el curso de acción a recomendar; una mantención rápida, la rehabilitación de la estructura (parcial o total) o bien la reconstrucción completa del activo (considerando en esta fase, si es debido un cambio en el diseño original).

Las severidades se determinan según el nivel de afectación que experimente el activo producto del nivel de deterioro expuesto. Se consideran severidades de dos tipos: numéricas o discretas, definiendo umbrales o criterios para calificar la severidad en terreno.

Las severidades numéricas consideran la medida de una magnitud física específica del deterioro, la cual se asigna según umbrales predefinidos. Por ejemplo, la abertura de una grieta se considera de severidad baja si es menor a 6 mm, media si la grieta tiene entre 6 mm a 25 mm y alta si la abertura es mayor a 25 mm.

Las severidades discretas tienen relación con la apreciación visual del estado del elemento, quedando a consideración del inspector, si se cumplen las características que describen el nivel respectivo. Por ejemplo, se considera para el deterioro abrasión del activo cuneta revestida de materialidad geotextil una severidad baja si se observa abrasión leve del material, severidad media si se observan roturas en la superficie del material y severidad alta si se evidencia la pérdida total del recubrimiento de geotextil.

**Tabla 5.2:** Códigos de activos de drenaje y saneamiento vial. (Arriagada and Echaveguren, 2015).

Tipo de Activo	Nombre	Materialidad	Código
Aguas superficiales	Cuneta revestida	Hormigón	L-S-CR-H
		Geotextil	L-S-CR-G
	Cuneta no revestida	Terreno natural	L-S-CNR-TN
	Solera y Solera-Cuneta	Hormigón	L-S-SSC-H
	Carpetas de rodado	Hormigón	L-S-SR-H
		Asfalto	L-S-SR-A
		Ripio	L-S-SR-R
		Terreno natural	L-S-SR-TN
	Alcantarilla sin muro de boca	Tubo de metal corrugado	T-S-ASM-MC
		Tubo de hormigón	T-S-ASM-H
		Polietileno de alta densidad (HDPE)	T-S-ASM-HDPE
	Alcantarilla con muro de boca	Tubo de metal corrugado	T-S-ACM-MC
		Tubo de hormigón	T-S-ACM-H
Sumidero	Hormigón	T-S-S-H	
Badén	Varios	T-S-B-V	
Control de taludes	Descarga	Tubo de metal corrugado	T-T-DTC-MC
	Foso y Contrafoso	Hormigón	L-T-F-H
	Disipador	Hormigón	T-T-D-H
	Revestimiento	Varios	L-T-R-V
Aguas Subterráneas	Filtro sub superficial	Geotextil	L-AS-FS-G
	Dren longitudinal	Tubo de cloruro de polivinilo (PVC)	L-AS-DL-PVC
	Pozo vertical de drenaje	Áridos	T-AS-PVD-A
	Batería de drenaje	Tubo de cloruro de polivinilo (PVC)	T-AS-BD-PVC
Obras Complementarias	Aliviador de crecidas	Terreno natural	T-OC-AC-TN
	Zona de decantación	Terreno natural	T-OC-ZD-TN

### 5.6.3. Metodología de inspección visual propuesta

La metodología de inspección considera el modelo de cuatro etapas expuesto en la figura 5.11, el cual considera en la etapa de “Pre-Inspección” los antecedentes de activos y deterioros expuestos anteriormente. En la etapa de “Inspección” se consideran los protocolos de trabajo en terreno que incluyen la confección de un inventario de la vía y el procedimiento de inspección. La etapa de “Análisis” considera los cálculos necesarios para realizar la calificación de activos con los resultados de la inspección. Finalmente, en la etapa de “Informe” se comunican los resultados de la inspección visual realizada considerando la priorización de mantenimiento sugerida luego del análisis de los activos de saneamiento y drenaje estudiados.

**Tabla 5.3:** Tipos de deterioros de activos de drenaje y saneamiento. (Arriagada and Echaveguren, 2015).

Tipo de deterioros	Descripción	Deterioros
De desgaste	Implican una pérdida de material de recubrimiento o un debilitamiento del material de la estructura. Generalmente se debe a una erosión excesiva debido al tiempo prolongado de servicio de la estructura. Los mecanismos de deterioro dependen de la materialidad de la estructura, pudiendo ser estos producidos por efectos químicos o mecánicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oxidación</li> <li>- Abrasión</li> <li>- Presencia de finos</li> </ul>
De contorno	Deterioros que implican deformaciones y/o desplazamientos elevados de las bases de fundación de las estructuras. Las causas pueden ser atribuidas a problemas de drenaje en la superficie. Sin embargo también se debe considerar las condiciones mecánicas propias del terreno, las cuales pueden manifestar inestabilidad tiempo después de concluida la construcción. El mecanismo de deterioro implica un desplazamiento excesivo del terreno aledaño, lo cual repercute en una pérdida de la capacidad de soporte del suelo de fundación, provocando la posterior deformación, desplazamiento o fracturamiento de la estructura soportada	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Socavación</li> <li>- Deslizamiento</li> <li>- Exposición al tráfico</li> </ul>
Estructural	Daño de origen mecánico en la estructura que implique una disminución en la capacidad de resistencia estructural del elemento. Puede estar localizado en cualquiera de los elementos constitutivos del activo, como su base, superficie interna o externa y/o estructura de refuerzo. Las causas pueden ser resultado de solicitaciones externas mayores a las consideradas en diseño o fallas constructivas que se evidencian a largo plazo. El mecanismo de falla generalmente implica una rotura o separación de alguna de alguna sección de la estructura principal, pudiendo incluso quedar expuesta la estructura interior de refuerzo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grietas</li> <li>- Deformaciones</li> <li>- Fracturamientos</li> <li>- Baches</li> <li>- Pendiente de diseño</li> <li>- Rotura</li> <li>- Abolladura</li> </ul>
Funcional	Son los deterioros que limitan la capacidad funcional del elemento, lo que se refleja en una menor capacidad de evacuar flujos y/o impedir el ingreso de agua a la vía. Las causas más comunes de este tipo de deterioro se deben a obstrucciones de la sección transversal del activo y/o la imposibilidad física para cumplir su función principal por discontinuidades en su trazado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obstrucciones</li> <li>- Sedimentación</li> <li>- Perdida del sello</li> <li>- Escalonamientos</li> <li>- Pendiente inversa</li> </ul>



**Figura 5.11:** Proceso general de inspección de activos.

Fuente: (Arriagada and Echaveguren, 2015)

#### 5.6.4. Calificación del estado de activos inspeccionados

Los índices necesarios en el procedimiento de calificación de estado son: Importancia relativa del activo (I), Afectación del deterioro  $i$  ( $A_i$ ) y Severidad  $j$  (Baja, Media o Alta) del deterioro  $i$  ( $S_{ij}$ ). Fueron determinados de una consulta realizada a profesionales de la Subdirección de Mantenimiento de la Dirección de Vialidad y de las Direcciones Regionales de Vialidad.

Para obtener el índice I (importancia relativa del activo) se consultó qué activos de saneamiento y drenaje de carreteras son esenciales en la operación de la vía, considerando como esenciales aquellos que deben mantenerse siempre operativos. Además se consultó sobre que activos pueden considerarse menos importantes, entendiendo estos como aquellos activos cuyo mantenimiento no es necesario efectuar en el corto plazo. Valores numéricos disponibles en Anexo 5.1 del Manual de inspección visual.

El índice  $A_i$  (afectación del deterioro  $i$ ) se obtuvo de la importancia asignada a los grupos de deterioros, que según sus efectos son:

- a) Desgaste: disminución en las capacidades físicas de los materiales (por ejemplo: abrasión, oxidación).
- b) Funcionales: pérdida de la capacidad funcional de la estructura (por ejemplo: obstrucción, desgaste de sellos).
- c) Estructurales: disminución de la capacidad resistente de la estructura (por ejemplo: grietas, deformaciones).
- d) Contorno: deterioros en áreas aledañas a la estructura, disminuyendo la capacidad de soporte del terreno (erosión, desplazamientos).

Valores numéricos disponibles en Anexo 5.2 del Manual de inspección visual.

La severidad de cada deterioro, considerada con el índice  $S_{ij}$ , se definió según los valores extremos (severidad baja y alta) indicados para cada deterioro representativo de cada grupo de deterioros, extrapolando el valor intermedio entre ambos resultados (severidad media). Valores numéricos disponibles en Anexo 5.2 del Manual de inspección visual.

#### 5.6.4.1. Procedimiento de calificación del estado de activos

Para llevar a cabo la calificación, se consideran dos etapas, primero se obtiene para cada deterioro un ponderador de deterioro ( $PD_i$ ), valor que agrupa los índices  $A_i$  y  $S_{ij}$  según haya sido identificado el deterioro y la severidad en la inspección visual. Luego se calcula el ponderador del activo (PA) que considera la importancia del activo y los ponderadores de deterioros del activo. Finalmente se obtiene la calificación de estado (CE) de cada activo normalizando los ponderadores de activos obtenidos. El procedimiento numérico para cada etapa es:

1.- Ponderador del Deterioro:

$$PD_i = A_i S_{ij}$$

Donde:

- $PD_i$  : Ponderador del deterioro i.  
 $A_i$  : Índice de afectación del deterioro i.  
 $S_{ij}$  : Índice de severidad j del deterioro i. (Con j: Baja, Media o Alta)

2.- Ponderador del Activo:

$$PA = I \sum PD_i$$

Donde:

- $PA$  : Ponderador del activo  
 $I$  : Índice de importancia relativa del activo.  
 $PD_i$  : Ponderador del deterioro i.

3.-Calificación del estado de activos:

$$ICSD_a = PA \frac{1}{MAX(PA)}$$

Donde:

- $ICSD_a$  : Índice de condición para cada activo.  
 $PA$  : Ponderador del activo.  
 $MAX(PA)$  : Mayor valor numérico de PA.

De esta manera es posible obtener una escala relativa de evaluación en función del activo con peor desempeño, lo que entrega una medida de cuales activo intervenir en primera instancia, es decir los activos con ICSD cercanos a uno.

### 5.6.5. Propuesta de evaluación global

Para la evaluación total del sistema de drenaje se clasifican los túneles en función de su longitud, si la longitud del túnel es menor a 1000 [m], entonces se asume un único tramo, en caso contrario, es decir, túneles con longitud mayores a 1000 [m] se evalúan tramos de 200 [m], de acuerdo a la siguiente expresión:

$$ICSD_{tramo} = \frac{\sum_{a=1}^n I_a \cdot ICSD_a}{\sum_{a=1}^n I_a}$$

Donde:

- $ICSD_{tramo}$  : Índice de condición del tramo evaluado.
- $ICSD_a$  : Índice de condición para cada activo.
- $I_a$  : Índice de importancia relativa del activo.
- $n$  : Numero de activos en el inventario.

**Tabla 5.4:** Nivel de desempeño del índice de condición de saneamiento y drenaje

Niveles de Desempeño				
Muy Bueno	Bueno	Justo	Malo	Muy Malo
<b>Rango del Índice de Condición de Saneamiento y Drenaje</b>				
[0.0 – 0.2]	]0.2 – 0.4]	]0.4 – 0.6]	]0.2 – 0.4]	]0.8 – 1.0]

En caso de tener más de un tramo la evaluación global se calcula en base al porcentaje de tramos en cada categoría, como muestra la tabla 5.5:

**Tabla 5.5:** Escala de evaluación global sistema de drenaje y saneamiento.

		Porcentaje de tramos dentro de cada rango [%]				
		[0.0 – 0.2]	]0.2 – 0.4]	]0.4 – 0.6]	]0.2 – 0.4]	]0.8 – 1.0]
<b>Calificación del Indicador</b>	<b>Muy Bueno</b>	≥ 50	< 50	= 0	= 0	= 0
	<b>Bueno</b>	≥ 50		< 50	= 0	= 0
	<b>Justo</b>	100 %			= 0	= 0
	<b>Malo</b>	-		]0.0 – 5.0]	= 0	= 0
	<b>Muy Malo</b>	-		]0.0 – 10.0]	= 0	> 0

## 5.7. Conclusiones

- Evaluar sistema de drenaje y saneamiento mediante inspección visual periódica incorporando un índice de condición que reúna los resultados de los deterioros presentados en el momento y agrupándolos según la importancia que corresponda. Esto quiere decir que además de la conservación programada se monitorea constantemente la condición total del activo obteniendo de esta manera una evaluación global de este.
- En túneles de gran longitud, se dividir el sistema por tramos de igual importancia que aporten a la nota global, esto con el objetivo de exigir una conservación constante y minuciosa de los elementos.



# SISTEMA ELECTROMECAÁNICO

## 6.1. Introducción

El sistema electromecánico de un túnel corresponde a todos aquellos elementos que cumplen la función de transformar o generar la energía eléctrica para la infraestructura y que dependen de la concesionaria. Este sistema desempeña una de las labores más importantes del túnel ya que de él dependen el funcionamiento de la mayoría de los otros activos, es por este motivo que requiere especial análisis y cuidado.

El siguiente capítulo presenta un método de evaluación para el sistema electromecánico basado en las exigencias de los distintos volúmenes del manual de carreteras. Primero se hace una revisión bibliográfica de las exigencias encontradas, para luego dar paso a la propuesta evaluativa del sistema.

## 6.2. Estado de la práctica

El suministro eléctrico es diseñado de manera de proveer energía eléctrica continua sin cortes ni fallas. Esto se logra generando un proyecto que considere aspectos mínimos de seguridad y prevención frente a posibles fallas.

En general estudios incluidos en concesiones consideran al menos los siguientes aspectos:

- Solución del suministro eléctrico y proyecto de subestaciones, considerando dos fuentes independientes de suministro.
- Especificaciones técnicas de equipos de las subestaciones.

- Solución en planta de la distribución de fuerza del túnel y accesos, considerando la alimentación mediante dos fuentes independientes de suministro, como también considerando la alimentación desde cada subestación a la mitad longitudinal del túnel.
- Solución en planta de equipos de emergencia (grupos electrógenos).
- Especificación técnica grupo electrógeno.
- Especificación técnica tablero de transferencia automática.

Además, se especifican detalles con respecto a elementos como subestaciones, grupos generadores, sala de baterías, malla de tierra, canalizaciones de poder y control.

## 6.3. Revisión de literatura

### 6.3.1. Manual de Carreteras Volumen 3

No se estima necesario disponer de equipos de emergencia en el caso de túneles Tipo A, que cubren la gama de flujos de tránsito-distancia, según se ilustra en la Figura 3.801.202(4).A.

Todos los túneles de las categorías B y C, según lo establecido en la Tabla 3.801.202(4).A, requerirán disponer de abastecimiento de energía eléctrica a fin de alimentar los sistemas de iluminación, controles de operación y seguridad, y sistemas electromecánicos de ventilación, si ésta se requiere.

En general, en todos los túneles en que se requiera abastecimiento de energía eléctrica, deben consultarse dos fuentes de suministro, en donde una de ellas debe ser un grupo electrógeno de emergencia de potencia adecuada para alimentar la carga en condiciones de emergencia. Adicionalmente, debe existir un sistema de respaldo de energía instantáneo (baterías o UPS) en aquellos túneles que requieren respaldo instantáneo para equipos que no admiten el retardo de la partida del grupo electrógeno, donde se conectarán, por ejemplo: sistemas de control y comunicaciones, iluminación de emergencia antipánico, etc.

Las canalizaciones y aislaciones de cables en interiores de túneles deben ser de materiales cuya combustión produzca gases de baja toxicidad.

El equipamiento eléctrico debe estar constituido a lo menos por los siguientes equipos:

- Sub estación y su (o sus) correspondiente(s) transformador(es)
- Tableros eléctricos generales y/o centros de distribución de cargas
- Tableros eléctricos de fuerza y/o centros de control de motores
- Tableros eléctricos de alumbrado
- Sistemas eléctricos de emergencia:

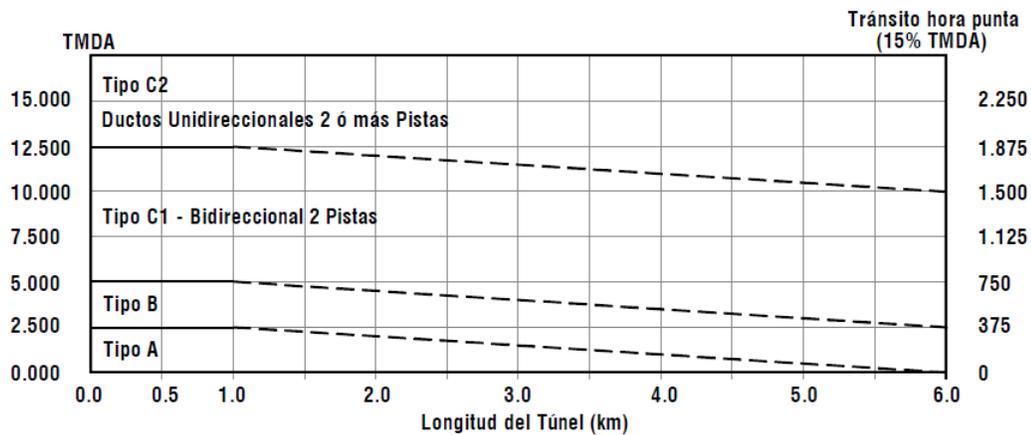


Figura 6.1: Clasificación de túneles según flujo vehicular y longitud.

Fuente: Manual de Carreteras Volumen 3

- Grupo electrógeno
- Sistema de respaldo instantáneo (banco de baterías o UPS).
- Equipos de iluminación

### 6.3.2. Manual de Carreteras Volumen 6

#### 6.3.2.1. Instalaciones electromecánicas

Los sistemas de suministro de energía eléctrica y agua potable deberán cumplir con lo establecido en el Tópico 3.805.2 Abastecimiento de Energía y de Agua del MC-V3.

Todos los túneles deberán disponer de un suministro eléctrico de emergencia capaz de garantizar el funcionamiento del alumbrado básico o de noche, del alumbrado de seguridad y del equipo de evacuación, esto durante el tiempo que sea indispensable para que todos los usuarios hayan evacuado el túnel.

Los circuitos eléctricos, de medida y de control estarán diseñados de tal manera que un fallo local no afecte el resto de los circuitos, debido, por ejemplo, a un incendio.

Estos equipos deben contar con una alimentación de respaldo mediante UPS “on line” (Unidad de potencia no Interrumpida), de modo que si, además, existe el apoyo de generador, al actuar este último no se produzca un apagón momentáneo de luces.

Los elementos de la Iluminación de Evacuación deberán estar ubicados y constituidos de manera tal que sean visibles en las condiciones más desfavorables. Además, deberán contar con una fuente de alimentación independiente de las fuentes que alimentan la iluminación normal y la de seguridad,

siendo altamente recomendable el uso de UPS (Unidad de Potencia no interrumpida) apoyadas con generador, con una duración de encendido autónomo superior al tiempo estimado necesario para evacuación.

### 6.3.3. Manual de Carreteras Volumen 7

**Abastecimiento de energía** El equipamiento típico para abastecer de energía un túnel está integrado por los siguientes elementos y equipos:

- Subestación de distribución
- Tablero general
- Centro de control de motores
- Energía ininterrumpida
- Red de puesta a tierra
- Tablero de distribución
- Grupos electrógenos
- Bancos de condensadores

Los equipos de alta tensión deben ser inspeccionados y mantenidos por personal autorizado por los organismos reguladores del estado; su mantenimiento preventivo debe ser anual.

Los equipos de baja tensión deben ser mantenidos por personal técnico, con cursos aprobados de seguridad referentes a riesgos eléctricos; su mantenimiento preventivo debe ser anual.

Los equipos de energía ininterrumpida son los que entregan energía a elementos vitales del túnel, en el lapso entre el corte de la red y el ingreso de la energía estable proveniente de los grupos electrógenos; su mantenimiento preventivo debe ser mensual.

Los motores de los grupos electrógenos deben mantenerse permanentemente calefaccionados, y los estanques de combustible deben estar dispuestos para que los equipos entreguen energía por 36 horas continuas. El mantenimiento preventivo de estos equipos debe realizarse quincenalmente.

La red de tierra debe ser mantenida en forma preventiva una vez al año; deben llevarse registros de las condiciones y anomalías detectadas, los que deben compararse con los anotados los años precedentes.

## 6.4. Propuesta de evaluación del sistema electromecánico

Se evaluará que se cumplan las exigencias de funcionalidad y mantenimiento preventivo del sistema electromecánico.

Entre los elementos que conforman el sistema electromecánico se consideran:

- Sub estación y su (o sus) correspondiente(s) transformador(es).
- Tableros eléctricos generales y/o centros de distribución de cargas
- Tableros eléctricos de fuerza y/o centros de control de motores
- Tableros eléctricos de alumbrado
- Sistemas eléctricos de emergencia:
  - Grupo electrógeno
  - Sistema de respaldo instantáneo (banco de baterías o UPS).
- Equipos de iluminación
- Equipos de ventilación

Se realizará una inspección y mantención de la instalación por una empresa externa especializada tras la que se emitirá un informe del estado de la instalación incluyendo todos los elementos mencionados anteriormente.

### 6.4.1. Periodicidad del mantenimiento

Los equipos deben ser mantenidos en el tiempo especificado por el fabricante o como mínimo según los siguientes periodos:

1. Los equipos de alta tensión deben ser inspeccionados y mantenidos por personal autorizado por los organismos reguladores del estado; su mantenimiento preventivo debe ser anual.
2. Los equipos de baja tensión deben ser mantenidos por personal técnico, con cursos aprobados de seguridad referentes a riesgos eléctricos; su mantenimiento preventivo debe ser anual.
3. Los equipos de energía ininterrumpida son los que entregan energía a elementos vitales del túnel, en el lapso entre el corte de la red y el ingreso de la energía estable proveniente de los grupos electrógenos; su mantenimiento preventivo debe ser mensual.
4. Los motores de los grupos electrógenos deben mantenerse permanentemente calefaccionados, y los estanques de combustible deben estar dispuestos para que los equipos entreguen energía por 36 horas continuas. El mantenimiento preventivo de los equipos debe realizarse quincenalmente.

5. La red de tierra debe ser mantenida en forma preventiva una vez al año; deben llevarse registros de las condiciones y anomalías detectadas, los que deben compararse con los anotados los años precedentes.

Además, los circuitos eléctricos definidos en las especificaciones técnicas no deberán presentar fallas eléctricas en ninguna zona específica del túnel.

#### **6.4.2. Conclusiones**

Se siguen las instrucciones y requisitos mínimos del Manual de Carreteras en torno a elementos que constituyen el sistema electromecánico y su respectivo mantenimiento. El sistema es evaluado mediante checklist es decir no se incluye en el modelo, por lo que el concesionario tiene la obligación de cumplir fiel y periódicamente con las pautas mínimas especificadas anteriormente.

## SISTEMA ESTRUCTURAL

### 7.1. Introducción

La estabilidad estructural de un túnel es una variable que raramente se pone en duda ya que siguiendo el proceso constructivo se llega a un equilibrio de deformaciones en donde el sistema estructural es el encargado de hacer perdurar dicha condición. Sin embargo, en numerosas ocasiones, tras periodos más o menos prolongados surgen dudas acerca del estado en que se encuentran los elementos, ya sea por haberse apreciado indicios de falla, pequeños desprendimientos, fisuras; o bien por asuntos de riesgo y prevención de parte de los responsables de la explotación.

En este capítulo se aborda el sistema estructural de túneles comenzando por una breve revisión del estado del arte, siguiendo con una explicación de la problemática, métodos de auscultación y recomendaciones nacionales e internacionales, finalmente se propone un método de medición del estado del sistema estructural para túneles chilenos.

### 7.2. Estado de la práctica

Actualmente en Chile el seguimiento de la estabilidad del túnel es una actividad que se considera innecesaria, ya que se da por hecho que una vez alcanzado el equilibrio de deformaciones la estructura permanecerá estable. De esta manera no está contemplado mantener un registro de deformaciones o labores de auscultaciones del sistema estructural, salvo en condiciones desfavorables como se describe a continuación.

“Una revisión y diagnóstico del estado de puentes y estructuras deben efectuarse en casos de sismos, crecidas hidrológicas u otros eventos que pudieran haber afectado la estabilidad de éstos y se deberán ejecutar obras de mantenimiento o reparaciones que se desprendan del análisis”(Coordinación General de Concesiones, 1997).

De esta manera no existen bases o directrices que fijen los lineamientos en una política de prevención ante posibles fallas en el sistema estructural.

## 7.3. Sostenimiento estructural de un túnel

### 7.3.1. General

La excavación de cualquier obra subterránea en suelos o roca provoca una alteración en el estado tensional inicial del terreno, lo que se traduce en un campo de desplazamientos hacia la zona excavada cuya magnitud depende de diversos factores, tanto asociados a la naturaleza de los materiales como al procedimiento de excavación, al método constructivo elegido y a la rigidez del sistema de sostenimiento del terreno. En consecuencia, el diseño de los sistemas y procesos de excavación debe contemplar estos desplazamientos para limitarlo dentro de parámetros admisibles por las propias obras y el entorno (Rodríguez and Alejano, 2012).

### 7.3.2. Estabilidad estructural

El concepto de estabilidad en un túnel implica que la excavación ha de preservar su forma y dimensiones y permanecer durante un periodo de tiempo definido en condiciones de plena operatividad. Se considera entonces que la excavación es estable cuando, durante su uso, su periferia (con o sin sostenimiento) está sujeta a desplazamientos menores que los permitidos por motivos técnicos, económicos o de seguridad;

La pérdida de estabilidad de una excavación es a menudo consecuencia de una excesiva concentración de tensiones en el macizo rocoso en las cercanías de la excavación, sobrecarga de los elementos de sostenimiento o un deterioro en las propiedades de deformación y resistencia de la roca. La ocurrencia de cualquiera de estos factores puede ser causada por:

- Localización inadecuada de la excavación respecto al buzamiento y dirección de los estratos.
- Inadecuada selección de la forma y dimensiones de la sección transversal.
- Ausencia de sostenimiento cuando este es necesario.
- Efecto nocivo de las excavaciones o minados adyacentes.
- Instalación deficiente del sostenimiento.

- Empleo de un sistema de sostenimiento inconveniente.
- Efectos negativos producidos por pilares, macizos remanentes de capas dejados por encima o debajo de la excavación.
- Efectos dinámicos como terremotos, explosiones de polvo de carbón o gas, etc.
- Cambios bruscos en las condiciones térmicas en el macizo que rodea a la excavación.

### 7.3.3. Auscultación

Para las obras subterráneas proyectadas se considera un aspecto fundamental establecer un sistema de auscultación, sencillo, preciso y eficaz. La finalidad de los sistemas de auscultación será controlar los movimientos de las propias obras en ejecución así como el grado de influencia en el entorno, durante las distintas fases de construcción y poder asegurar su adecuación a las hipótesis y modelos de cálculo adoptados durante la fase de diseño.

Existe un gran variedad de equipos y versiones, en función de las variables que miden se pueden clasificar en:

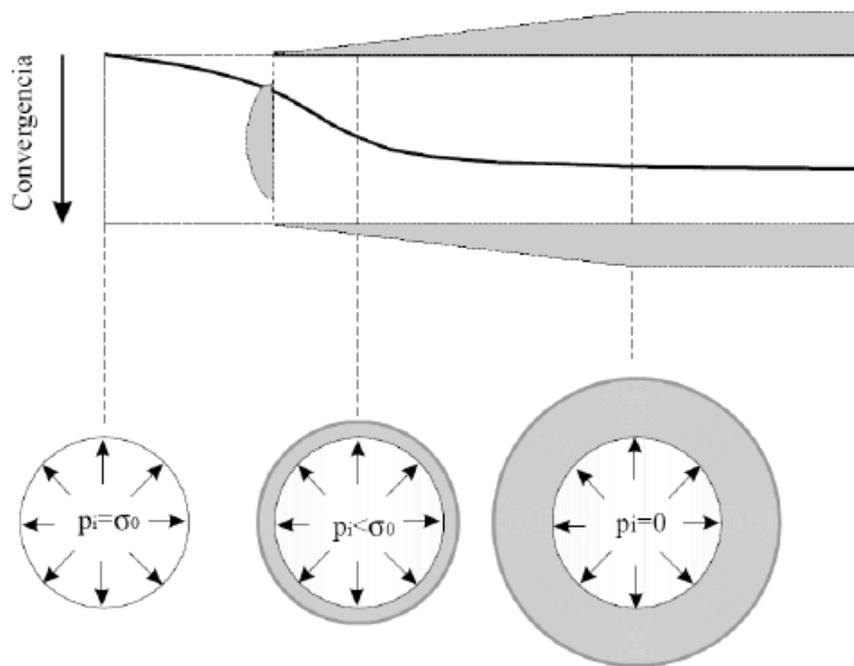
- Inclinación
- Extensión
- Grietas y sistemas estructurales
- Carga
- Presión
- Asentamientos
- Temperatura
- Inclinación puntual
- Agua

Durante el proceso constructivo existe la necesidad de controlar deformaciones debido al cambio constante en el nivel de tensiones del macizo rocoso, sin embargo una vez finalizada la obra la estructura adquiere estabilidad de deformaciones.

### 7.3.4. Convergencia-confinamiento

Uno de las formas sencillas para medir la condición estructural del macizo rocoso es el método de las curvas convergencia-confinamiento, el cual se explica brevemente a continuación con el objetivo de entender los problemas asociados al sostenimiento de túneles.

El problema del comportamiento tridimensional del macizo rocoso alrededor de una excavación se trata como un problema de deformación plana de una sección transversal tipo bajo la influencia de una disminución continua de la tensión radial que se ejerce sobre las paredes de la excavación desde el valor inicial  $\sigma_o$  hasta cero. El estado de tensión radial nula en la pared se produce cuando no se coloca sostenimiento y la sección no está afectada por el efecto de confinamiento del frente. Se ha podido mostrar, con una buena aproximación, que la proximidad del frente es equivalente desde el punto de vista mecánico, a la aplicación de una presión de sostenimiento ficticia (presión interna)  $p_i$ . El estado inicial por delante del frente, y a una distancia suficiente para poder despreciar su influencia, corresponde a  $p_i = \sigma_o$ . A medida que la excavación se aproxima,  $p_i$  disminuye progresivamente desde  $\sigma_o$  hasta 0; el desplazamiento radial de las paredes crece igualmente y por lo tanto hay convergencia figura 7.1.

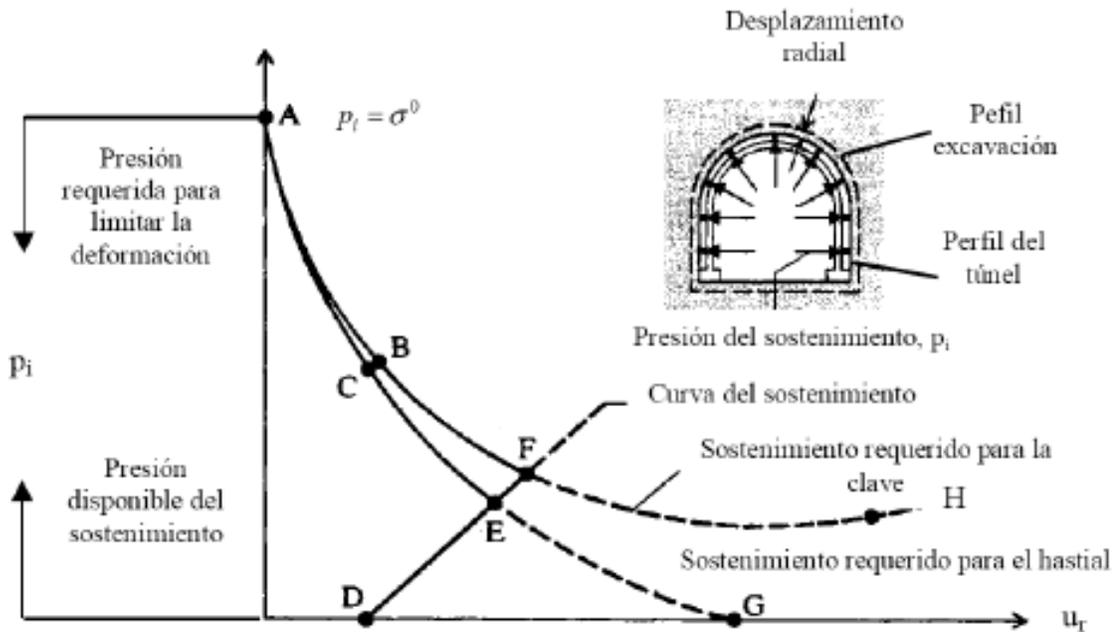


**Figura 7.1:** Sección transversal de un túnel. Variación de la presión interna  $p_i$  y convergencia.

Fuente: (Rodríguez and Alejano, 2012).

La curva que muestra la tensión radial ficticia  $p_i$  y el desplazamiento radial  $u_r$  en la pared de la excavación caracteriza el comportamiento del macizo rocoso y se conoce como curva característica del

terreno (Ground Reaction Curve, GRC) en un punto de la pared del túnel. Su aspecto depende de la ley de comportamiento del terreno, de la forma de la sección y del estado tensional inicial. Un ejemplo de curva característica del terreno lo tenemos en la Figura 7.2



**Figura 7.2:** Curva característica del macizo rocoso (techo y hastiales) y curva característica del sostenimiento.

Fuente: (Rodríguez and Alejano, 2012).

Por otro lado, el sostenimiento es una estructura donde el comportamiento mecánico se puede expresar como relación entre la presión interna y el desplazamiento correspondiente en lo que se conoce como curva característica del sostenimiento (Support Characteristic Curve, SCC). En la Figura 7.3 se muestra un ejemplo.

La representación de ambas curvas (GRC y SCC) es la que se muestra en la Figura 7.4. En esta figura podemos observar dos tipos de sostenimiento. El de tipo A sería suficiente para sostener el túnel; pero el de tipo B no soportaría los esfuerzos a los que estaría sometido.

Finalmente se puede concluir a groso modo que excavar túneles consiste en poner el sostenimiento adecuado, a la distancia adecuada del frente, aliándose con las fuerzas de la naturaleza para que el macizo rocoso retome la mayor parte de la energía liberada.

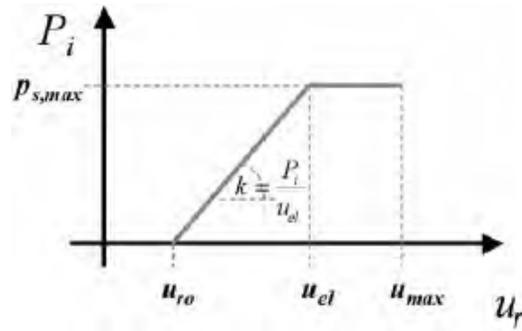


Figura 7.3: Ejemplo de curva característica del sostenimiento.

Fuente: (Rodríguez and Alejano, 2012).

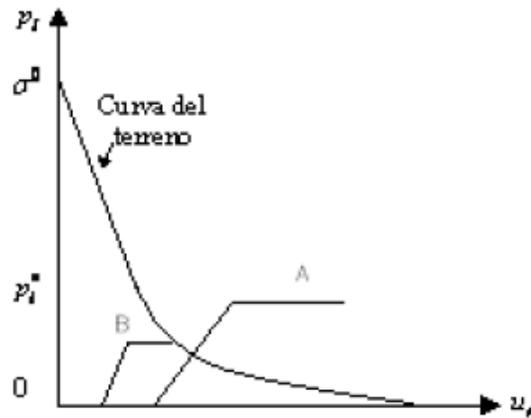


Figura 7.4: Representación conjunta de una curva GRC y dos SCCs.

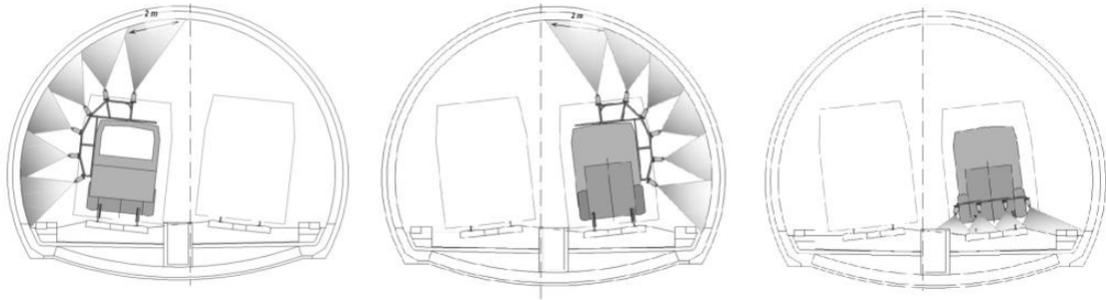
Fuente: (Rodríguez and Alejano, 2012).

## 7.4. Metodos y equipos de medición

### 7.4.1. Tunnelings

Tunnelings es un novedoso sistema para la inspección del revestimiento de túneles, que permite levantamientos de alta resolución a velocidades de hasta 30 km / h. Esta capacidad de evaluación rápida de la condición del túnel permite realizar inspecciones largas de túneles con regularidad y ayudar a la ingeniería geotécnica y la gestión de túneles, lo que permite el mantenimiento preventivo y operativo de grandes infraestructuras. Tunnelings utiliza varias unidades de cámaras láser y adquiere imágenes de alta intensidad y perfiles 3D con una profundidad de precisión de 0,5 mm y una resolución longitudinal y transversal de 1 mm (Gavilán et al., 2013).

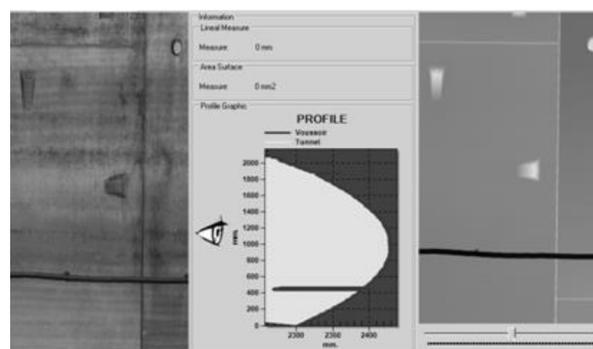
Las unidades de cámaras láser pueden instalarse en un camión todo terreno bimodal (carretera-ferrocarril) que proporciona velocidades de desplazamiento rápidas y flexibilidad para hacer frente a diferentes tipos de túneles e infraestructuras. Además, también se pueden instalar en otros tipos de vehículos, así como en un vagón de ferrocarril estándar (figura 7.7).



**Figura 7.5:** Diagrama de la instalación de las cámaras para inspección de muros y vías férreas.

Fuente: (Gavilán et al., 2013)

Un software basado en visión por computadora ayuda a evaluar la condición del túnel (figura), permitiendo la detección de grietas y áreas con falta de revestimiento o astillado, humedad y agua corriente, áreas con segmentos mal ensamblados, bordes sobresalientes y mano de obra deficiente, así como evaluación de instalaciones de túneles. La información 3D precisa proporcionada permite ubicar desplazamientos relativos entre segmentos ensamblados (en dirección longitudinal y transversal) y deformaciones para evaluar. Se puede llevar a cabo rápidamente una comparación de varias inspecciones en el mismo túnel. También se pueden evaluar los cambios estructurales y la evolución de los defectos del revestimiento (figura ).



**Figura 7.6:** Secciones transversales del revestimiento obtenidos de la información de datos 3D disponible. La imagen del centro corresponde al perfil, la del lado derecho es 2D y la del lado izquierdo es 3D.

Fuente: (Gavilán et al., 2013)

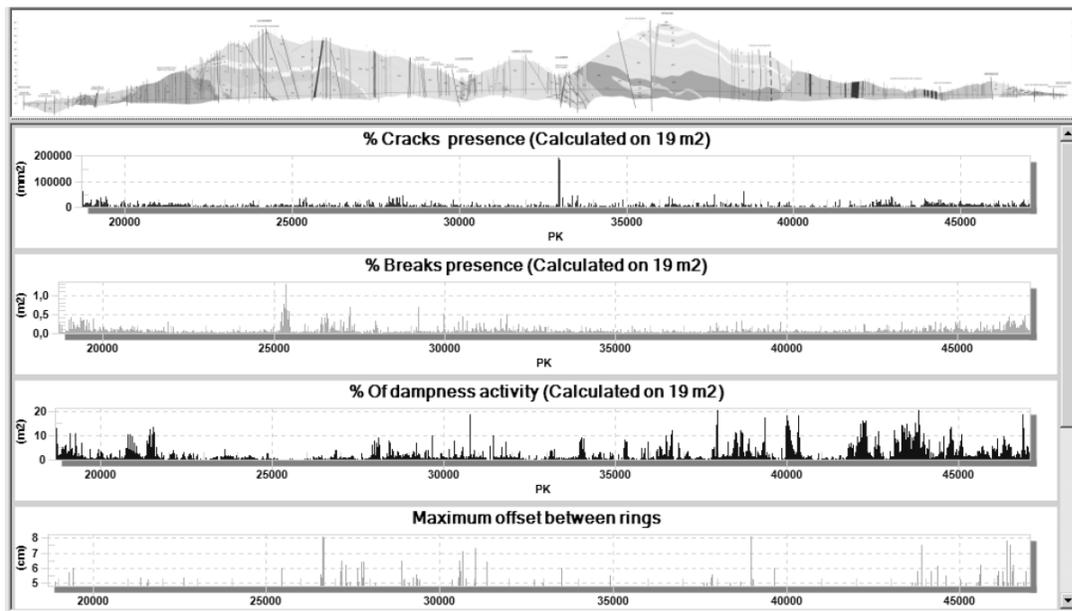


Figura 7.7: Gráfico de estadísticas.

Fuente:(Gavilán et al., 2013)

## 7.4.2. Técnicas geofísicas

Existen varias técnicas geofísicas que se pueden aplicar para realizar una inspección de túneles. Según la técnica empleada y las características del sostenimiento será posible realizar un control, continuo o puntual, del espesor de hormigón, verificar la calidad de éste (existencia de una capa dañada, detección y caracterización de grietas, detección de las zonas de humedad) y tener información sobre el terreno situado en el entorno de la excavación (Geocontrol, S.A., 2000). Las principales técnicas que se vienen utilizando para la inspección de túneles son:

- El georradar
- Métodos de ultrasonidos
- La prospección geo eléctrica

### 7.4.2.1. Georradar

La técnica del georradar es idéntica a la empleada desde tierra para la detección de objetos que navegan en el espacio. En el georradar, el emisor y el receptor constituyen una unidad en la que la frecuencia de las radiaciones electromagnéticas condicionan la penetración de las ondas en el terreno,

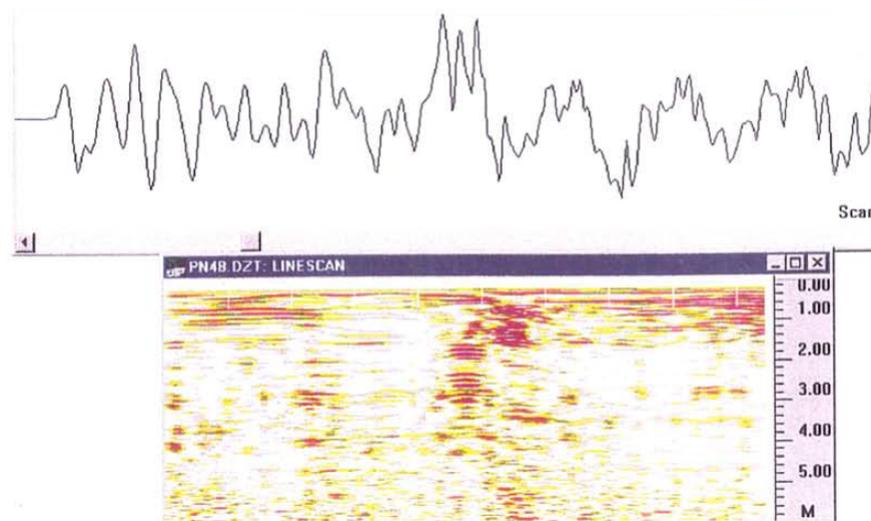
esto es, cuanto mayor sea la frecuencia de la radiación, mayor atenuación sufre al propagarse por el medio correspondiente y por tanto su penetración es menor.

### Fundamento del método

Básicamente, la utilización del georradar supone la emisión mediante una antena, de una onda electromagnética que penetra en el material a analizar, su reflexión es recogida por la antena receptora, íntimamente en contacto con este material. De esta forma se registra una señal que, una vez analizada permite detectar los cambios de materia, huecos o singularidades existentes en el interior del terreno sobre el que se desplaza el emisor-receptor.

Desde un punto de vista práctico, moviendo la antena en paralelo con la superficie, a lo largo de una alineación determinada, se puede obtener un perfil del terreno en profundidad.

En la figura 7.8 se muestran unas señales típicas emitidas y recibidas por el georradar al desplazar la antena. El pulso emitido por el georradar se refleja, en primer lugar, en la superficie del material y posteriormente en cualquier discontinuidad que encuentre al propagarse por éste, siempre que exista un contraste de conductividad dieléctrica apreciable.



**Figura 7.8:** Imagen de un impulso de radar y sus reflexiones en terreno.

*Fuente: (Geocontrol, S.A., 2000).*

Debido a la alta frecuencia de las señales emitidas por el georradar, que van desde 16 a 2 GHz, su atenuación es muy rápida y por lo tanto, la profundidad del terreno a la que pueden penetrar estas señales produciendo ecos interpretables, está limitada.

El comportamiento seguido por un impulso al penetrar en el terreno depende de los parámetros que se describen a continuación.

La **conductividad eléctrica** es la medida de la facilidad de paso que encuentra un impulso electromagnético al atravesar un material, y que se expresa numéricamente como el inverso de la resistividad. Su unidad en el S.I es el Siemens/m.

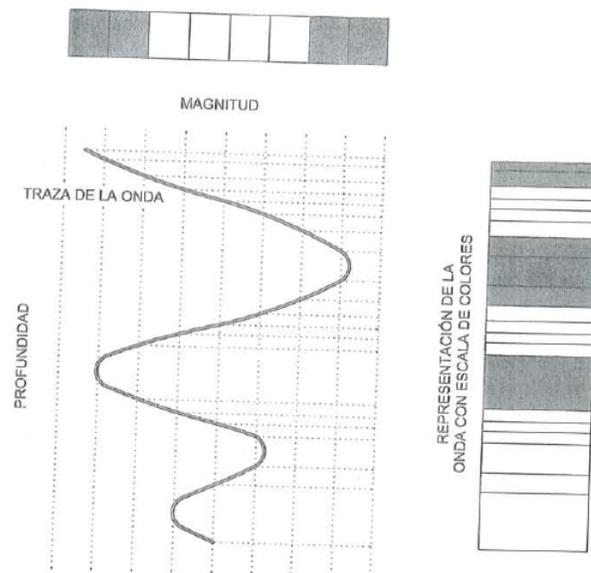
La **constante dieléctrica** es la magnitud física en la que se basa el georradar y representa la permitividad al paso de un impulso electromagnético con respecto a la permitividad que presenta el vacío, y, por tanto, se expresa con un factor adimensional. En la práctica esta constante depende de la conductividad eléctrica y del espesor de material atravesado.

La utilización del georradar se fundamenta en las reflexiones inducidas sobre un impulso electromagnético al pasar de un material a otro, entre los que existe un contraste de sus respectivas constantes dieléctricas.

La **velocidad de propagación** de una onda electromagnética depende del material atravesado y de la frecuencia de la señal emitida. En general, esta velocidad es mayor en el aire o en materiales secos, que en agua o materiales húmedos.

El **coeficiente de atenuación** del material expresa la pérdida de energía que sufre la señal emitida, al atravesar el medio de transmisión. La unidad en la que se mide es el dB/m. Este coeficiente aumenta con: el contenido en agua, y el contenido de partículas metálicas.

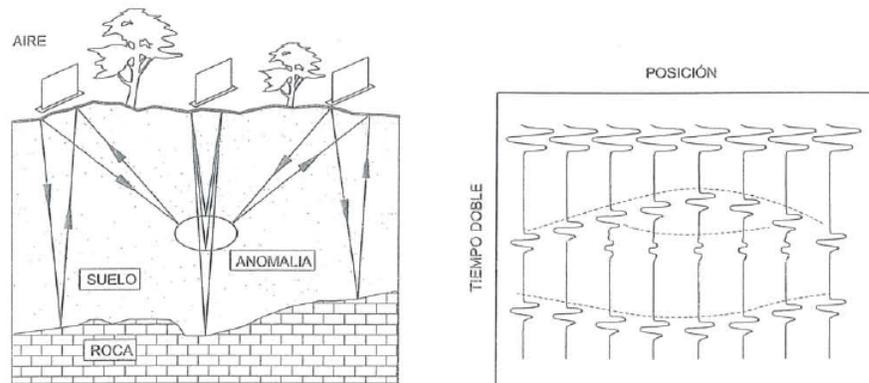
Las ondas medidas pueden ser representadas de dos maneras: como trazas, o bien utilizando escalas de color. En la figura 7.9 se muestra la relación entre ambas.



**Figura 7.9:** Representación por escala de colores

Fuente: (Geocontrol, S.A., 2000).

El fundamento de la detección de anomalías (huecos, bolos...) y de la caracterización de los diferentes reflectores se ilustra en la figura 7.10.



**Figura 7.10:** Ilustración del proceso de toma de datos y la sección de reflexiones resultante.

*Fuente: (Geocontrol, S.A., 2000).*

### Aplicaciones para el control de sostenimiento

El georradar tiene la ventaja de realizar perfiles continuos, rápidos (velocidad de una persona caminando). Además, para la auscultación de túneles, las antenas utilizadas son de alta frecuencia (de 900 MHz a 2 GHz) por lo que el tamaño de estas es muy reducido.

#### Control del espesor del hormigón

Para el control del espesor del hormigón con georradar es preciso considerar el tipo de sostenimiento utilizado: mallazo, cerchas, utilización de fibras de acero... y las características dieléctricas del terreno situado detrás.

Antes de cualquier exploración con georradar es preciso extraer una muestra del hormigón y del terreno situado detrás para comprobar la existencia de un contraste dieléctrico entre los dos materiales que producirá las reflexiones de las ondas al paso de un material a otro. Además, esta muestra permitirá determinar la velocidad de las ondas electromagnéticas en el hormigón y así poder hacer la conversión de tiempo medido a espesor de hormigón.

A continuación se detallan los diferentes tipos de sostenimientos posibles y se comenta la efectividad del georradar en cada uno de estos casos.

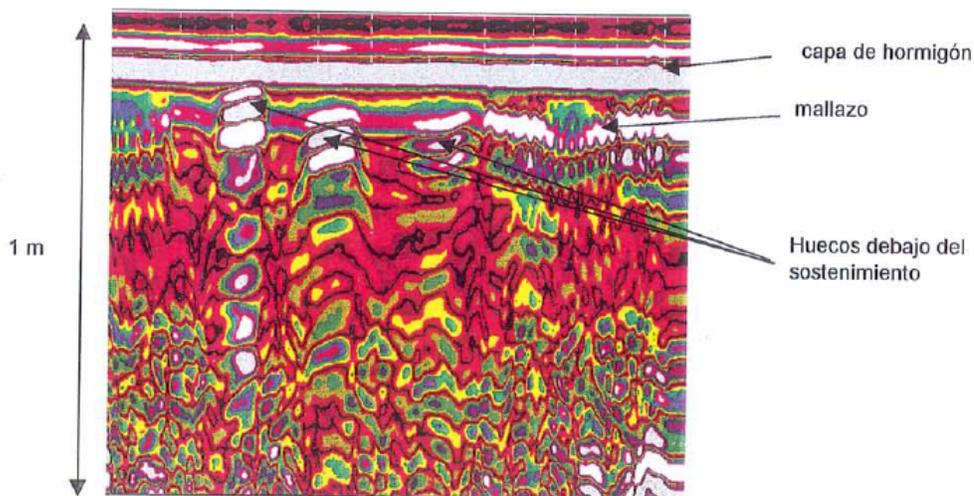
- Hormigón proyectado sin fibras de acero. Es la configuración más adecuada para el uso del georradar, que constituye entonces una herramienta muy rápida para el control del sostenimiento.
- Hormigón proyectado reforzado con fibras de acero. La presencia de una elevada densidad de fibras de acero provoca una fuerte atenuación de la señal, limitando así la profundidad de inves-

tigación a unos 20-30 cm, y crea difracciones que dificultan o impiden la interpretación.

- Hormigón proyectado sobre mallazo. Si la malla no es demasiado cerrada no existen problemas para el uso del georradar. Si se han utilizado varios mallazos solapados o con una malla inferior a 10x10 cm el mallazo puede actuar de pantalla. En este caso se conseguiría tener el espesor del hormigón, ya que el mallazo está entre el hormigón y el terreno, pero no se obtendría información sobre el estado del terreno.
- Hormigón proyectado con cerchas. En este caso se puede utilizar el georradar con la única limitación que se tiene que hacer perfiles discontinuos. En efecto al pasar de un conjunto hormigón/terreno a hormigón/metal con características dieléctricas muy diferentes el aparato pierde su sincronización. Por o tanto es preciso hacer perfiles sobre el hormigón y después realizar medidas puntuales sobre cada cercha.
- Hormigón proyectado con bulones. Al tratarse de un tipo de sostenimiento discontinuo no existe problema ninguno ya que la antena no tiene por que pasar sobre un bulón.

### Control de la calidad del sostenimiento

Si no existe limitaciones debidas al tipo de sostenimiento utilizado el georradar permite también estudiar el estado del terreno. Se puede así detectar posibles huecos situado detrás del sostenimiento como se muestra en la figura 7.11 pero también localizar zonas alteradas, ver fracturas de cierta entidad y, según los casos, ver las zonas con infiltraciones de agua.



**Figura 7.11:** Control de sostenimiento mediante georradar.

*Fuente: (Geocontrol, S.A., 2000).*

Sin embargo, con el georradar es muy difícil estudiar la calidad del hormigón y determinar la presencia de zonas dañadas dentro de éste.

**7.4.2.2. Método de ultrasonido**

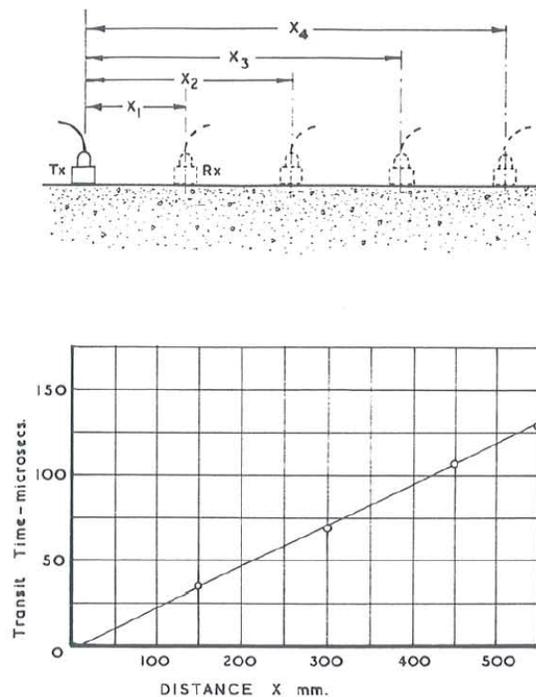
Este método se basa en la medida del tiempo de recorrido de las ondas ultrasónicas refractadas dentro de los materiales a estudiar.

**Fundamento del método**

Con este método se trata de determinar la velocidad de las ondas en los distintos medios y determinar las anomalías en los tiempos de llegada de la onda ya que éstas podrán ser asociadas a la existencia de zonas de hormigón alterado (velocidad menor), o a la presencia de grietas (retrasos en el tiempo de llegada).

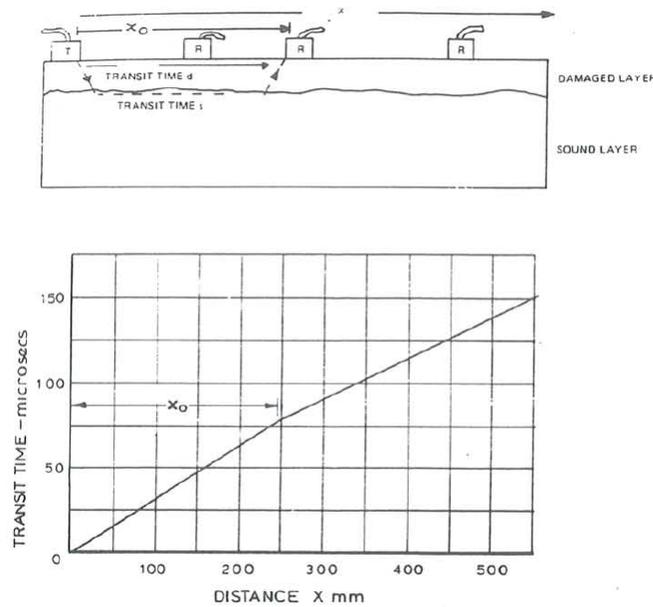
El equipo consta con dos palpadores, uno emisor y otro receptor. La toma de datos consiste en medir, para una misma posición del emisor, el tiempo de la primera llegada de la onda en función de la distancia emisor-receptor.

En la figura 7.12 se ilustra la toma de datos. Si existen dos materiales con velocidades de propagación distintas y crecientes con la profundidad, entonces, a partir de cierta distancia  $X_0$  entre los palpadores, las ondas que viajan por el segundo material llegarán antes de las que se desplazan por el material más superficial, figura 7.13.



**Figura 7.12:** Determinación de la velocidad de pulsación por el método superficial o indirecto.

Fuente: (Geocontrol, S.A., 2000).



**Figura 7.13:** Determinación de la capa de hormigón dañada por el método indirecto.

Fuente: (Geocontrol, S.A., 2000).

Por último, si existen grietas en el hormigón, el tiempo de primera llegada corresponderá a las ondas que han rodeado la grieta lo que implica un retraso en el tiempo de primera llegada proporcional a la profundidad de la grieta, como se muestra en la figura 7.14.

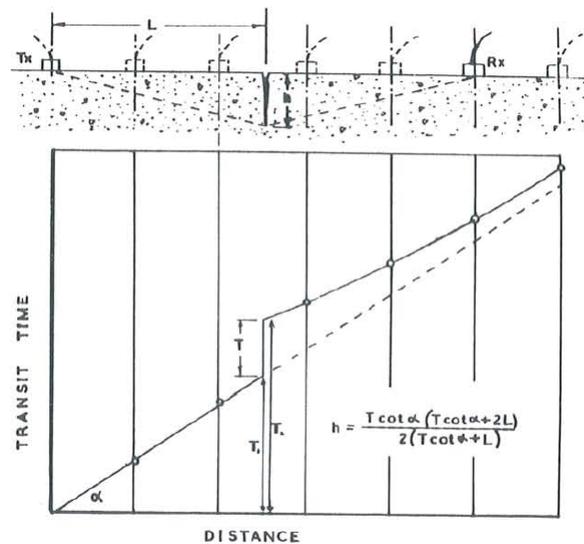
#### Aplicaciones para la auscultación de túneles

A partir de lo explicado anteriormente se deduce que este método puede ser utilizado para controlar:

- La homogeneidad del hormigón
- La presencia de huecos, grietas...
- Las alteraciones del hormigón debidas al tiempo, ataques químicos, acción del fuego...
- Espesores de hormigón

Para las dos primeras aplicaciones la única limitación reside en la precisión de las medidas, es decir la precisión del posicionamiento de los palpadores, que será función del tamaño de estos, y en la calidad del contacto entre los palpadores y el hormigón. Si éste es muy rugoso y los palpadores utilizados son de varios centímetros de ancho es entonces preciso poner una pequeña capa de yeso para tener una buena superficie de contacto.

Para las medidas de espesores, bien sea del hormigón o de la zona dañada la única limitación reside en la necesidad de tener una distribución de velocidades creciente con profundidad.



**Figura 7.14:** Determinación la profundidad de las grietas.

*Fuente: (Geocontrol, S.A., 2000).*

Esta condición se cumple siempre en el caso de estudio de una zona de hormigón dañado ya que la velocidad de éste es siempre inferior a la del hormigón sano. En el caso de la medida del espesor del revestimiento, dependerá del tipo de terreno en el que se realizó el túnel. Así pues, si se trata de un túnel en suelo no hay posibilidad de cumplir la citada condición por lo que el método no es válido. En el caso de túneles en roca, la velocidad del hormigón suele ser inferior a la de la roca, excepto si ésta presenta un elevado grado de alteración o fracturación.

A continuación, se presenta un ejemplo de un perfil realizado en una mina con hormigón proyectado con fibras de acero en un terreno calizo. Se realizaron dos perfiles en sentido inverso para tener más precisión y poder contrastar las medidas. En la figura 7.15 se muestran los resultados y se observa que existe un muy buen ajuste entre los espesores calculados y las medidas realizadas sobre los testigos.

#### 7.4.2.3. Métodos geoelectrónicos

Los métodos eléctricos que pueden ser utilizados para la auscultación de túneles son los microsondeos eléctricos verticales (S.E.V) y sobre todo la tomografía eléctrica que permite tener una imagen en dos dimensiones de la distribución de resistividad en un plan perpendicular a las paredes del túnel.

##### Fundamento del método

La técnica de los sondeos eléctricos tiene por objetivo estudiar la distribución de resistividad de los materiales del subsuelo en la vertical del punto de medida, basándose en la existencia de un contraste entre los valores de resistividad característicos de las diversas capas del terreno.

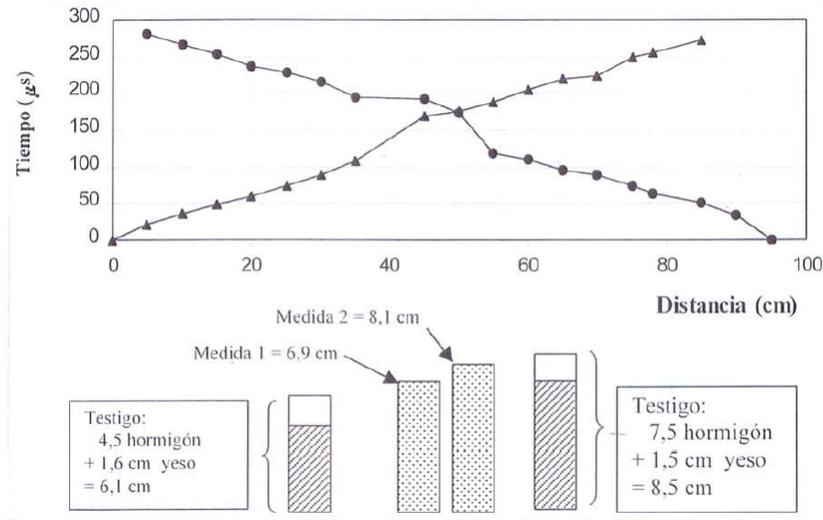


Figura 7.15: Medidas y resultados obtenidos en la medida de espesores de hormigón.

Fuente: (Geocontrol, S.A., 2000).

El modo de actuar consiste en mandar una corriente al subsuelo mediante dos electrodos, A-B, y se mide con otros electrodos, M-N la diferencia de tensión, que se atribuye al centro del dispositivo (punto de medida). Cambiando el espaciado entre los electrodos es posible medir la resistividad del suelo en la vertical de mismo punto a diferentes profundidades, obteniendo así un sondeo eléctrico vertical. En la figura X se ilustra la toma de datos mediante la técnica de S.E.V.

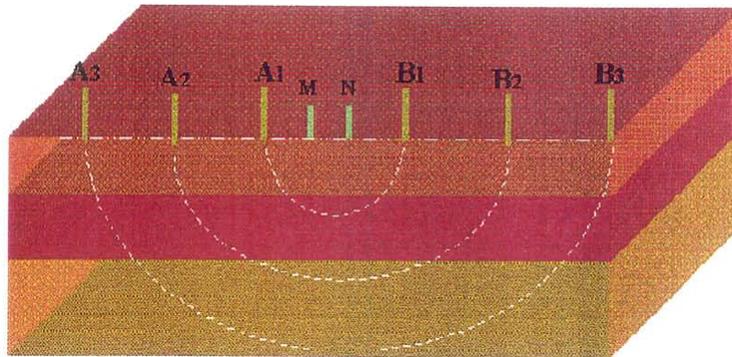
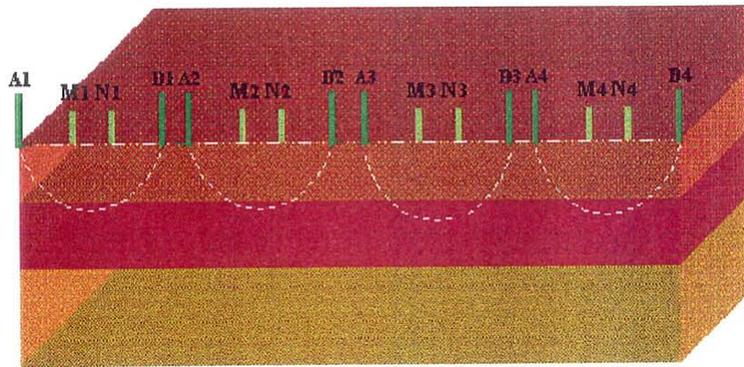


Figura 7.16: Dispositivo de medida para S.E.V.

Fuente: (Geocontrol, S.A., 2000).

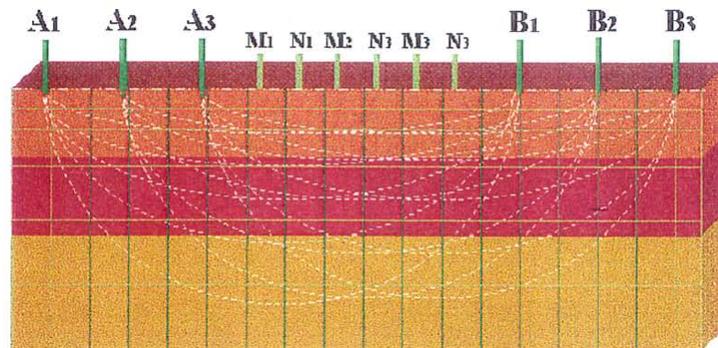
En la figura 7.17 se ilustra el proceso de toma de datos de las calicatas eléctricas donde se traslada el dispositivo para medir la resistividad del terreno a una profundidad constante.



**Figura 7.17:** *Dispositivo de medida para calicata eléctrica.*

*Fuente: (Geocontrol, S.A., 2000).*

La tomografía eléctrica consiste en la determinación de la resistividad de las distintas celdas en las que se puede dividir el terreno subyacente bajo un perfil determinado, mediante la utilización de calicatas eléctricas con múltiples dispositivos a lo largo de ese perfil. En la figura X se ilustra la toma de datos para la tomografía eléctrica.



**Figura 7.18:** *Dispositivo de medida para tomografía eléctrica.*

*Fuente: (Geocontrol, S.A., 2000).*

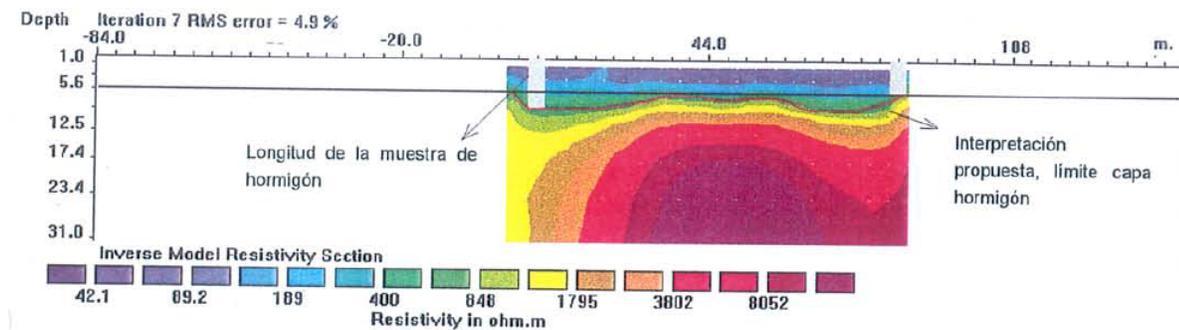
### Aplicaciones del método

El método de tomografía eléctrica puede ser utilizado para determinar el espesor, pero no permite controlar la calidad de este y permite estudiar cualitativamente la calidad del terreno situado detrás del hormigón (presencia de zonas húmedas).

La realización de un perfil tomográfico supone la realización previa de unos taladros cortos para colocar los electrodos.

Para que este método sea económicamente rentable es importante optimizar la fase de adquisición de datos ya que la cantidad de medidas necesarias es muy elevada. Así es preciso utilizar una regla para posicionar con precisión los electrodos, u disponer de un equipo multicanales para realizar numerosas medidas de manera automatizada.

En la figura 7.19 se presenta un ejemplo de perfil de resistividad obtenido por tomografía eléctrica para determinar espesores de hormigón proyectado, y sobreimpreso los espesores de hormigón medido sobre testigo, y la interpretación propuesta.



**Figura 7.19:** Sección de resistividad eléctrica calculada mediante tomografía eléctrica.

Fuente: (Geocontrol, S.A., 2000).

Como todo método geofísico existen ciertas limitaciones. La primera es que se necesita un contraste de resistividad entre el hormigón y el terreno. Además, para optimizar el dispositivo es necesario saber aproximadamente el rango de espesor de hormigón. Por último la resistividad del hormigón puede variar mucho en función de su composición, estado y grado de humedad. Por estas razones es necesario para utilizar este método extraer previamente algunos testigos de hormigón y del terreno para medir sus propiedades eléctricas y así ver si el método puede ser utilizado y diseñar un dispositivo adecuado.

#### 7.4.2.4. Síntesis de las condiciones de aplicación de las técnicas geofísicas

Como se ha comentado existen varios métodos geofísicos que pueden ser utilizados para la auscultación de túneles.

Cada método tiene sus ventajas y sus limitaciones que es preciso conocer para poder utilizar el método más adecuado en función del objetivo y de las condiciones del entorno. Para eso se presentan las tablas 7.1 y 7.2 donde se resumen las principales características, ventajas y limitaciones de cada método.

**Tabla 7.1:** Posibilidades de utilización de las diferentes técnicas para medir espesores de hormigón proyectado (H.P).

TECNICA	UTILIZACIÓN SEGÚN EL TERRENO			TIPO DE SOSTENIMIENTO		
	SUELO	ROCA SANA	ROCA FRACTURADA	HP SIN FIBRAS	HP CON FIBRAS	HP + BULONES
GEORRADAR	Si	Si	Si	Si	No	Si
ULTRASONIDOS	No	Si	Comprobación previa sobre testigos	Si	Si	Si
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	Si	Si	Si	Si	Si	Si

**Tabla 7.2:** Adecuación de las diferentes técnicas para la auscultación de túneles.

TECNICA	Operatividad del método	Necesidad de sacar muestras	Posibilidad de detectar zonas de HP dañado	Caracterización de grietas del H.P.	Posibilidad de caracterizar el estado del terreno
GEORRADAR	Alta	Si	Imposible	Media	Alta
ULTRASONIDOS	Media	Aconsejable	Alta	Alta	Imposible
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	Media	Si	Baja	Imposible	Baja

## 7.5. Revisión de literatura

### 7.5.1. Manual de carreteras volumen 7: Mantenimiento vial

El manual de carreteras , establece lo siguientes para elementos de sostenimiento:

Los túneles que cuentan con un refuerzo de la bóveda y sus hastiales por medio de capas de hormigón proyectado reforzado (shotcret) deben inspeccionarse en busca de grietas, sopladuras entre capas o bolsones de agua, que en determinadas condiciones pudieran llegar a desprender trozos del sostenimiento sobre los usuarios. En la misma inspección debe comprobarse si los pernos de roca a la vista están colaborando al sostenimiento.

En los túneles en que el revestimiento de la bóveda y muros es hormigón moldeado, durante las inspecciones periódicas deben marcarse claramente (de preferencia con yeso) las fisuras, identificarlas y fotografiarlas con el fin de hacerles un seguimiento semestral.

En caso de que las grietas se agranden o crezca la cantidad debe solicitarse el apoyo de un profesional especialista.

Salvo que se den algunas de las condiciones excepcionales señaladas más arriba, se recomienda que este tipo de inspecciones se realice con una periodicidad semestral.

### 7.5.2. Bases de licitación tipo España

Se propone evaluar el sistema estructural mediante un informe de auscultación de túneles localizados dentro del área de la concesión por un organismo certificado, en donde se aborden los parámetros que permitan evaluar la estabilidad estructural y funcional de la bóveda a lo largo del paso del tiempo de modo tal de contar con información respecto del comportamiento de la estructura frente a:

- Presencia de agua
- Contacto entre el revestimiento y el terreno
- Existencia de cavidades
- Presencia de deformaciones
- Presencia de fisuras

Con el informe generado se calificara el túnel según la siguiente escala:

Estado Excelente: Sin deterioros.

Estado Bueno: No son necesarias reparaciones salvo en ciertas zonas/elementos con deterioros leves aislados (separados más de 3 m) y algunas pequeñas zonas con eflorescencias.

Estado Regular: Son necesarias reparaciones leves pero los elementos estructurales continúan cumpliendo su función. En el hormigón aparecen grietas de gravedad media (anchura  $>1$  mm) con separaciones entre 1.5 y 3 m con presencia de eflorescencias y filtraciones leves (goteras  $< 30$  gotas/min). Pueden aparecer pequeñas pérdidas de material (delaminaciones, desconchados) o grietas en malla grande pero sin ninguna armadura expuesta.

Estado Malo: Se necesitan reparaciones importantes y los elementos estructurales no funcionan tal y como fueron diseñados. Las grietas, las eflorescencias y el descascarilado están presentes en un amplia superficie y se presentan filtraciones graves (goteras  $> 30$  gotas /min, tramos  $> 1$ l/min/100 m). El hormigón presenta más del 50% de su superficie con delaminaciones y desconchones y las armaduras expuestas han perdido hasta un 15% de su cuantía.

Estado Grave: Se necesitan reparaciones importantes de forma inmediata para mantener el túnel abierto al tráfico. La sección del túnel se ha comenzado a deformar y no admite la carga estructural para la que fue diseñada sin efectuar reparaciones inmediatas. El hormigón presenta una extensa superficie con delaminaciones y numerosos deterioros graves: grietas ( $> 3$  mm), desconchones (profundidad  $> 25$  mm, diametro  $> 150$  mm o armaduras descubiertas). También aparecen numerosas zonas con problemas de filtraciones graves. Las armaduras expuestas han perdido hasta el 40% de su cuantía.

## 7.6. Propuesta de evaluación del sistema estructural de túneles

Se propone desarrollar un informe completo del estado estructural del túnel basado en métodos auscultación y monitoreo usando sistemas de escaneo por tecnología láser, ultrasonido e incluso microgeofísica. Debe considerarse que el objetivo perseguido con el monitoreo evaluación y seguimiento, en todos los casos es de orden preventivo y debe estar basado en la activación del daño en los distintos componentes estructurales a saber: Pernos de anclaje, hormigón proyectado (con o sin malla o fibra), marcos de acero, hormigón de revestimiento. Sin perjuicio del daño evidenciado por cada uno de los elementos anteriores individualmente, el principal factor que evidenciará daños o actividad en ese sentido, es la apertura de grietas en los revestimiento.

### 7.6.1. Periodicidad de la medición

Se generará un informe acucioso de frecuencia anual, basado en las tecnologías descritas anteriormente del estado de las estructuras subterráneas consideradas, complementado por revisiones trimestrales basadas en inspecciones oculares y chequeo de martillo como mínimo, sin embargo en el caso de catástrofe sea esta sismo, atentado, incendio, impacto de vehículo u otros eventos que pudieran afectar la estabilidad de la estructura se deberá evacuar un informe elaborado por especialistas que detalle las condiciones reales del túnel dentro de los primeros tres días.

## 7.7. Conclusión

Puesto que actualmente existe poca preocupación de la estabilidad general del túnel y sus elementos constitutivos, se exige realizar informes trimestrales y anuales mediante algunos de los métodos descritos anteriormente u otro existente para asegurar la perduración de la infraestructura en óptimas condiciones de seguridad y riesgo.



---

# CONCLUSIONES

---

El objetivo principal de este trabajo, ha sido impulsar el uso de tecnologías desarrolladas previamente en nuestro país e incentivar un mejoramiento continuo en la gestión de la red vial en particular del activo túnel, del cual son parte los sistemas fundamentales abordados en cada capítulo.

Respecto del segundo capítulo: Sistema de ventilación, el cual se encuentra dentro del modelo de satisfacción para el usuario, se hace una revisión bibliográfica que incorpora normativa de Australia, EE.UU, Noruega y la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC), en donde se busca identificar los mejores indicadores para controlar la calidad del aire y la ventilación en túneles. Por otro lado a nivel nacional se revisan bases de licitación de túneles, manual de carreteras y normativas de calidad ambiental. Los indicadores usados actualmente como medidas de calidad del aire en túneles viales de Chile son: Concentración de Monóxido de Carbono y Opacidad, sin embargo en países con infraestructura subterránea mas avanzada se incorpora la medición de Dióxido de Nitrógeno en beneficio de un porcentaje de la población que es mas propensa a presentar complicaciones por este gas, producto de lo anterior, se propone incorporar la medición de este gas al modelo de niveles de servicio. Respecto a la metodología de medición de los gases tóxicos se propone un algoritmo simple aplicable a todos los túneles independiente de su longitud en el cual, por medio de una tabla de evaluación se compara el tiempo de exposición de los usuarios a determinadas concentraciones de gases tóxicos.

En el tercer capitulo, el Sistema de Iluminación se incorpora al modelo de satisfacción para el usuario por medio de indicaciones encontradas en informes técnicos emitidos por la CIE (Comisión internacional de iluminación). Cabe destacar que actualmente en proyectos de iluminación vial solo se exige la puesta en marcha y reposición de la luminaria dañada. Con respaldo de la información consultada se propone un método de medición no existente a nivel nacional basado en tres indicadores, estos son: Uniformidad General, Luminancia Media y Uniformidad Longitudinal. La medición se lleva a cabo con un dispositivo de medición de luminancia ILMD (Imaging Luminance Meter Device). Cada zona del túnel posee características de luminancia distintas que deben respetarse para una correcta adaptación del conductor, por este motivo el cumplimiento de los umbrales debe ser aprobado de forma separada.

Referente al cuarto capitulo: Sistema de protección contra incendios, no se incorpora al modelo de niveles de servicio por falta de indicadores objetivos para su medición. Este sistema es uno de los mas determinantes dentro del área de seguridad donde el éxito en la operación depende del equipamiento del túnel y la coordinación del personal de operación, servicios de emergencia y usuario de la vía. A nivel internacional no existe concordancia en como evaluar el nivel de preparación de un túnel frente

a un evento de incendio, en la mayoría de los textos consultados se dan pautas generales de los puntos a abordar en el plan de gestión de incendios, y se proponen distintos tipos de ejercicios que se pueden llevar a cabo, estos son: seminarios, ejercicios de mesa, simulaciones en el centro de control y ejercicios reales. Los simulacros o ejercicios reales podrían ser la opción más cercana de evaluación de un incendio, sin embargo, existen demasiados escenarios críticos de evaluación y carecen de indicadores objetivos para medir su resultado y posterior evaluación. Frente al primer inconveniente una posibilidad es incluir herramientas de análisis de riesgo y obtener los escenarios más críticos por medio de curvas que incluyan el número de fatalidades en función de la probabilidad de ocurrencia, este tema puede ser abordado en futuros trabajos. Como resultado de los puntos anteriores el sistema de protección contra incendios se evalúa por medio de la conservación programada exigiendo el cumplimiento de los requisitos expuestos en el capítulo.

El sistema de saneamiento y drenaje expuesto en el capítulo cinco, está compuesto por activos cuya finalidad es mantener el túnel libre de sustancias líquidas que puedan dañar la estructura o afectar el tránsito seguro en este, producto que tienen un costo considerable dentro del proyecto y que están sujetos a mantenimiento por parte de la concesionaria se incorporan dentro del modelo de conservación del patrimonio. En el manual de carreteras y las bases de licitación actuales proponen labores de mantenimiento y especifican el tiempo entre cada intervención. Con el objetivo de la incorporación al modelo de niveles de servicio, se evalúa el sistema de saneamiento y drenaje mediante un índice de condición el cual por medio de fichas de inspección visual de los activos genera una evaluación del estado patrimonial del sistema. Cabe mencionar que el desarrollo del método de medición fue obtenido del Manual de inspección visual de activos de saneamiento y drenaje de carreteras (Arriagada and Echaveguren, 2015).

El sistema Electromecánico detallado en el capítulo seis, corresponde al sistema de mayor importancia ya que de él dependen todos los sistemas mencionados anteriormente, es por este motivo que no se encuentra dentro del modelo de niveles de servicio, si no que se exige de manera obligatoria la alimentación ininterrumpida de energía eléctrica a la infraestructura, también se propone el mantenimiento de los equipos involucrados por conservación programada entre intervalos de tiempo establecidos en el capítulo.

Finalmente, los resultados propuestos serán incorporados y evaluados en el modelo de niveles de servicio en la siguiente etapa del proyecto.

# FICHAS TÉCNICAS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO

En este anexo, se presentan las fichas técnicas elaboradas a partir de los informes técnicos del sistema de Ventilación, sistema de Iluminación y sistema de Saneamiento y Drenaje.

El sistema de ventilación es evaluado por tres indicadores de desempeño, estos son: Concentración de Monóxido de Carbono, Concentración de Dióxido de Nitrógeno y Opacidad.

El sistema de Iluminación es evaluado por tres indicadores, estos son: Uniformidad General, Luminancia Media y Uniformidad Longitudinal. Sin embargo, los primeros dos serán evaluados en forma conjunta producto de la influencia que existe entre ellos.

Finalmente, el sistema de Saneamiento y Drenaje es evaluado por inspección visual, el método se describe en (Arriagada and Echaveguren, 2015).

## A.1. Sistema de Ventilación

IDENTIFICACIÓN		NOMBRE		
TU-SV-IT1		Concentración de Monóxido de Carbono		
INDICADOR		UNIDAD	FRECUENCIA DE MEDIDA	
Concentración de Monóxido de Carbono		PPM	Continuo	
NORMATIVA DE REFERENCIA				
-				
EQUIPO DE MEDICIÓN				
-				
METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CONSIDERACIONES				
<ul style="list-style-type: none"> <li>La medición de monóxido de carbono se realizará con detectores de gases tóxicos instalados a lo largo del túnel, cada detector atenderá un sector específico de acuerdo con el proyecto de ingeniería de detalle del sistema de ventilación.</li> <li>Para cada estación de monitoreo se promediarán las mediciones de CO continuas en intervalos de 5 min, resultando el número de mediciones igual al número de secciones de control que tenga el túnel.</li> <li>Cada 15 min se escogerá el intervalo promedio de mayor concentración en el túnel, dicho valor se contrastará con la tabla de evaluación, obteniendo el nivel de desempeño del túnel en 15 minutos.</li> <li>El tiempo de exposición del usuario se calcula con la velocidad media del flujo y la longitud del túnel, como <math>t=D/V_m</math>; donde D= longitud del túnel y <math>V_m</math>=velocidad media del flujo de vehículos.</li> <li>La evaluación diaria y mensual se realiza con las tablas adjuntas, según el porcentaje de cumplimiento.</li> </ul>				
NIVELES DE DESEMPEÑO (NOTA)				
Tiempo de exposición [min]	Nivel máximo permitido (ppm de CO)	BUENO	JUSTO	MALO
0 - 5	100	[0 - 70]	]70 – 100]	> 100
5 - 15	70	[0 - 50]	]50 – 70]	> 70
15 - 30	50	[0 - 35]	]35 – 50]	> 50
30 - 45	35	[0 - 25]	]25 – 35]	> 35
45 – 60	25	[0 - 10]	]10 – 25]	> 25
> 60	10	[0 - 5]	]5 – 10]	> 10
EVALUACIÓN DIARIA				
		Porcentaje del total de intervalos de 15 min dentro de cada rango en un día		
		BUENO	JUSTO	MALO
Calificación del indicador	MUY BUENO	100	= 0	= 0
	BUENO	> 50	< 50	= 0
	JUSTO	100		
	MALO	-	-	1
	MUY MALO	-	-	> 1
EVALUACIÓN MENSUAL				
		Porcentaje del total de días dentro de cada rango en un mes		
		BUENO	JUSTO	MALO
Calificación del indicador	MUY BUENO	100	= 0	= 0
	BUENO	> 80	< 80	= 0
	JUSTO	100		
	MALO	-	-	3
	MUY MALO	-	-	> 3

Figura A.1: Ficha técnica 1 : Concentración de Monóxido de Carbono

Fuente: Elaboración propia

IDENTIFICACIÓN		NOMBRE		
TU-SV-IT2		Concentración de Dióxido de Nitrógeno		
INDICADOR		UNIDAD	FRECUENCIA DE MEDIDA	
Concentración de Dióxido de Nitrógeno		PPM	Continuo	
NORMATIVA DE REFERENCIA				
-				
EQUIPO DE MEDICIÓN				
-				
METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CONSIDERACIONES				
<ul style="list-style-type: none"> <li>La medición de dióxido de nitrógeno se realizará con detectores de gases tóxicos instalados a lo largo del túnel, cada detector atenderá un sector específico de acuerdo con el proyecto de ingeniería de detalle del sistema de ventilación.</li> <li>Para cada estación de monitoreo se promediarán las mediciones de NO<sub>2</sub> continuas en intervalos de 5 min, resultando el número de mediciones igual al número de secciones de control que tenga el túnel.</li> <li>Cada 15 min se escogerá el intervalo promedio de mayor concentración en el túnel, dicho valor se contrastará con la tabla de evaluación, obteniendo el nivel de desempeño del túnel en 15 minutos.</li> <li>El tiempo de exposición del usuario se calcula con la velocidad media del flujo y la longitud del túnel, como <math>t=D/V_m</math>; donde D= longitud del túnel y V<sub>m</sub>=velocidad media del flujo de vehículos.</li> <li>La evaluación diaria y mensual se realiza con las tablas adjuntas, según el porcentaje de cumplimiento.</li> </ul>				
NIVELES DE DESEMPEÑO (NOTA)				
Tiempo de exposición [min]	Nivel máximo permitido (ppm de NO <sub>2</sub> )	BUENO	JUSTO	MALO
0 - 5	4	[0 - 3]	]3 - 4]	> 4
5 - 15	3	[0 - 2]	]2 - 3]	> 3
15 - 30	2	[0 - 1]	]1 - 2]	> 2
30 - 45	1	[0 - 0.5]	]0.5 - 1]	> 1
45 - 60	0.5	[0 - 0.2]	]0.2 - 0.5]	> 0.5
> 60	0.2	[0 - 0.1]	]0.1 - 0.2]	> 0.2
EVALUACIÓN DIARIA				
		Porcentaje del total de intervalos de 15 min dentro de cada rango en un día		
		BUENO	JUSTO	MALO
Calificación del indicador	MUY BUENO	100	= 0	= 0
	BUENO	> 50	< 50	= 0
	JUSTO	100		
	MALO	-	-	1
	MUY MALO	-	-	> 1
EVALUACIÓN MENSUAL				
		Porcentaje del total de días dentro de cada rango en un mes		
		BUENO	JUSTO	MALO
Calificación del indicador	MUY BUENO	100	= 0	= 0
	BUENO	> 80	< 80	= 0
	JUSTO	100		
	MALO	-	-	3
	MUY MALO	-	-	> 3

Figura A.2: Ficha técnica 1 : Concentración de Dióxido de Nitrógeno

Fuente: Elaboración propia

IDENTIFICACIÓN		NOMBRE		
TU-SV-IT3		Opacidad		
INDICADOR		UNIDAD	FRECUENCIA DE MEDIDA	
Opacidad		PPM	Continuo	
NORMATIVA DE REFERENCIA				
-				
EQUIPO DE MEDICIÓN				
-				
METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CONSIDERACIONES				
<ul style="list-style-type: none"> <li>La medición de opacidad se realizará con opacímetros instalados a lo largo del túnel, cada opacímetro atenderá un sector específico de acuerdo con el proyecto de ingeniería de detalle del sistema de ventilación.</li> <li>Para cada estación de monitoreo se promediarán las mediciones de opacidad (K) continuas en intervalos de 5 min, resultando el número de mediciones igual al número de secciones de control que tenga el túnel.</li> <li>Cada 15 min se escogerá el intervalo promedio de mayor concentración en el túnel, dicho valor se contrastará con la tabla de evaluación, obteniendo el nivel de desempeño del túnel en 15 minutos.</li> <li>La evaluación diaria y mensual se realiza con las tablas adjuntas, según el porcentaje de cumplimiento.</li> </ul>				
NIVELES DE DESEMPEÑO (NOTA)				
Nivel de Opacidad máximo [ $10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ]		BUENO	JUSTO	MALO
7		[0 - 5]	]5 - 7]	> 7
EVALUACIÓN DIARIA				
		Porcentaje del total de intervalos de 15 min dentro de cada rango en un día		
		BUENO	JUSTO	MALO
Calificación del indicador	MUY BUENO	100	= 0	= 0
	BUENO	> 50	< 50	= 0
	JUSTO	100		
	MALO	-	-	1
	MUY MALO	-	-	> 1
EVALUACIÓN MENSUAL				
		Porcentaje del total de días dentro de cada rango en un mes		
		BUENO	JUSTO	MALO
Calificación del indicador	MUY BUENO	100	= 0	= 0
	BUENO	> 80	< 80	= 0
	JUSTO	100		
	MALO	-	-	3
	MUY MALO	-	-	> 3

Figura A.3: Ficha técnica 1 : Opacidad

Fuente: Elaboración propia

## A.2. Sistema de Iluminación

IDENTIFICACIÓN		NOMBRE																																														
TU-SI-IT1		Nivel de Iluminación																																														
INDICADOR		UNIDAD	FRECUENCIA DE MEDIDA																																													
Luminancia Media (Lav)		cd/m <sup>2</sup>	Anual																																													
NORMATIVA DE REFERENCIA																																																
Manual de Carreteras, Volumen N°6 Seguridad Vial, Capítulo 6.7 Iluminación Vial, Dirección de Vialidad																																																
CIE 88: Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses																																																
EQUIPO DE MEDICIÓN																																																
La medición se realizará con un ILM (Imaging Luminance Meter Device, Dispositivo de Medición de Luminancia de Imagen), calibrado y con resolución suficiente para realizar mediciones puntuales con ángulo sólido cónico no mayor de 2' en la vertical y no más de 20' en la horizontal. El instrumento debe medir en HDR (High Dynamic Range, Alto rango dinámico) con el fin de permitir la medición de Luminancia de Velo para cálculo del Incremento de Umbral (TI).																																																
METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CONSIDERACIONES																																																
La medición se realizará de forma continua en todos los tramos homogéneos, con una medición de la zona de cálculo normativa utilizada para el cálculo fotométrico. La posición nominal de los puntos de la grilla en los cuales se toman las mediciones, así como las posiciones nominales del observador, deben ser las indicadas en el Anexo 6.700A del Manual de Carreteras. Si algún punto se encuentra situado en una mancha de aceite, no se debe considerar en los cálculos de luminancia media y valores de uniformidad. Se debe realizar una medición por zona con el ILDM, para cada pista y posición del observador. La medición debe realizarse en régimen normal de funcionamiento, las luminarias deben haber pasado su período de estabilización y el pavimento debe encontrarse seco. Se debe reducir al mínimo posible cualquier sombra o interferencia procedente del sistema de medición y operadores. Además de la configuración espacial de la medición se evaluará cada zona del túnel, es decir se tendrá un total de 4 mediciones correspondientes a las zonas de umbral, transición, interior y salida.																																																
La medición debe realizarse en régimen normal de funcionamiento, las luminarias deben haber pasado su período de estabilización y el pavimento debe encontrarse seco. Se debe reducir al mínimo posible cualquier sombra o interferencia procedente del sistema de medición y operadores.																																																
En ningún caso los valores de luminancia media pueden estar bajo la curva de adaptación de diseño.																																																
La evaluación del nivel de luminancia media (L <sub>av</sub> ) se realizará en conjunto con la evaluación de la uniformidad global (U <sub>o</sub> ).																																																
NIVELES DE DESEMPEÑO (NOTA)																																																
MUY BUENO		BUENO		JUSTO		MALO		MUY MALO																																								
		<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Rango del Indicador</th> <th rowspan="2">Lav/Uo</th> <th colspan="5">Rango del Indicador Uniformidad Global [-]</th> </tr> <tr> <th>≥ Uo + 0.2</th> <th>[Uo + 0.2 , Uo + 0.1]</th> <th>[Uo + 0.1 , Uo]</th> <th>[Uo , Uo - 0.1]</th> <th>&lt; Uo - 0.1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>&gt; 0.8 Lav</td> <td colspan="5" style="background-color: red; color: white;">MUY MALO</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Luminancia Media [cd/m<sup>2</sup>]</td> <td>[0.8 Lav , 0.9 Lav]</td> <td style="background-color: yellow;">JUSTO</td> <td style="background-color: orange;">MALO</td> <td style="background-color: red;">MUY MALO</td> <td style="background-color: red;">MUY MALO</td> <td style="background-color: red;">MUY MALO</td> </tr> <tr> <td>[0.9 Lav , Lav]</td> <td style="background-color: lightgreen;">BUENO</td> <td style="background-color: yellow;">JUSTO</td> <td style="background-color: orange;">MALO</td> <td style="background-color: red;">MUY MALO</td> <td style="background-color: red;">MUY MALO</td> </tr> <tr> <td>[Lav , 1.2 Lav]</td> <td style="background-color: lightgreen;">MUY BUENO</td> <td style="background-color: lightgreen;">BUENO</td> <td style="background-color: yellow;">JUSTO</td> <td style="background-color: orange;">MALO</td> <td style="background-color: red;">MUY MALO</td> </tr> </tbody> </table>									Rango del Indicador	Lav/Uo	Rango del Indicador Uniformidad Global [-]					≥ Uo + 0.2	[Uo + 0.2 , Uo + 0.1]	[Uo + 0.1 , Uo]	[Uo , Uo - 0.1]	< Uo - 0.1		> 0.8 Lav	MUY MALO					Luminancia Media [cd/m <sup>2</sup> ]	[0.8 Lav , 0.9 Lav]	JUSTO	MALO	MUY MALO	MUY MALO	MUY MALO	[0.9 Lav , Lav]	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO	MUY MALO	[Lav , 1.2 Lav]	MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
Rango del Indicador	Lav/Uo	Rango del Indicador Uniformidad Global [-]																																														
		≥ Uo + 0.2	[Uo + 0.2 , Uo + 0.1]	[Uo + 0.1 , Uo]	[Uo , Uo - 0.1]	< Uo - 0.1																																										
	> 0.8 Lav	MUY MALO																																														
Luminancia Media [cd/m <sup>2</sup> ]	[0.8 Lav , 0.9 Lav]	JUSTO	MALO	MUY MALO	MUY MALO	MUY MALO																																										
	[0.9 Lav , Lav]	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO	MUY MALO																																										
	[Lav , 1.2 Lav]	MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO																																										
EVALUACIÓN GLOBAL																																																
La evaluación global de luminancia media del túnel corresponde al nivel de desempeño mas bajo de todas las zonas.																																																

Figura A.4: Ficha técnica 1 : Luminancia Media (L<sub>av</sub>)

Fuente: Elaboración propia

IDENTIFICACIÓN		NOMBRE																																											
TU-SI-FT2		Uniformidad Global																																											
INDICADOR		UNIDAD		FRECUENCIA DE MEDIDA																																									
Uniformidad Global ( $U_o$ )		-		Anual																																									
NORMATIVA DE REFERENCIA																																													
Manual de Carreteras, Volumen N°6 Seguridad Vial, Capítulo 6.7 Iluminación Vial, Dirección de Vialidad																																													
CIE 88: Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses																																													
EQUIPO DE MEDICIÓN																																													
La medición se realizará con un ILM ( <i>Imaging Luminance Meter Device</i> , Dispositivo de Medición de Luminancia de Imagen), calibrado y con resolución suficiente para realizar mediciones puntuales con ángulo sólido cónico no mayor de 2' en la vertical y no más de 20' en la horizontal. El instrumento debe medir en HDR (High Dynamic Range, Alto rango dinámico) con el fin de permitir la medición de Luminancia de Velo para cálculo del Incremento de Umbral (TI).																																													
METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CONSIDERACIONES																																													
La medición se realizará de forma continua en todos los tramos homogéneos, con una medición de la zona de cálculo normativa utilizada para el cálculo fotométrico. La posición nominal de los puntos de la grilla en los cuales se toman las mediciones, así como las posiciones nominales del observador, deben ser las indicadas en el Anexo 6.700A del Manual de Carreteras. Si algún punto se encuentra situado en una mancha de aceite, no se debe considerar en los cálculos de luminancia media y valores de uniformidad. Se debe realizar una medición por zona con el ILDM, para cada pista y posición del observador. La medición debe realizarse en régimen normal de funcionamiento, las luminarias deben haber pasado su período de estabilización y el pavimento debe encontrarse seco. Se debe reducir al mínimo posible cualquier sombra o interferencia procedente del sistema de medición y operadores. Además de la configuración espacial de la medición se evaluará cada zona del túnel, es decir se tendrá un total de 4 mediciones correspondientes a las zonas de umbral, transición, interior y salida.																																													
La medición debe realizarse en régimen normal de funcionamiento, las luminarias deben haber pasado su período de estabilización y el pavimento debe encontrarse seco. Se debe reducir al mínimo posible cualquier sombra o interferencia procedente del sistema de medición y operadores.																																													
En ningún caso los valores de luminancia media pueden estar bajo la curva de adaptación de diseño.																																													
La evaluación del nivel de luminancia media ( $L_{av}$ ) se realizará en conjunto con la evaluación de la uniformidad global ( $U_o$ ).																																													
NIVELES DE DESEMPEÑO (NOTA)																																													
MUY BUENO		BUENO		JUSTO		MALO																																							
						MUY MALO																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="5">Rango del Indicador Uniformidad Global [-]</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th><math>\geq U_o + 0.2</math></th> <th><math>[U_o + 0.2, U_o + 0.1]</math></th> <th><math>[U_o + 0.1, U_o]</math></th> <th><math>[U_o, U_o - 0.1]</math></th> <th><math>&lt; U_o - 0.1</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">Rango del Indicador Luminancia Media [<math>cd/m^2</math>]</td> <td><math>&gt; 0.8 L_{av}</math></td> <td colspan="5">MUY MALO</td> </tr> <tr> <td><math>[0.8 L_{av}, 0.9 L_{av}]</math></td> <td>JUSTO</td> <td>MALO</td> <td>MUY MALO</td> <td>MUY MALO</td> <td>MUY MALO</td> </tr> <tr> <td><math>[0.9 L_{av}, L_{av}]</math></td> <td>BUENO</td> <td>JUSTO</td> <td>MALO</td> <td>MUY MALO</td> <td>MUY MALO</td> </tr> <tr> <td><math>[L_{av}, 1.2 L_{av}]</math></td> <td>MUY BUENO</td> <td>BUENO</td> <td>JUSTO</td> <td>MALO</td> <td>MUY MALO</td> </tr> </tbody> </table>									Rango del Indicador Uniformidad Global [-]							$\geq U_o + 0.2$	$[U_o + 0.2, U_o + 0.1]$	$[U_o + 0.1, U_o]$	$[U_o, U_o - 0.1]$	$< U_o - 0.1$	Rango del Indicador Luminancia Media [ $cd/m^2$ ]	$> 0.8 L_{av}$	MUY MALO					$[0.8 L_{av}, 0.9 L_{av}]$	JUSTO	MALO	MUY MALO	MUY MALO	MUY MALO	$[0.9 L_{av}, L_{av}]$	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO	MUY MALO	$[L_{av}, 1.2 L_{av}]$	MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
		Rango del Indicador Uniformidad Global [-]																																											
		$\geq U_o + 0.2$	$[U_o + 0.2, U_o + 0.1]$	$[U_o + 0.1, U_o]$	$[U_o, U_o - 0.1]$	$< U_o - 0.1$																																							
Rango del Indicador Luminancia Media [ $cd/m^2$ ]	$> 0.8 L_{av}$	MUY MALO																																											
	$[0.8 L_{av}, 0.9 L_{av}]$	JUSTO	MALO	MUY MALO	MUY MALO	MUY MALO																																							
	$[0.9 L_{av}, L_{av}]$	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO	MUY MALO																																							
	$[L_{av}, 1.2 L_{av}]$	MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO																																							
EVALUACIÓN GLOBAL																																													
La evaluación global de uniformidad global del túnel corresponde al nivel de desempeño mas bajo de todas las zonas.																																													

Figura A.5: Ficha técnica 1 : Uniformidad Global ( $U_o$ )

Fuente: Elaboración propia

IDENTIFICACIÓN		NOMBRE		
TU-SI-FT3		Uniformidad Longitudinal		
INDICADOR		UNIDAD	FRECUENCIA DE MEDIDA	
Uniformidad Longitudinal (UI)		-	Anual	
NORMATIVA DE REFERENCIA				
Manual de Carreteras, Volumen N°6 Seguridad Vial, Capítulo 6.7 Iluminación Vial, Dirección de Vialidad				
CIE 88: Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses				
EQUIPO DE MEDICIÓN				
La medición se realizará con un ILM (Imaging Luminance Meter Device, Dispositivo de Medición de Luminancia de Imagen), calibrado y con resolución suficiente para realizar mediciones puntuales con ángulo sólido cónico no mayor de 2° en la vertical y no más de 20° en la horizontal. El instrumento debe medir en HDR (High Dynamic Range, Alto rango dinámico) con el fin de permitir la medición de Luminancia de Velo para cálculo del Incremento de Umbral (TI).				
METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CONSIDERACIONES				
La medición se realizará de forma continua en todos los tramos homogéneos, con una medición de la zona de cálculo normativa utilizada para el cálculo fotométrico. La posición nominal de los puntos de la grilla en los cuales se toman las mediciones, así como las posiciones nominales del observador, deben ser las indicadas en el Anexo 6.700A del Manual de Carreteras. Si algún punto se encuentra situado en una mancha de aceite, no se debe considerar en los cálculos de luminancia media y valores de uniformidad. Se debe realizar una medición por zona con el ILDM, para cada pista y posición del observador. La medición debe realizarse en régimen normal de funcionamiento, las luminarias deben haber pasado su período de estabilización y el pavimento debe encontrarse seco. Se debe reducir al mínimo posible cualquier sombra o interferencia procedente del sistema de medición y operadores. Además de la configuración espacial de la medición se evaluará cada zona del túnel, es decir se tendrá un total de 4 mediciones correspondientes a las zonas de umbral, transición, interior y salida.				
La medición debe realizarse en régimen normal de funcionamiento, las luminarias deben haber pasado su período de estabilización y el pavimento debe encontrarse seco. Se debe reducir al mínimo posible cualquier sombra o interferencia procedente del sistema de medición y operadores.				
NIVELES DE DESEMPEÑO (NOTA)				
MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO
RANGO UNIFORMIDAD LONGITUDINAL [-]				
> UI + 0.1	[UI + 0.1, UI + 0.05]	[UI + 0.05, UI]	[UI, UI - 0.1]	< UI - 0.1
EVALUACIÓN GLOBAL				
La evaluación global de uniformidad longitudinal del túnel corresponde al nivel de desempeño mas bajo de todas las zonas.				

Figura A.6: Ficha técnica 1 : Uniformidad Longitudinal ( $U_1$ )

Fuente: Elaboración propia

### A.3. Sistema de Saneamiento y Drenaje

IDENTIFICACIÓN	NOMBRE					
TU-SD-IT1	Sistema de Saneamiento y Drenaje (SD)					
INDICADOR	UMBRAL	FRECUENCIA DE MEDIDA				
Índice de Condición de SD (ICSD)	Adimensional	Anual				
NORMATIVA DE REFERENCIA						
No existe normativa de referencia.						
La metodología de referencia es Arriagada y Echaveguren (2015)						
EQUIPO DE MEDICIÓN						
Inspección Visual						
METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CONSIDERACIONES						
<p>La metodología de inspección visual y de calificación de condición del ICSD se encuentra contenida en el "Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras", elaborado por Arriagada y Echaveguren (2015). La metodología contempla procedimientos de evaluación de condición de 18 activos del sistema de saneamiento y drenaje considerando sus diversas materialidades. Considera sistemas de Saneamiento y Drenaje de aguas superficiales y subterráneas, obras de control de taludes y obras complementarias. considera también 19 tipos de deterioro agrupados en deterioros estructurales, funcionales, por desgaste y de contorno, que dan origen a alrededor de 120 combinaciones posibles. El ICSD varía de 0 a 1 para cada activo. Siendo 1 la peor condición y 0 la mejor.</p> <p>Para la evaluación total del sistema de drenaje se clasifican los túneles en función de su longitud, si la longitud del túnel es menor a 1000 [m], entonces se asume un único tramo, en caso contrario, es decir, túneles con longitud mayores a 1000 [m] se evalúan tramos de 200 [m], de acuerdo a la siguiente expresión:</p> $ICSD_{tramo} = \frac{\sum_{a=1}^n I_a \cdot ICDD_a}{\sum_{a=1}^n I_a}$ <p>Donde:</p> <p><math>ICSD_{tramo}</math> : Índice de condición del tramo evaluado.  <math>ICSD_a</math> : Índice de condición para cada activo.  <math>I_a</math> : Índice de importancia relativa del activo.  <math>n</math> : Numero de activos en el inventario.</p>						
NIVELES DE DESEMPEÑO (NOTA)						
MUY BUENO	BUENO	JUSTO	MALO	MUY MALO		
RANGO DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DE SANEAMIENTO Y DRENAJE						
[0.0 – 0.2]	]0.2 – 0.4]	]0.4 – 0.6]	]0.6 – 0.8]	]0.8 – 1.0]		
EVALUACIÓN ANUAL						
		Porcentaje de tramos dentro de cada rango [%]				
		[0.0 – 0.2]	]0.2 – 0.4]	]0.4 – 0.6]	]0.6 – 0.8]	]0.8 – 1.0]
Calificación del Indicador	Muy Bueno	≥ 50	< 50	= 0	= 0	= 0
	Bueno	≥ 50		< 50	= 0	= 0
	Justo	100 %			= 0	= 0
	Malo	-		= 0	]0.0 – 5.0]	= 0
	Muy Malo	-		= 0	]0.0 – 10.0]	> 0

Figura A.7: Ficha técnica 1 : Índice de Condición de SD (ICSD)

Fuente: Elaboración propia

---

# REFERENCIAS

---

Abedrapo, E. (2013). Panorama institucional de la asociación público privada en Latinoamericano.

ANSI/IES (2014). RP-8-14 Roadway Lighting.

Arriagada, H. and Echaveguren, T. (2015). Manual de inspección visual de activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras. Chile.

AS S.L.U (2014). Tipos de gases producidos en la combustión y sus consecuencias. url <http://www.as-sl.com>. Accedido 03-01-2019.

Austroroad (2010). Guide to Road Tunnels Part 3: Operation and Maintenance. Australia.

CIE (2000). Road lighting calculations: Cie 140:2000.

CIE (2004). Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses: CIE 88:2004.

Comite de túneles y espacios subterráneos de Chile (2019). Catastro de túneles y espacios subterráneos. url <https://www.ctes.cl/catastro/>. Accedido 09-01-2019.

Conferencia de la Sección Española ISA (1999). Detectores de gases nuevas tecnologías en el infrarrojo. España.

Consumer Product Safety Commission (2019). Carbon Monoxide Safety Education. url <https://www.cpsc.gov>. Accedido 03-01-2019.

Coordinación de Concesiones de Obras Públicas (2016). Concesiones de Obras Públicas en Chile. 20 años.

Coordinación General de Concesiones (1997). Bases de licitación concesión internacional interconexión vial Santiago-Valparaíso-Viña del Mar. Chile.

Dirección de Vialidad (2019). Túneles viales en Chile. url <http://www.vialidad.cl>. Accedido 09-01-2019.

Dirección de Vialidad (2018a). Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño. Chile.

Dirección de Vialidad (2018b). Manual de Carreteras Volumen 6: Seguridad Vial. Chile.

Dirección de Vialidad (2018c). Manual de Carreteras Volumen 7: Mantenimiento Vial. Chile.

- European Thematic Network Fire in Tunnels (2006). Technical report Part 3 “Fire Response Management”.
- Federal Highway Administration (2004). Road Tunnel Design Guidelines. EE.UU.
- Gavilán, M., Sánchez, F., Ramos, J., and Marcos, O. (2013). Mobile inspection system for high-resolution assessment of tunnels. España.
- Geocontrol, S.A. (2000). Metodología para la inspección de túneles. Chile.
- Gibbons, R. B., Meyer, J., and Edwards, C. J. (2018). Development of a mobile measurement system for roadway lighting.
- Grefer, F., Charbonnier, P., Tarel, J.-P., Boucher, V., and Fournela, F. (2015). An automatic system for measuring road and tunnel lighting performance. in *cie 2015-international conference of the 28th session of the cie*. pages 1647–1656.
- Johnson, M., Fabregas, A., Wang, Z., Katkooori, S., and Lin, P.-S. (2014). Embedded system design of an advanced illumination measurement system for highways. In *Systems Conference (SysCon)*. pages 579–586.
- Ministerio Secretaria General de la Presidencia (2018a). Norma Primaria de calidad de aire para Dióxido de Carbono. Chile.
- Ministerio Secretaria General de la Presidencia (2018b). Norma Primaria de calidad de aire para Monóxido de Carbono. Chile.
- Norwegian Public Roads Administration (2004). Road Tunnels. Noruega.
- PIARC Technical Committee 5 Road Tunnels (2000). Pollution by Nitrogen Dioxide in Road Tunnels.
- PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera (2011). Túneles de carretera: Estrategias de control de la ventilación en situación de emergencia.
- PIARC Technical Committee C 3.3 Explotación de túneles de carretera (2017). Túneles de carretera: Estrategias de control de la ventilación en situación de emergencia.
- PIARC Technical Committee C.4 Road Tunnel Operation (2012). Road tunnels: Vehicle emissions and air demand for ventilation.
- Rodríguez, A. and Alejano, L. (2012). Comportamiento post-rotura de los macizos rocosos. España.
- Sanz, R. and Sierra, C. (2011). Diseño de una aplicación de software de medición y evaluación de niveles de iluminación en vía pública mediante GPS. AEIPRO. XV Congreso internacional de ingeniería de proyectos. pages 1–14. Huesca.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2016). Manual de diseño y construcción de túneles de carretera. México.

The Highways Agency (1999). Design Manual for Roads and Bridges: Volume 2, Highway Structures: Design (Substructures and Special Structures), Section 2: Special Structures, Part 9: Design of Road Tunnels. United Kingdom.

UNE (2016). Iluminacion de Carreteras - Parte 4: Metodos de medida de las prestaciones fotometricas.

Van Bommel, W. (2014). Road Lighting: Fundamentals, technology and application. Springer.

Zhou, H., Pirinccioglu, F., and Hsu, P. (2009). A new road measurement system. Transportation research part C: Emerging technologies. pages 274-284.