

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**Propuesta de Modelo de Valorización para los Sistemas de
Protección Contra Incendios, Estructural, Saneamiento y
Drenaje en Túneles compatible con el Modelo de Nivel de
Servicio a los Usuarios de Carreteras Interurbanas
Concesionadas**

Memoria de Título presentada por
Martín Jesús Reyes Touron

Como requisito parcial para optar al título de la carrera
Ingeniería Civil

Profesor Guía
Alelí Osorio Lird
Agosto 2022



TÍTULO DE TESIS:

**PROPUESTA DE MODELO DE VALORIZACIÓN PARA LOS
SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS,
ESTRUCTURAL, SANEAMIENTO Y DRENAJE EN TÚNELES
COMPATIBLE CON EL MODELO DE NIVEL DE SERVICIO A LOS
USUARIOS DE CARRETERAS INTERURBANAS CONCESIONADAS.**

AUTOR:

MARTÍN JESÚS REYES TOURON

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la
carrera de INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Alelí Osorio Lird

Nombre Miembro 1 Comisión

Valparaíso, Chile, agosto de 2022



Agradecimientos

Primero, agradecer a mis padres Hernán y Jacqueline, por todo el esfuerzo y apoyo incondicional que me dieron en estos años de universidad, este logro es gracias a ellos.

Segundo agradecer a mis amigos y compañeros de universidad, sobre todo a Marcelo, José, David y Bárbara por el apoyo y la amistad entregada en este proceso, habría sido mucho más difícil sin ellos.

Y finalmente a mis profesores de universidad, a la profesora Alelí Osorio por permitirme ser parte de este proyecto y la ayuda en cada una de las reuniones y presentaciones, además de todos los profesores y participantes del proyecto por su ayuda y entrega de conocimientos en cada consulta realizada.

Martín.

Índice

1. Introducción	11
2. Objetivos	12
2.1 Objetivos Generales	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3. Metodología	13
4. Sistema de Protección Contra Incendios	14
4.1 Introducción	14
4.2 Formas para Detectar Incendios en Túneles.....	14
4.3 Elementos del Sistema de Protección Contra Incendios	16
4.4 Operación, Mantenimiento e Inspección del Sistema de Protección contra Incendios	27
4.5 Propuesta de Índice de Condición para el Sistema de Protección Contra Incendios en Túneles	31
5. Sistema de Saneamiento y Drenaje	34
5.1 Introducción	34
5.2 Requerimientos Para Saneamiento Y Drenaje En Túneles	34
5.3 Elementos Presentes en el Sistema de Saneamiento y Drenaje en Túneles	36
5.4 Detalle de Deterioros.....	47
5.5 Metodología de Inspección Visual y Calificación de Condición	51
6. Sistema Estructural.....	54
6.1 Introducción	54
6.2 Elementos del Sistema Estructural	54
6.2.1 Revestimientos	54
6.2.2 Vigas de Techo.....	56
6.2.3 Columnas y Pilotes.....	57
6.2.4 Vías de Emergencia.....	57
6.2.5 Portales	58
6.2.6 Estructuras de Techo del Túnel	59
6.2.7 Juntas y Uniones.....	59
6.3 Detalle y Tipos de Deterioros.....	59
6.4 Mantenimiento del Sistema Estructural	61
6.4.1 Mantenimiento Preventivo del Sistema Estructural.....	62
6.4.2 Mantenimiento Bajo Demanda o Correctiva del Sistema Estructural	63
6.5 Informe de Evaluación e Índice de Condición	66

7. Técnicas de Valorización	68
8. Propuesta de Metodología de Valorización para cada Sistema.....	73
8.1 Metodología de Valorización usada Actualmente.....	73
8.2 Métodos Recomendados para cada Sistema de Elementos del Túnel.....	74
8.2.1 Sistema de Protección Contra Incendios	74
8.2.2 Sistema de Saneamiento y Drenaje	76
8.2.3 Sistema Estructural Interno	78
9. Calibración de Metodologías de Valorización Propuestas.....	81
9.1 Recopilación de datos disponibles y proceso de calibración.....	81
9.2 Presentación de Resultados	83
9.2.1 Calibración del Sistema de Protección contra Incendios	83
9.2.2 Calibración del Sistema de Saneamiento y Drenaje.....	88
9.2.3 Calibración del Sistema Estructural	92
10. Conclusiones	96
11. Trabajos a Futuro	98
12. Referencias.....	99
Anexos.....	100

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Cable lineal detector de temperatura. (Secretaria de Transporte y Comunicaciones; Manual de Diseño y Construcción).....	15
Ilustración 2. Estanques con reserva de agua para cortinas de agua en caso de incendio. (Pefipresa 2015, sistemas de protección contra incendios en Túneles).....	17
Ilustración 3. Bombas eléctricas y de Diesel pertenecientes al SPCI. (Pefipresa 2015, sistemas de protección contra incendios en Túneles).	17
Ilustración 4. Clasificación túneles según flujo vehicular y longitud. (Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño).....	18
Ilustración 5. Vestimenta contra incendios y respiradores autónomos. (WaterFire, Ropa de trabajo y Equipo de Protección contra Incendios).....	19
Ilustración 6. Luces de evacuación de emergencia en túneles. (MetroLight 2002, Iluminación de emergencia para vías de evacuación)	22
Ilustración 7. Monitoreo de CCTV en Túneles. (Revista de Transporte Terrestre 2020, Tecnología implementada en Túnel El Melo II)	24
Ilustración 8. Componentes del sistema contra incendios y seguridad usados en túneles de carretera. (FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)	27
Ilustración 9. Magnitudes posibles de accidentes graves en túneles. (FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles).....	28
Ilustración 10. Sistemas de detección de incidentes que facilitan una respuesta a emergencias rápida. (FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)	28
Ilustración 11. Equipamiento de protección contra incendios y acceso a rutas de escape. (FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)	28
Ilustración 12. Componentes del sistema contra incendios y seguridad. (FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)	29
Ilustración 13. Evaluación del daño provocado posterior a un incendio. (FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)	30
Ilustración 14. Cambios de color, que pueden indicar máxima temperatura experimentada. (FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)	30
Ilustración 15. Índice de Condición propuesto para elementos del SPCI.	32
Ilustración 16. Dren Colector Principal longitudinal al interior del túnel. (Secretaria de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México).....	37
Ilustración 17. Cámara de Inspección con tapa rectangular hecha en obra. (Secretaria de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México).....	38
Ilustración 18. Ubicación e Instalación de sumideros. (Secretaria de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México).....	40
Ilustración 19. Acceso al túnel con obras de drenaje exterior. (Secretaria de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México).....	41
Ilustración 20. Sección tipo de cuneta. (Secretaria de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México)	42
Ilustración 21. Sección tipo de contracuneta. (Secretaria de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México).....	43
Ilustración 22. Excavación y relleno en alcantarillas. (Secretaria de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México).....	45

Ilustración 23. Ejemplo de agua en la calzada (izquierda) y socavón (derecha). (Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).	47
Ilustración 24. Ejemplo de escalonamiento en baden (izquierda) y grietas en cuneta revestida (derecha). (Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).....	48
Ilustración 25. Ejemplo de abrasión en alcantarilla sin muro de boca (izquierda) y fracturamiento estructural en colectores (derecha). (Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).	48
Ilustración 26. Ejemplo de estructura de entrega (izquierda) y obstrucción (derecha) en colectores. (Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).	49
Ilustración 27. Ejemplo de deslizamiento en colector (izquierda) y asentamiento en soleras (derecha). (Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).....	49
Ilustración 28. Ejemplo de desplazamiento en solera (izquierda) y bache en baden (derecha). (Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).	50
Ilustración 29. Ejemplo de oxidación en sumidero (izquierda) y separación de la cuneta (derecha). (Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).	50
Ilustración 30. Ejemplo de discontinuidad en cuneta revestida (izquierda) y socavación en alcantarilla sin muro de boca (derecha). (Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).	51
Ilustración 31. Ejemplo de colapso de la estructura (izquierda) y geometría (derecha) en dissipador. (Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).	51
Ilustración 32. Proceso general de inspección de activos. (Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).	52
Ilustración 33. Revestimiento interior de Acero en Túneles. (Fuente: Túnel urbano en Bilbao, Alliance acero vitrificado).....	55
Ilustración 34. Revestimiento de Hormigón en Túneles.	55
Ilustración 35. Vigas de Techo en Bóveda del Túnel. (Fuente: Mecanismos de Sostenimiento de túneles, Structuralia 2021).....	57
Ilustración 36. Vías de Emergencia en Túneles. (Fuente: Túnel Les Monts Francia, Manual de Túneles de Carretera, PIARC 2019)	58
Ilustración 37. Portal en Túnel Carretero) (Fuente: Túnel de Hsuehshan, Taiwán, Ingeniería y Computación 2007).....	58
Ilustración 38. Lavado interior del túnel. (FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantención y Evaluación en Túneles).....	62
Ilustración 39. Sistemas de captación de filtraciones en túneles. (FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantención y Evaluación en Túneles).....	64
Ilustración 40. Sección del sistema a prueba de agua en la membrana. (FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantención y Evaluación en Túneles)	65
Ilustración 41. Gráfico conceptual del método de valor fijo respecto a condición límite. (Fuente: A methodology for highway asset valuation in Indiana 2012, Dojutrek, M. S., Makwana, P. A., & Labi, S.).....	72

Ilustración 42. Secuencia lógica del cálculo del valor actual de un túnel. (Valor del Patrimonio Vial de la Red Vial Nacional, Dirección de Vialidad MOP 2013)	74
Ilustración 43. Índice de Condición propuesto para elementos del SPCI.	75
Ilustración 44. Cuadro de condiciones límites según severidad detectada.....	77
Ilustración 45. Distribución de costos iniciales (diseño + construcción/equipamiento). Fuente: Recommendations for the Determination of Lifecycle Costs for Road Tunnels (2018).....	82
Ilustración 46. Gráfico comparativo entre Buena y Mala Gestión para el SPCI.....	85
Ilustración 47. Gráfico de valor con depreciación lineal, buena y mala gestión del SPCI para Túnel Cristo Redentor en 20 años de Concesión.....	86
Ilustración 48. Gráfico de valor con depreciación lineal, buena y mala gestión del SPCI para Túnel Pedro Galleguillos en 20 años de Concesión.	86
Ilustración 49. Gráfico de valor con depreciación lineal, buena y mala gestión del SPCI para Túnel Jardín Botánico en 20 años de Concesión.	87
Ilustración 50. Gráfico con valorización de cada elemento en ruta de Zona Norte.	88
Ilustración 51. Gráfico con valorización de cada elemento en ruta de Zona Centro.....	89
Ilustración 52. Gráfico con valorización de cada elemento en Ruta Zona Sur.	90
Ilustración 53. Valor actual de Túneles Viales, con diferentes Índices de Condición para el SSyD.91	
Ilustración 54. Gráfico de relación Longitud del Túnel vs Costo de Construcción y Costo de Excavación.	92
Ilustración 55. Gráficos de variación de valor actual en 100 años de vida útil con depreciación lineal.....	93
Ilustración 56. Gráfico con valores actuales del Sistema Estructural usando VFCL, variando Índice de Condición.	95

Índice de Tablas

Tabla 1. Metodología a utilizar en el desarrollo del proyecto.....	13
Tabla 2. Sistema y Sensores pertenecientes a Monitoreo y Control en Túneles. (Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño)	23
Tabla 3. Elementos del sistema de protección contra incendios.	31
Tabla 4. Elementos que aportan valor patrimonial al Sistema de Protección Contra Incendios.	33
Tabla 5. Elementos del sistema de saneamiento y drenaje en túneles.....	36
Tabla 6. Posibles deterioros en dren longitudinal de PVC.....	38
Tabla 7. Posibles deterioros en colectores de hormigón.	39
Tabla 8. Posibles deterioros en soleras de hormigón.	40
Tabla 9. Posibles deterioros en sumideros de hormigón.	41
Tabla 10. Posibles deterioros en cunetas y contracunetas revestidas de hormigón.....	43
Tabla 11. Posibles deterioros en cunetas revestidas con geotextil.	44
Tabla 12. Posibles deterioros en dissipadores de hormigón.	44
Tabla 13. Posibles deterioros en alcantarillas con muro de boca, de metal corrugado.	45
Tabla 14. Posibles deterioros en alcantarillas con muro de boca, de hormigón.....	46
Tabla 15. Posibles deterioros en badenes de hormigón.....	47
Tabla 16. Elementos del Sistema Estructural.	54
Tabla 17. Deterioros según Materialidad presentes en Elementos del Sistema Estructural.....	60
Tabla 18. Ventajas y desventajas de técnicas basadas en el costo.	68
Tabla 19. Ventajas y desventajas de técnicas basadas en la productividad.....	69
Tabla 20. Ventajas y desventajas de técnicas basadas en la utilidad.....	69
Tabla 21. Compatibilidad de Métodos basados en Costos con el Sistema de Protección contra Incendios.	74
Tabla 22. Compatibilidad de métodos basados en costos con el Sistema de Saneamiento y Drenaje.	76
Tabla 23. Compatibilidad de Métodos basados en Costos con el Sistema Estructural.	79
Tabla 24. Datos de túneles viales en Chile (Dirección de Vialidad, MOP).	81
Tabla 25. Pesos de los sistemas respecto del costo del túnel.	82
Tabla 26. Elementos del SPCI con sus respectivos porcentajes de valor con respecto al sistema completo.....	84
Tabla 27. Cuadro Resumen Porcentajes de diferencia entre Depreciación Lineal, Buena Gestión y Mala Gestión en cada túnel en 20 años de Concesión.	87
Tabla 28. Costos históricos disponibles de Saneamiento y Drenaje en carreteras concesionadas de ruta en Zona Norte.	88
Tabla 29. Costos históricos disponibles de Saneamiento y Drenaje en carretera concesionada de ruta Zona Centro.....	89
Tabla 30. Costos históricos disponibles de Saneamiento y Drenaje en carretera concesionada de Ruta Zona Sur.	90
Tabla 31. Diferencia de Valor Patrimonial en Túneles Viales, con diferentes Índices de Condición para el SSyD.....	91
Tabla 32. Valor Actual del Sistema Estructural usando VFCL, con dos montos escalonados.	94

Propuesta de Modelo de Valorización para los Sistemas de Protección Contra Incendios, Estructural, Saneamiento y Drenaje en Túneles compatible con el Modelo de Nivel de Servicio a los Usuarios de Carreteras Interurbanas Concesionadas

Martín Reyes Touron, Alelí Osorio Lird.

Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

En este trabajo se proponen modelos de valorización del patrimonio vial compatibles con el nivel de servicio a los usuarios, para los sistemas de protección contra incendios, estructural, saneamiento y drenaje en túneles interurbanos concesionado.

La manera en que se desarrolla este trabajo, consiste primero en la recopilación de información mediante diversas fuentes bibliográficas respecto a los sistemas anteriormente mencionados, donde a partir de esto, se obtiene la información de su funcionamiento, modelos de valorización, características de los elementos y elementos de cada sistema y deterioros que afectan según elemento y materialidad, y en relación a esto, se realiza un análisis que permite finalmente, proponer y adaptar una metodología de valorización patrimonial para cada uno de los sistemas en estudio de túneles.

En cuanto a los sistemas, el primero a analizar corresponde al sistema de protección contra incendios, compuesto por diferentes elementos y elementos utilizados para el combate manual contra incendios, vestimenta, planes de respuesta a emergencia, cortinas de agua, redes de válvulas y cañerías, entre otros, donde para valorizar estos elementos se propone la metodología de valor fijo respecto a condición límite, asociando el costo histórico de cada elemento, con un índice de condición binario, que entrega un valor de “1” cuando se cumple la normativa o está en funcionamiento, y un valor “0” en caso contrario, ya que estos elementos son de carácter esencial.

Para el sistema de saneamiento y drenaje, compuesto tanto por drenaje interior y exterior del túnel, se propone la utilización de la metodología de valor fijo respecto a condición límite. El índice de condición evaluado en estos elementos depende de los deterioros que los afectan, y su severidad (baja, media o alta), entregando un valor numérico en cada caso.

Finalmente, para el caso del sistema estructural, se propone la utilización del método de valor fijo respecto a condición límite, ya que se cuenta con un índice de condición cualitativo dependiendo de los deterioros presentes en el informe anual, lo que, junto al costo histórico de construcción y costo de excavación del túnel, entregan un valor para el sistema estructural completo del túnel.

Para trabajos a futuro, se proyecta validar las metodologías propuestas, con el fin de conocer si la información posee una correlación real a lo investigado.

Palabras claves: Patrimonio Vial, Valorización, Metodología, Sistema, Protección contra incendios, Saneamiento y drenaje, Estructural, Valor fijo respecto a condición límite, Túnel.

1. Introducción

El valor patrimonial en Chile asociado a la red de carreteras se estimó cercano a los 27.000 millones de dólares, de una extensión vial que sobrepasa los 80.000 kilómetros. Debido a esto es que se necesita una buena gestión de activos viales para entregar un buen servicio a la sociedad (MOP y Dirección de Vialidad 2013).

La gestión del patrimonio vial, en pocas palabras, requiere conocer cuál es el valor de la infraestructura en términos monetarios, y además obtener de qué forma este activo gana o pierde valor con el paso del tiempo. Para obtener este valor, existen diferentes enfoques, basados en el costo del activo, según su productividad y por último la teoría de utilidad. En Chile la Dirección de vialidad ha realizado valorizaciones del patrimonio vial utilizando modelos basados en depreciación simple para activos como túneles o puentes, y modelos de deterioro empíricos para otros activos como pavimentos.

El activo abordado en este informe corresponde a túneles, el cual se valoriza actualmente a través de su costo estructural, teniendo como valor residual el costo de excavación del mismo (MOP, 2016).

Este activo, se define como obras de infraestructura subterránea 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 elementos que forman parte de la infraestructura, que pueden agruparse en sistemas que contribuyen a la operación y explotación de este. Los seis sistemas fundamentales son Protección contra incendios, Saneamiento y Drenaje, Estructural, Ventilación, Iluminación y Electro mecánico (Sepúlveda, 2019).

En el presente informe se abordarán los sistemas de Protección contra incendio, Saneamiento y Drenaje, y Estructural, identificando los elementos pertenecientes a cada sistema, junto con sus respectivos atributos mediante el análisis de normas tanto a nivel nacional e internacional, con el fin de analizar las inspecciones y mantenimientos necesarios en cada elemento perteneciente a los sistemas mencionados, utilizando alguno de los enfoques de valorización mencionados, con algunas modificaciones para adaptarse a túneles, obteniendo una valorización más precisa en el instante de tiempo que se desea.

2. Objetivos

2.1 Objetivos Generales

La idea general de la presente memoria de título, es proponer una metodología de valorización patrimonial para el activo de carretera Túnel, específicamente en esta memoria se proponen metodologías para los sistemas de protección contra incendios, sistema de saneamiento y drenaje, y finalmente el sistema estructural, las cuales deben ser compatibles con el modelo de nivel de servicio a los usuarios de carreteras interurbanas concesionadas desarrollado previamente.

2.2 Objetivos Específicos

Dentro de los objetivos específicos, se tienen los siguientes:

- Identificar los elementos para cada uno de los sistemas en estudio (protección contra incendios, saneamiento y drenaje, y estructural) del túnel, junto con sus característica y atributos a evaluar.
- Proponer una metodología de valorización adecuada para cada sistema en estudio de túneles, según las características de cada sistema.

3. Metodología

La metodología utilizada en esta investigación, da a conocer los objetivos principales que impulsan este estudio, los cuales son identificar los elementos, con sus respectivas características y atributos a evaluar, para los sistemas de protección contra incendios, saneamiento y drenaje, y estructural de túneles, además de proponer una metodología una metodología de valorización adecuada para cada uno de estos sistemas. A partir de esto, se desglosan tareas, las cuales se deben realizar para cumplir los objetivos específicos, mediante actividades propuestas, las cuales se detallan a continuación:

Tabla 1. Metodología a utilizar en el desarrollo del proyecto.

Objetivos	Tareas	Actividades
Identificar los elementos, con sus respectivas características y atributos a evaluar para los sistemas de protección contra incendios, saneamiento y drenaje, y estructural de túneles.	Identificación de elementos.	Revisión Manual de Carreteras (V3, V6 y V7).
		Revisión BaLi Nacionales.
		Revisión Normativa Internacional.
	Definición de características y atributos a evaluar de cada elemento.	Revisión criterios de obsolescencia.
Proponer una metodología de valorización patrimonial adecuada para los sistemas de protección contra incendios, saneamiento y drenaje, y estructural de túneles.	Elaboración modelo de flujo de valor.	Elaboración Informe Estado del Arte y la Práctica.
	Estimación Vida Útil por elemento.	Revisión bibliográfica Vida Útil.
	Cálculo de valor patrimonial de elementos y de cada sistema.	Revisión bibliográfica de modelos de estimación del valor actual del sistema o elementos.
		Establecer depreciación de cada elemento y pérdida de valor a lo largo del tiempo
		Revisión bibliográfica de metodologías para el cálculo del valor patrimonial de cada elemento y sistema.
		Elaboración de propuesta de metodología para cada elemento y sistema.

4. Sistema de Protección Contra Incendios

4.1 Introducción

Un incendio producido dentro de un túnel, varía en gran medida en cuanto a sus características dependiendo del siniestro que lo provoca, además de factores pertenecientes al túnel como su sistema de ventilación, geometría, tráfico, longitud y el sistema de protección contra incendios.

El sistema de protección contra incendios se encarga de la respuesta ante un evento de incendio, buscando coordinar en todo momento el control y manejo tanto del incendio mismo y el factor secundario del humo, junto con la evacuación oportuna y segura de los usuarios del túnel. Para esto se deben realizar mantenimientos cada cierto tiempo a los componentes del sistema de protección contra incendios, asegurando su correcto funcionamiento, junto con la formación y capacitación adecuada del personal para una respuesta rápida en caso de incendio dentro del túnel.

Se identifican en este sistema, dos clases de elementos; aquellos que tienen una existencia física y se evalúa que tengan un correcto funcionamiento, y los activos que dependen de la gestión del concesionario al preparar y capacitar al personal que trabaja en el túnel, evaluando como es la respuesta o preparación de este factor humano ante una emergencia de incendio.

4.2 Formas para Detectar Incendios en Túneles

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 [1/m].
- Incremento del nivel de monóxido de carbono en valores superiores a 250 ppm.
- Utilización de extintor.
- Aviso desde un teléfono de emergencia.
- Detección, por el sistema de aforos e incidencias, de un vehículo parado.
- Supervisión a través del CCTV.
- 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 al interior del túnel un extintor de polvo seco ABC de 6 [dm³].

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.

Se deberá mantener una corriente de aire entre 1,5 y 2 [m/s], teniendo la precaución de mantener activados preferentemente los ventiladores que estén aguas arriba del incendio. De esta manera se conseguirá mantener libre de humos la zona en la que se hayan podido quedar vehículos inmovilizados y se mantendrá accesible una entrada para los servicios de extinción.¹

El sistema de detección de incendio más utilizado últimamente en la construcción de túneles en Latinoamérica, es el detector lineal bimetalico, que ofrece las condiciones adecuadas para este tipo de aplicación. Se trata de un cable que, al alcanzar una temperatura de 60°C, sufre una alteración de sus características mecánicas, poniendo en corto circuito los conductores entre sí, efecto que se emplea para provocar la alarma de incendio.

Midiendo la resistencia de la línea hasta el punto de cortocircuito o subdividiendo la instalación en sectores, se determina el lugar del incendio en el túnel.

El sistema de ventilación y la red de hidrantes juegan un papel muy importante para minimizar las consecuencias del incendio, reduciendo el humo y la temperatura existente en el interior del túnel. El humo disminuye la visibilidad e impide la intervención adecuada de los equipos de emergencia. Además, genera pánico y provoca el comportamiento anormal de los usuarios.²



*Ilustración 1. Cable lineal detector de temperatura.
(Secretaría de Transporte y Comunicaciones; Manual de Diseño y Construcción)*

Sistema de Detección de Incendios Lineal

Como sistema de detección en el interior del túnel se deberá instalar un sistema de detección lineal que cubra la totalidad del túnel, que sea capaz de detectar un incendio de 10 litros de gasolina y pueda dar al sistema de control la posición del incendio detectado, con una exactitud de al menos 25 [m]. El sistema de detección instalado deberá producir la alarma al llegar a una temperatura determinada, predeterminada durante la fabricación del cable sensor.

¹ Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño.

² Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2016). Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera. México.

El complemento a este equipamiento lo constituyen las entradas en las estaciones remotas de control, así como las rutinas software locales y de centro de control que constituyen el automatismo y la interfase de operador.³

Alarmas

También son de suma importancia para la detección de incendios las alarma, ya que es necesario dar aviso del inicio del fuego lo antes posible, para responder en el menor tiempo posible. En general, las alarmas más utilizadas 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 revisadas o inspeccionadas mensualmente.⁴

Detección en locales técnicos

El equipamiento para la detección en los diversos locales técnicos se compondrá de:

- Un juego de detector iónico - óptico con conexión cruzada por cada local menor a 50 [m2].
- Un juego de detectores térmicos y termovelocimétrico con conexión cruzada dentro de la sala del grupo electrógeno.

Estos detectores se conectarán al sistema de control central del túnel con el fin de poder dar la señal de alarma al operador del centro de control, que será el encargado de avisar a las autoridades competentes del percance (bomberos, carabineros, etc.).

Este equipamiento poseerá también los mecanismos necesarios para poder activar un sistema de extinción automático.

4.3 Elementos del Sistema de Protección Contra Incendios

A continuación, se detallan los elementos que componen cada uno de los elementos presentes en el Sistema de Protección Contra Incendios en Túneles.

Redes de incendio y su equipamiento

▪ Estanques:

Se deberá considerar el diseño de estanques y una red de incendio adecuadas, acorde a las características de cada túnel. El agua será obtenida de una fuente conveniente y elevada a estanques

³ Ministerio de Obras Públicas (2013). Base de Licitación Concesión Américo Vespucio Oriente. Chile.

⁴ Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 7: Mantenimiento Vial.

de almacenamiento. Se deberá contemplar un sistema de control desde el Centro de Control, con luces de advertencia del nivel del pozo, del nivel del estanque, etc.⁵

Consiste básicamente en un estanque elevado que permita por gravedad, contar con los caudales y presiones requeridas, además de contar con un eventual sistema de captación de aguas.⁶



*Ilustración 2. Estanques con reserva de agua para cortinas de agua en caso de incendio.
(Pefipresa 2015, sistemas de protección contra incendios en Túneles).*

▪ **Bombas:**

En caso de ser necesaria, el equipamiento hidráulico para redes de incendio debe contar con este elemento, dependiendo de las condiciones del túnel, para impulsar el agua a los estanques de almacenamiento ubicados en altura.⁷



*Ilustración 3. Bombas eléctricas y de Diesel pertenecientes al SPCI.
(Pefipresa 2015, sistemas de protección contra incendios en Túneles).*

⁵ Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 6: Seguridad Vial.

⁶ Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño.

⁷ Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño.

▪ Red de Cañerías y Válvulas:

Se ubicará una red de extinción de incendios en ambas bocas de entrada y en las oficinas técnicas exteriores y además de deberá contar con una red húmeda de extinción de incendios en el interior del túnel. Esta red estará compuesta por los hidrantes y equipos necesarios para su funcionamiento, los cuales deberán ser proyectados. La presión del agua en la cañería debe ser la adecuada para poder extinguir un incendio a una distancia de 50 [m] del hidrante.⁸

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/minuto]; debe operar con una presión de 6 a 9 atm. La red completa debe ser sometida labores de mantenimiento preventivo por lo menos una vez al año.⁹

Combate manual de incendios y su equipamiento

▪ Gabinetes para Combate de Incendios:

Se deben ubicar gabinetes y su equipamiento para combatir de incendios, cada 50 [m] en túneles tipo C y cada 100 [m] en túneles tipo B (Ilustración 4). Los gabinetes están compuestos por carretes con manguera, teléfonos de emergencia y para comunicación con el centro de control, hachas, luces de emergencia y extintores manuales de 6 [kg].

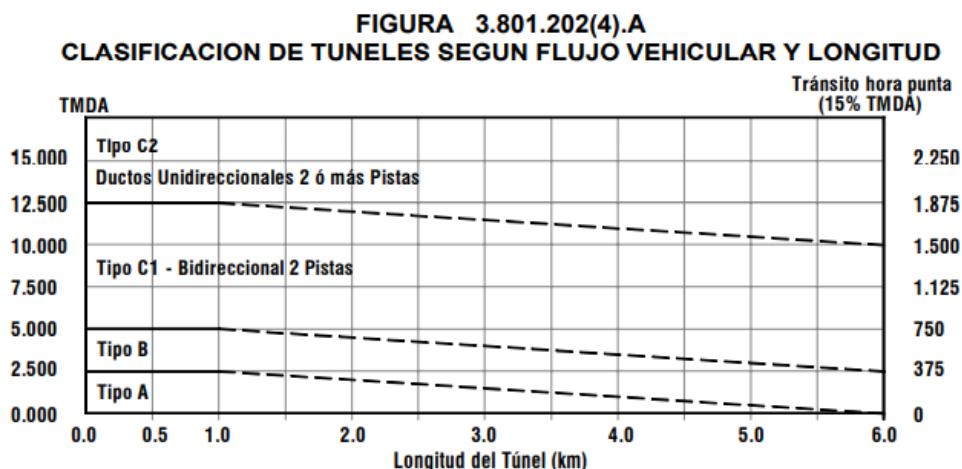


Ilustración 4. Clasificación túneles según flujo vehicular y longitud.
(Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño)

Estos gabinetes también cuentan con sensores de apertura, para ayudar a la temprana detección de un incendio en desarrollo.

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.

⁸ Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 6: Seguridad Vial.

⁹ Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 7: Mantenimiento Vial.

- **Extintores de Incendio:**

Equipos puestos en nichos en las paredes del túnel, dentro de cubículos iluminados con puerta de vidrio delgado fácil de romper en caso de requerirlos. Deben estar indicados con señalización adecuada, reflectante y con iluminación interior. A lo menos ubicados a 200 [m] uno de otro.

- **Teléfonos de Emergencia:**

Teléfonos destacados, y deben funcionar de manera tal que emitan una señal al controlador con solo levantar el auricular no requiriendo discar ningún número. Deben instalarse en nichos cubiertos con un semi techo, y deben ubicarse 1 cada 200 [m].¹⁰

- **Carros Portátiles y su Equipamiento:**

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 $\frac{3}{4}$ de pulgada, una unidad Light water AB con válvula de salida $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Carros porta mangueras, una unidad en cada acceso con tres mangueras con protección externa de caucho de 30 [m]. Dos mangueras de ataque $1\frac{1}{2}$ pulgadas y una de avance de tres pulgadas y gemelo 3 x $1\frac{1}{2}$ x $1\frac{1}{2}$ pulgadas¹¹.

- **Equipo de Protección Personal:**

Vestimenta de protección personal contra fuego, y equipos de respiradores autónomos.



*Ilustración 5. Vestimenta contra incendios y respiradores autónomos.
(WaterFire, Ropa de trabajo y Equipo de Protección contra Incendios)*

Manejo de aire y su equipamiento

- **Ventilación:**

El estudio de ventilación de un túnel de carretera tendrá como fin reducir a límites aceptables la concentración de gases tóxicos y humos expulsados por los vehículos que circulen por el interior del túnel.

¹⁰ Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño.

¹¹ Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2013); Bases de Licitación. Concesión Interconexión Vial Santiago – Valparaíso – Viña del mar.

Serán las condiciones del túnel y del tráfico a soportar las que determinen el sistema de ventilación artificial más adecuado para cada caso. El estudio de la ventilación del túnel tendrá en cuenta la posibilidad de actuación en caso de incendios en el interior.

Salvo justificación en contrario, en túneles paralelos de longitud mayor de un kilómetro se construirán conexiones entre ambos, a distancias y dimensiones adaptadas a las necesidades del tráfico o a otros objetivos de ventilación y seguridad.

Se condiciona la ventilación a la polución debida al tráfico y al final se cita que se tendrá en cuenta el caso de un incendio. Está claro, que, si la ventilación se diseña para evacuar el humo de un incendio, la evacuación de la polución debida al tráfico, en condiciones normales de utilización del túnel, está asegurada. Luego parece más razonable, que la ventilación se diseñe pensando en un posible incendio y no pensando en la utilización normal del túnel.

Esta norma española exige ventilación artificial o forzada a partir de los 300 [m] de longitud del túnel, si existe circulación en doble sentido y el tráfico es bajo. Pero ¿Qué se considera tráfico alto, medio y bajo? La norma no lo indica¹²

▪ **Sistema de ventilación en caso de incendio:**

El objetivo de este sistema es mantener a los usuarios del túnel en la zona de aire fresco el mayor tiempo posible.

Según la Asociación Internacional Permanente de los Congresos de Carretera (PIARC), el sistema de ventilación en caso de incendio tiene los siguientes objetivos:

- Salvar vidas facilitando la evacuación de personas.
- Facilitar la operación de rescate y extinción.
- Evitar el riesgo de explosiones.
- Limitar daños a la estructura y equipamiento del túnel.

En este Manual se establece que todos los túneles de más de 400 [m] deben ser diseñados con un sistema de ventilación, con su correspondiente sistema automático de control capaz de analizar el control de contaminantes en situación normal de tráfico y congestionado, así como el control de calor y humo en caso de incendio. Se establece el criterio para un incendio tipo de 30 [MW] y un caudal de humos de 120 [m³/seg].

El comportamiento de un incendio en el interior de un túnel es de evolución rápida y de graves consecuencias, por las altas temperaturas, la gran cantidad de humos calientes y gases que se producen, constituyendo el control de estos humos uno de los elementos decisivos para la evacuación de los usuarios.

i. Comportamiento del Humo en el Interior del Túnel:

En caso de producirse un incendio en un túnel la forma en que evoluciona la propagación de los gases, así como las temperaturas que se alcancen en las secciones más cercanas al foco, depende fundamentalmente de la velocidad de la corriente de aire en el interior del túnel.

¹² Ministerio de Fomento (1998). Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS 98). España.

Los humos que se generan en el incendio a alta temperatura y, debido a la flotabilidad de éstos alcanzarán la bóveda del túnel, se estratifican, el aire caliente sobre el aire frío, avanzando en la parte alta del túnel hacia cada lado a una velocidad de unos 2 [m/seg], incluso sin ventilación y siendo el túnel horizontal. Cuando el humo caliente se aleja del foco comienza a enfriarse, y va ocupando toda la sección del túnel.

El foco del incendio se alimenta por su parte inferior con corrientes de aire fresco re-entrantes. Según sean las condiciones de la corriente de aire longitudinal en el túnel, la distribución de los humos calientes se producirá, tanto hacia la zona de arriba del foco, como podrá producirse el retorno de esa capa caliente de humos hacia la zona de abajo

Desde el punto de vista de la seguridad en caso de incendio, los objetivos que deben cumplirse son:

- Mantener controlada la nube de humos lo más lejos posible de los usuarios.
- Para conseguirlo debe mantenerse en la medida de lo posible, la estratificación de la misma o expulsarla a gran velocidad si las personas situadas en la zona de abajo del incendio ya han sido evacuadas.
- Evitar la distribución de los humos a zonas próximas al túnel, pero no implicadas en el incendio (locales técnicos, otro cuerpo en túneles comunicados, galerías de escape o de emergencia, etc.).
- Ayudar en las tareas de salvamento a los equipos de rescate.

Todos esos parámetros son actualizados de forma continua por el sistema de control de los grandes túneles y, en función de ellos es posible recomendar un tipo de actuación. La computadora determina esa pauta en segundos y aconseja una forma de actuar a la espera de la conformidad del operario de control. Si al cabo de dos o tres minutos éste no se decide o no está presente, la computadora desencadena la actuación prevista. Es importante mencionar que los primeros minutos son cruciales para controlar el incendio para favorecer la evacuación.

ii. Extracción del Humo en un Incendio:

Tanto la inyección de aire fresco como la succión del viciado, requiere su correspondiente equipo mecánico. En caso de incendio, el ventilador que succiona será el más vulnerable, puesto que todos los gases calientes generados por el incendio, pasarán a través de él. Los expertos recomiendan extraer todo el humo generado en un incendio, en una longitud de túnel de 400 [m] aproximadamente, es decir que el sistema de extracción debe ser capaz de sacar la totalidad del humo en los elementos del dominio establecido en ese espacio limitado, para evitar la propagación del humo a lo largo del túnel.

Este último aspecto es el punto débil de este sistema de extracción, ya que es bastante difícil conducir esa gran cantidad de humo generado en tan poco tiempo, hacia un sentido determinado, sin poder evitar la propagación de humo en el sentido más desfavorable, que siempre será en aquel en el que se encuentran los vehículos detenidos. Estos efectos negativos a veces no solo están motivados por la falta de conjunción entre la capacidad de extracción del sistema y la premura de tiempo, sino porque existen agentes que influyen desfavorablemente en el comportamiento del aire en el interior del túnel, son aleatorios y de difícil control, como puede ser el viento, el efecto chimenea, etc. En definitiva, todos los movimientos de aire longitudinales que provocan turbulencias con el humo estratificado y por consiguiente expansión de la nube de humo hacia los vehículos parados¹³

¹³ Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2016). Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera. México.

▪ 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:

- i. 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.
- ii. Para la opacidad (coeficiente de extinción lumínica K), el valor máximo permitido es de 0.009 [1/m]. 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). El valor de K corresponderá al máximo valor medido, en bloque de mediciones de 5 minutos, en cualquier punto del túnel o trinchera¹⁴.

Monitoreo y Control

▪ Luces de Evacuación de Emergencia:

Luces usadas para indicar el camino hacia las bocas de los túneles en caso de presencia de humo. Son equipados manual o automáticamente en caso de incendio. Debe tratarse de luz blanca que pueda verse a través del humo, instaladas en las paredes a 1 [m] sobre el pavimento y a lo menos cada 50 [m] una de otra, con una capacidad de permanecer a lo menos 1 hora encendidas.



*Ilustración 6. Luces de evacuación de emergencia en túneles.
(MetroLight 2002, Iluminación de emergencia para vías de evacuación)*

¹⁴ Ministerio de Obras Públicas (2013). Base de Licitación Concesión Américo Vespucio Oriente. Chile.

▪ **Señales de Servicio:**

Debe considerarse dentro del túnel la instalación destacada de señales camineras que indiquen la presencia de extintores de incendio, teléfono de emergencia, velocidad y otras condiciones especiales de la obra¹⁵.

▪ **Sistema de Monitoreo y Control:**

Es necesario implementar un sistema eficaz de detección de incidentes, ya que su conocimiento temprano es importante para una operación oportuna y correcta de los sistemas de control instalados.

Los sistemas y sensores que normalmente se requieren en túneles, son al menos los siguientes:

*Tabla 2. Sistema y Sensores pertenecientes a Monitoreo y Control en Túneles.
(Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño)*

SISTEMAS o SENSORES	DESCRIPCIÓN
Circuito cerrado de televisión	Cámaras de video al interior y entradas del túnel, sin dejar puntos ciegos.
Sistemas de telefonía	Permite comunicación entre uno o más usuarios con el Centro de Control. En túneles de longitud superior a 500 [m], debe ubicarse nichos cada 250 [m] con equipos y elementos que permitan al usuario comunicarse con el Centro de Control en caso de necesidad. Al menos debe contener una central telefónica, aparatos telefónicos en los nichos y parlantes que no produzcan reverberación (eco) dentro del túnel.
Sensores de ventilación	Sensores que detectan CO, CO ₂ , NO _x , Opacidad, Velocidad y Dirección del viento para una eficiente operación del sistema de ventilación.
Sensores de detección de incendios	Los detectores de incendios previstos deben generar una alarma ante cualquier incidencia, la cual será transmitida al centro de control. Además, se integran sistemas de control de ventilación, nichos de llamado de emergencia y detección de incidentes.
Sensores de iluminación	Evita cambios bruscos de iluminación entre el exterior y el interior del túnel. Se debe proveer de medidores de luminosidad, uno en cada boca del túnel.
Sensores de conteo y velocidad vehicular	Se utilizan aforadores en la boca de entrada del túnel, de salida y en puntos intermedios, entregando información del flujo vehicular dentro del túnel.
Sensores para control de gálibos (Dimensiones máximas)	Al interior del túnel se ubican paneles de mensaje variable, indicando uso de pistas y señales de limitación de velocidad (dimensiones apropiadas para lectura). En los accesos se ubican semáforos y paneles de señalización variable, sistema de control de altura de vehículos, permitiendo parar o desviar vehículos sobredimensionados.
Señalización para peatones	Señalización y simbología para informar a peatones en caso de emergencias dentro del túnel, priorizando imágenes visuales para facilitar comprensión. Las señales indican salidas de emergencia, vías de evacuación y estaciones de emergencia, las cuales se complementan con señales luminosas.
Sensores de niveles de estanques	Indica niveles de agua de estanques y posición de válvulas, en caso de requerir cortinas de agua eventos de incendios dentro del túnel.

¹⁵ Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño.

En caso de situaciones anormales como accidentes o externalidades, los sistemas de control deben permitir:

- Actuar sobre el sistema de ventilación para adecuarlo a la situación imperante (Nivel de gases tóxicos, opacidad, incendio, etc.)
- Actuar sobre la iluminación para adecuarla a los niveles exteriores, luces de emergencia, etc.
- Actuar sobre los paneles de señalización variable para dar instrucciones a los usuarios.
- Actuar sobre los sistemas de comunicación masiva (altavoces) para instruir a los usuarios en situaciones de emergencia con transito detenido.
- Dar órdenes de inicio de acciones de emergencia preestablecidas al personal correspondiente.
- Actuar sobre válvulas de control de estanques de agua.



*Ilustración 7. Monitoreo de CCTV en Túneles.
(Revista de Transporte Terrestre 2020, Tecnología implementada en Túnel El Melo II)*

Planes de Respuesta a Emergencias (ERP)

■ Planes de Emergencia:

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.

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 Públicas¹⁶.

- **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 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 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 trinchera.
 - 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 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

¹⁶ Norwegian Public Roads Administration (2004). Road Tunnels. Noruega.

pronunciará respecto a dicho plan en un plazo de 10 días. Si el inspector fiscal observare dicho plan, la sociedad concesionaria contará con un plazo de 10 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 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 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 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 vigencia¹⁷.

¹⁷ Ministerio de Obras Publicas (2013). Base de Licitación Concesión Américo Vespucio Oriente. Chile.

4.4 Operación, Mantenimiento e Inspección del Sistema de Protección contra Incendios

En este manual estadounidense, se abarca el sistema de protección contra incendios en túneles, desde ámbitos como la operación, mantenimiento e inspección, donde se rescata lo siguiente¹⁸:

▪ Sistema Contra Incendios y Seguridad en General

Estos sistemas constan de paneles de control, dispositivos de iniciación (Ej., Detectores de calor y humo, estaciones, cámaras), dispositivos de notificación (Ej., luces estroboscópicas, bocinas, radios y mensajes variables letreros), cableado, conductos y cables, y letreros de salida de emergencia, bocas de incendio y extintores. El sistema de sistemas contra incendios y seguridad, se utiliza para detectar un incendio durante una emergencia, para iniciar una respuesta de emergencia, e informar a los usuarios del túnel sobre las acciones de emergencia a tomar.

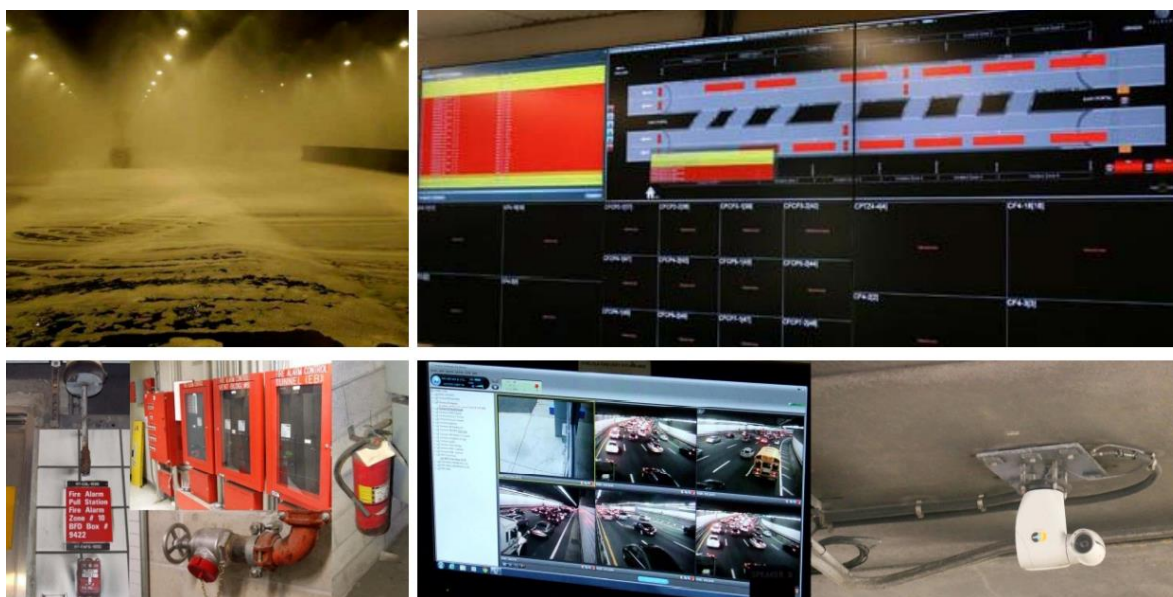


*Ilustración 8. Componentes del sistema contra incendios y seguridad usados en túneles de carretera.
(FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)*

▪ Operación del Túnel

Los incidentes de incendio a menudo requieren medidas de ventilación de emergencia para expulsar el humo, controlar gases sobrecalentados y proporcionar rutas de escape sostenibles. Hay una serie de Problemas de ventilación durante un incendio, como capas posteriores de humo, suministro de oxígeno al fuego, agotar los gases sobrecalentados, presurizar las rutas de escape para repeler el humo y el sobrecalentamiento de los gases. Para minimizar los posibles errores de ventilación durante un incendio, deben establecerse guías escritas para el funcionamiento del sistema de ventilación mecánica para varios escenarios.

Los incendios de túneles pueden ser muy difíciles de extinguir; y estos incendios pueden producir grandes cantidades de humo tóxico y calor peligroso que puede llenar el túnel (Ilustración 9). El operador del túnel tiene la responsabilidad de proteger a los ocupantes del túnel.

¹⁸ FHWA, Tunnel Operations, Maintenance, Inspection and Evaluation, EE. UU. (2015).



*Ilustración 9. Magnitudes posibles de accidentes graves en túneles.
(FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)*

La detección rápida es fundamental en esta cadena de seguridad (equipos de vigilancia, detectores de incendios y humo y control de supervisión). Los sistemas de supervisión de control y adquisición de datos (SCADA) juegan un papel importante en la detección rápida de incendios (Ilustración 10). Las modernas instalaciones de los túneles están protegidas por extintores, sistemas de rociadores y cuentan con protección contra inundaciones (Ilustración 11).



*Ilustración 10. Sistemas de detección de incidentes que facilitan una respuesta a emergencias rápida.
(FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)*



*Ilustración 11. Equipamiento de protección contra incendios y acceso a rutas de escape.
(FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)*

El personal de apoyo contra incendios y otros socorristas deben ser notificados inmediatamente; sin embargo, es posible que los socorristas no siempre lleguen al lugar a tiempo para ayudar con la evacuación. En el período antes de que lleguen los servicios de emergencia al lugar, el auto-rescate

debe ser alentado. Se debe indicar a los vehículos que se encuentran frente al lugar del accidente que salgan del túnel en el sentido del camino. Los ocupantes del túnel atrapados detrás del fuego y los escombros generalmente deben evacuar a pie.

Señalización de pared intuitiva, mensajes audibles y luces que dirigen a los fugitivos a la cruz designada pasajes, portales, rutas de escape y áreas de refugio ayudan a aumentar la capacidad de supervivencia. Señales que muestran la dirección y la distancia a la salida de emergencia más cercana han demostrado ser las más efectivas. La información está disponible en la PIARC y AASHTO, que están realizando estudios sobre la influencia del comportamiento de los usuarios en la efectividad de la señal en condiciones de emergencia simuladas.

El personal del túnel debe responder de acuerdo con los protocolos, la capacitación y los simulacros establecidos. El tráfico debe ser detenido en todas las entradas adyacentes, ya que los cruces pueden usarse para evacuación y propósitos de respuesta a emergencias. La gasolina y otros combustibles pueden aumentar drásticamente la severidad de un incendio. El combustible derramado también puede fluir a puntos de recolección en el sistema de drenaje o ser transportado a otras partes del túnel. Algunos sistemas de drenaje pueden descargar en lugares fuera del túnel. Los monitores deben evaluarse para medir los niveles de gas explosivo después de un choque en varios puntos de recolección en el sistema de drenaje.

▪ **Mantenimiento e Inspección del Sistema Contra Incendio y Seguridad**

Los sistemas de seguridad de vida y contra incendios del túnel son relativamente complejos; estos sistemas contienen componentes sofisticados interconectados que funcionan juntos para mejorar la seguridad contra incendios y humo (Ilustración 12). La Tabla 3-4 de la sección 3 del manual (Anexo 1), proporciona los intervalos sugeridos para realizar actividades preventivas de mantenimiento funcional, en los principales equipos de uso común contra incendios y seguridad. sistemas.

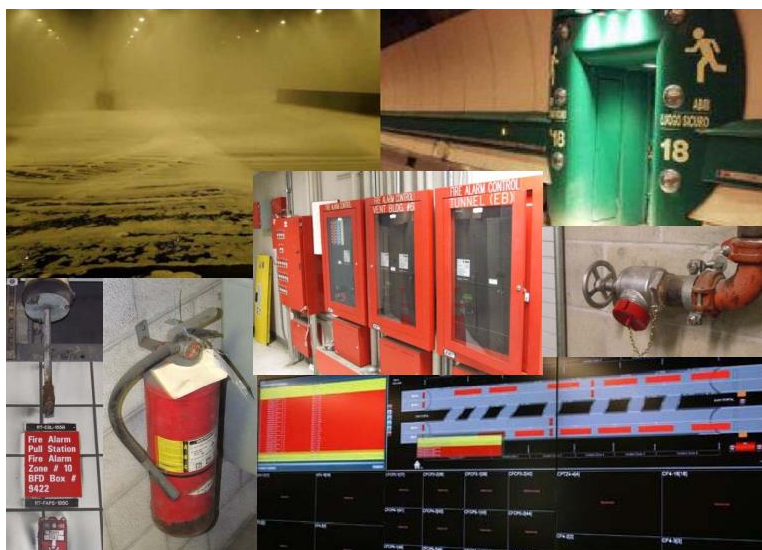


*Ilustración 12. Componentes del sistema contra incendios y seguridad.
(FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)*

▪ *Inspección del Daño después de un Incendio*

Durante un incendio, la seguridad de los usuarios y los socorristas es la primera prioridad. El túnel generalmente requiere medidas de ventilación de emergencia para expulsar el humo, ventilar los gases sobrecalentados y mantener un entorno sostenible para los evacuados y los socorristas. Gasolina y otros materiales combustibles a bordo de los vehículos pueden aumentar la gravedad del incendio. El combustible derramado puede también se acumulan en los puntos de recogida del sistema de drenaje y se transportan a otras partes del túnel. Algunos sistemas de drenaje pueden descargar fluidos contaminados con combustibles a lugares fuera del túnel. Deben usarse monitores para evaluar los niveles de gas explosivo después de un choque.



*Ilustración 13. Evaluación del daño provocado posterior a un incendio.
(FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)*

Al evaluar los daños (Ilustración 13), es útil estimar la intensidad del fuego. Esta información se puede utilizar para respaldar las evaluaciones de seguimiento con respecto al desempeño de un sistema de túneles particular durante un incendio. Una técnica para estimar la temperatura más alta, es identificar los objetos que se han derretido y observar cualquier cambio de color en los materiales. Estas observaciones pueden proporcionar una indicación sobre las temperaturas máximas experimentadas. Los puntos de derretimiento para materiales comunes incluyen el plástico (300 - 450 [°F]), plomo (620 [°F]), vidrio (750 - 900 [°F]), y aluminio (1.200 [°F]).



*Ilustración 14. Cambios de color, que pueden indicar máxima temperatura experimentada.
(FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)*

4.5 Propuesta de Índice de Condición para el Sistema de Protección Contra Incendios en Túneles

El sistema de protección contra incendios se evalúa de forma diferente a los demás sistemas, ya que el éxito frente a un evento de incendio depende tanto de tener el equipamiento necesario como del factor humano. Se debe contar con equipamiento y tecnología necesaria de carácter básico y esencial. En cambio, el factor humano depende del personal operativo del túnel, los servicios de emergencia y los propios usuarios.

La tabla que se muestra a continuación, indica según la literatura analizada, los elementos del SPCI con que debe contar un túnel en general, además de planes de respuesta ante emergencia que deben estar actualizados, con capacitaciones y simulacros cada cierto tiempo, para una respuesta adecuada por parte del personal del túnel ante un incendio. Además, se incorpora la periodicidad de inspección para cada elemento¹⁹.

Tabla 3. Elementos del sistema de protección contra incendios.

Sistema de Protección Contra Incendios		
Componente	Elemento	Periodicidad Inspección
1. Redes de incendio con su equipamiento	Estanques (Gravitacionales)	Trimestral
	Sala de Bombas	Trimestral
	Red de Cañerías	Trimestral
	Válvulas	Trimestral
2. Combate Manual de incendios y su Equipamiento	Carrete con manguera	Semestral
	Teléfono de emergencia	Diario
	Hachas	[-]
	Luz de Emergencia	Mensual
	Extintores Manuales de 6 [kg]	Trimestral
	Carro	Trimestral
	Extintores de al menos 90 [kg]	Trimestral
	Vestimenta	Mensual
3. Manejo de aire y su equipamiento	Equipos de Respiradores Autónomos	Mensual
	Ventiladores extractores de humo	Mensual
	Iluminación antipánico	Mensual
	Red eléctrica a prueba de incendio	Mensual
4. Cortinas de agua	Plan de operación de ventilación	Semestral
	Cortinas de agua	[-]
5. Red Húmeda	Hidrantes	Semestral
6. Monitoreo y Control	CCTV (Cámaras)	Diario
	Sistema de telefonía	Diario

¹⁹ FHWA, Tunnel Operations, Maintenance, Inspection and Evaluation, EE. UU. (2015).

	Sensor de niveles de estanque (Estanque de agua en caso de incendio)	Mensual
7. Sensores de detección de incendio	Pulsadores de alarma de incendio	Mensual
	Detectores de incendio (o Humo)	Mensual
	Detectores de apertura de Puertas S.O.S.	Mensual
8. Planes de Respuesta a Emergencia (ERP)	Descripción del túnel y Equipamiento	Semestral
	Análisis de Riesgo	Semestral
	Posibles escenarios y planes de acción para cada uno.	Semestral
	Salidas de Emergencia (Distancia entre ellas y cantidad)	Semanal
	Señalización e Iluminación de Emergencia	Semanal
	Simulacros de Incendio	Mensual (Realización)
	Capacitaciones y Entrenamientos (Agencias Externas)	Anual (Realización)

En cuanto a los deterioros por parte de este sistema, no se ha encontrado en la literatura revisada modelos para otorgar un índice de condición para este tipo de elementos, sin embargo, se menciona que, al realizar la inspección en este tipo de activos, se debe cumplir que este operativo sin problemas (sin indicios de posibles fallas, como ruidos o vibraciones extrañas), en caso de activos de equipamiento, que se cuente con la existencia de estos (hachas, extinguidores, vestimenta, etc.) y en caso de los planes o procedimientos de emergencia, que estos se encuentre actualizados (información del túnel, simulacros, capacitaciones, etc.).

Se propone una cantidad de elementos, equipamiento y factor humano mínimos y que son básicos para un funcionamiento correcto del sistema de PCI dentro del túnel, dependiendo de la longitud y tráfico (sección transversal o cantidad de pistas), en los cuales se evaluara su condición o funcionamiento, para poder obtener el valor del patrimonio para este sistema.

Se consideran para la evaluación de condición, solo los elementos que verifica su funcionamiento, ya que son los que aportan valor patrimonial al sistema o grupo de elementos, los cuales cuentan con una existencia física.

Estos elementos, al ser de carácter esencial, es decir, no se permite el tráfico de vehículos a través del túnel si es que alguno de estos elementos no está funcionando completamente o no cumple los requisitos establecidos por la normativa, se propone un índice de condición el cual es de carácter binario, entregando una calificación 1 cuando el elemento está operativo, y una calificación de 0 cuando este no se encuentre operativo o no cumpla los requisitos normativos, independiente de la causa por la cual no cumpla.

Índice	
Funcionamiento/Cumple Normativa	
SI	NO
1	0

Ilustración 15. Índice de Condición propuesto para elementos del SPCI.

A continuación, se mencionan los elementos considerados a evaluar con este índice, ya que aportan valor patrimonial al Sistema de Protección Contra Incendios:

Tabla 4. Elementos que aportan valor patrimonial al Sistema de Protección Contra Incendios.

Sistema	Componente	Elemento
Protección Contra Incendios	1. Redes de incendio con su equipamiento	Estanques (Gravitacionales)
		Sala de Bombas
		Red de Cañerías
		Válvulas
	2. Combate Manual de incendios y su Equipamiento	Carrete con manguera
		Teléfono de emergencia
		Hachas
		Luz de Emergencia
		Extintores Manuales de 6 [kg]
		Carro
		Extintores de al menos 90 [kg]
		Vestimenta
		Equipos de Respiradores Autónomos
	3. Manejo de aire y su equipamiento	Ventiladores extractores de humo
		Iluminación anti pánico
		Red eléctrica a prueba de incendio
	4. Cortinas de agua	-
	5. Red Húmeda	Hidrantes
	6. Monitoreo y Control	CCTV (Cámaras)
		Sistema de telefonía
		Sensor de niveles de estanque (Estanque de agua en caso de incendio)
	7. Sensores de detección de incendio	Pulsadores de alarma de incendio
		Detectores de incendio (o Humo)
		Detectores de apertura de Puertas S.O.S.
	8. ERP	Señalización e Iluminación de Emergencia

A partir de esta información, contando con el índice de condición propuesto se procede a evaluar que metodologías son más adecuadas para este sistema, lo que se detalla más adelante en el presente informe.

5. Sistema de Saneamiento y Drenaje

5.1 Introducción

Este sistema se constituye por todos los elementos que ayudan a mantener la calzada libre de agua o líquidos que puedan ser perjudiciales para la estructura y el usuario de la vía. En un túnel las entradas de agua pueden producirse por infiltraciones de aguas subterráneas, precipitaciones, escorrentías, hidrantes, lavado interior del túnel y líquidos provenientes de derrames peligrosos, donde el sistema de saneamiento y drenaje debe considerar todas estas posibilidades y estar preparado para solucionarlas.

5.2 Requerimientos Para Saneamiento Y Drenaje En Túneles

Para el caso de Bases de Licitación, durante la etapa de Construcción, la Sociedad Concesionaria deberá realizar la revisión, rehabilitación y limpieza de todo el sistema de drenaje y saneamiento existente en el tramo. Las obras requeridas entre otras, son limpieza de fosos, contrafosos, cunetas, alcantarillas, sumideros, bajadas de agua, descargas de drenes, reconformación de fosos y contrafosos, reparación de alcantarillas y sus muros, reparación de bajadas de agua, reparación y reconformación de cunetas, reparación de soleras dañadas, etc²⁰.

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 exigencias²¹:

- Los elementos de drenaje deberán limpiarse, al menos, 2 (dos) veces al año.
- 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.
- Cada SDS deberá estar siempre operativo, esto es:
 - o No se debe observar sedimentos sobre la calzada y berma.
 - o No se debe observar en los elementos accesibles destinados a la conducción de aguas, incluyendo alcantarillas y descargas de drenes y sub-drenes, objetos que los obstruyan, alteren su sección normal u obstaculicen el libre escurrimiento de las aguas.
 - o 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

²⁰ Ministerio de Obras Públicas 2013, Bases de Licitación Concesión Interconexión Vial Santiago – Valparaíso – Viña del Mar, Chile.

²¹ Ministerio de Obras Públicas (2013). Base de Licitación Concesión Américo Vespucio Oriente. Chile.

- 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.
- 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, enfierradura a la vista en elementos de hormigón ni corrosión en elementos metálicos.
- 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.

Las acumulaciones de agua en la calzada no deben surgir debido a la falta de mantenimiento del sistema de drenaje. El funcionamiento del sistema de drenaje debe ser comprobado y los tubos de desagüe enjuagados a lo menos cada tres años. El estado general del sistema de drenaje también debe ser verificado durante la limpieza del túnel y después de cualquier mantenimiento realizado.

El sedimento que se ha acumulado en pozos de inspección y tanques de sedimentos, debe ser depositado en sitios especiales aprobados para la eliminación de este tipo de residuos²².

Especial atención deben recibir 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 pavimento²³.

Las entradas de drenaje de las carreteras deben limpiarse de escombros y lavarse con agua para evitar obstrucciones. Estas actividades deben programarse con actividades de lavado de túneles. Serpientes de plomería y cámaras de video de orificio se pueden insertar en tuberías con limpieza para ayudar a

22 Norwegian Public Roads Administration (2004). Road Tunnels. Noruega.

23 Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 7: Mantenimiento Vial.

identificar áreas problemáticas. El sistema de drenaje debe ser monitoreado durante los períodos de frío para reducir la congelación de la tubería y el posible estallido posterior²⁴.

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 el fuego y los líquidos inflamables y tóxicos se propaguen dentro del túnel o entre los túneles paralelos²⁵.

5.3 Elementos Presentes en el Sistema de Saneamiento y Drenaje en Túneles

A partir de la revisión bibliográfica, se determinan los siguientes elementos para el sistema de saneamiento y drenaje, indicando cada cuanto se debe realizar inspección, y los posibles deterioros para cada uno de estos elementos, que se pueden encontrar a la hora de realizar la inspección, que pueden variar su severidad como baja, media y alta.

Tabla 5. Elementos del sistema de saneamiento y drenaje en túneles

Sistema de Drenaje y Saneamiento		
Componente	Elemento	Periodicidad Mantención
1. Drenaje Interior	Drenes Longitudinales	Semestral (MdC); en caso de evidenciar deterioros de severidad Baja o Media, realizar mantención o intervención física; en caso de deterioros con severidad Alta, realizar rehabilitación o reemplazo del elemento.
	Colectores	
	Cámaras de Inspección	
	Soleras	
	Sumideros	
2. Drenaje Exterior	Cunetas (Revestidas o No Revestidas) y Contracunetas	
	Caja disipadora (para evitar erosiones en lavaderos)	
	Alcantarillas (Con o Sin Muro de Boca)	
	Baden (Entrada y Salida de túnel)	

A continuación, se detallan los elementos del sistema de saneamiento y drenaje, en los cuales, dependiendo del material utilizado en la construcción de este, se indican los posibles deterioros en cada uno y el nivel de severidad según el avance del deterioro²⁶. Estos elementos del sistema de saneamiento y drenaje se pueden descomponer, según si el agua proviene desde el interior o exterior del túnel, por lo que es necesario proveer de diferentes características a cada uno de ellos.

²⁴ FHWA, Tunnel Operations, Maintenance, Inspection and Evaluation, EE. UU. (2015).

²⁵ Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 6: Seguridad Vial

²⁶ Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras 2015, Arriagada y Echaveguren, Chile.

Drenaje Interior del Túnel

■ Drenes longitudinales

Consiste en una tubería ranurada a través de una masa de suelo mediante una perforación profunda ligeramente inclinada, con material granular sobre ella, con la finalidad de permitir la infiltración. Su función es la de interceptar acuíferos y el abatimiento del nivel freático. También se utiliza como medida correctiva o preventiva en zonas de riesgo de deslizamientos asociados con la pérdida de resistencia por exceso en la presión de poros o el aumento de peso del suelo por acumulación de agua.

Los drenes longitudinales conducen el agua infiltrada (principalmente de agua acumulada en la calzada) hacia el exterior del túnel. 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 túnel²⁷.

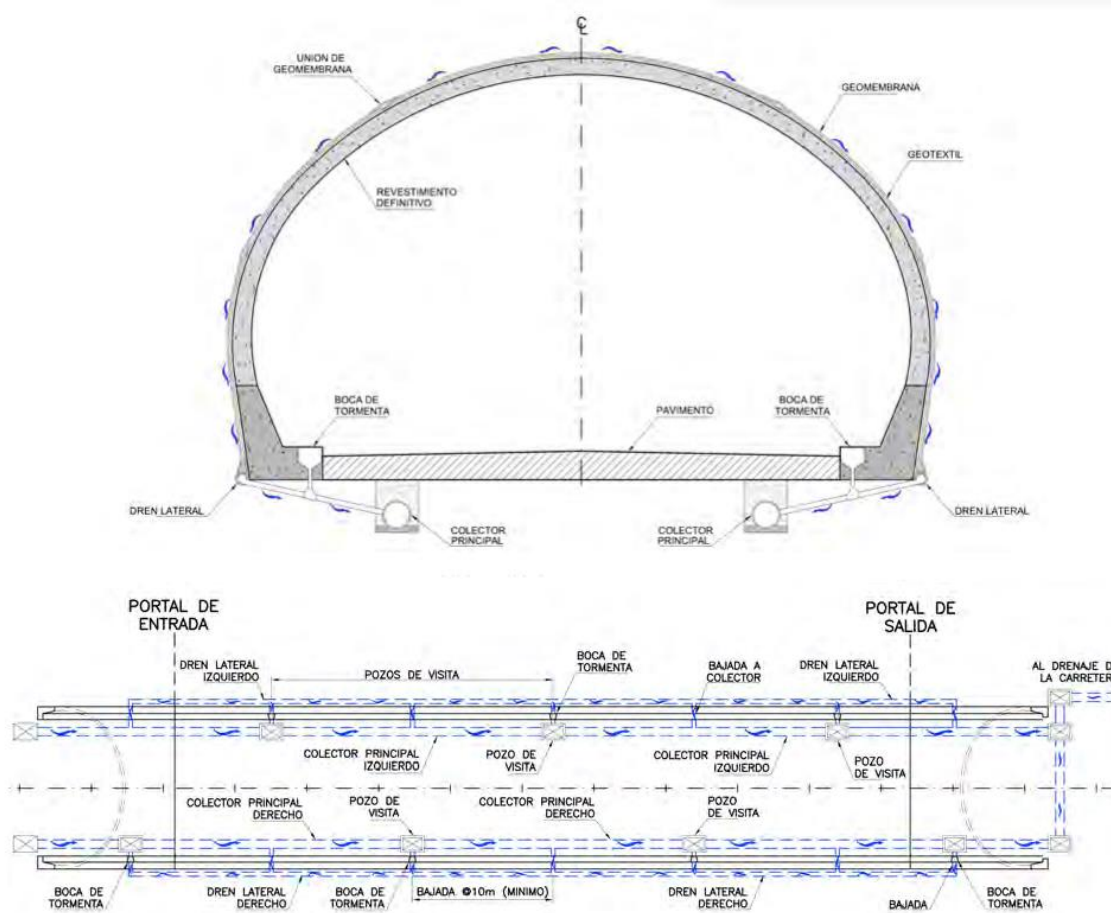


Ilustración 16. Dren Colector Principal longitudinal al interior del túnel.
(Secretaría de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México)

²⁷ Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2016). Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera. México.

■ *Deterioros en drenes longitudinales.*

El deterioro para este elemento, es similar al caso de todos los activos de aguas subterráneas, ya que es complejo la inspección de activos subterráneos, se procede a inspeccionar los efectos visibles en superficie de su mal funcionamiento, deterioro o inexistencia de estos activos. Para el dren longitudinal se tienen 2 deterioros posibles: la presencia de agua en la calzada y socavones²⁸.

Tabla 6. Posibles deterioros en dren longitudinal de PVC.

Elemento:	Dren Longitudinal	Variable a Inspeccionar	Severidad		
Material:	Tubo de PVC		Baja	Media	Alta
Deterioro:	Agua en la calzada	Ancho	< 0,3 m	Entre 0,3 m y 0,6 m	0,6 m
	Socavón	Apreciación Visual	-	Asentamientos considerables	Intransitabilidad

■ *Cámaras de Inspección*

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 cambios 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.

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

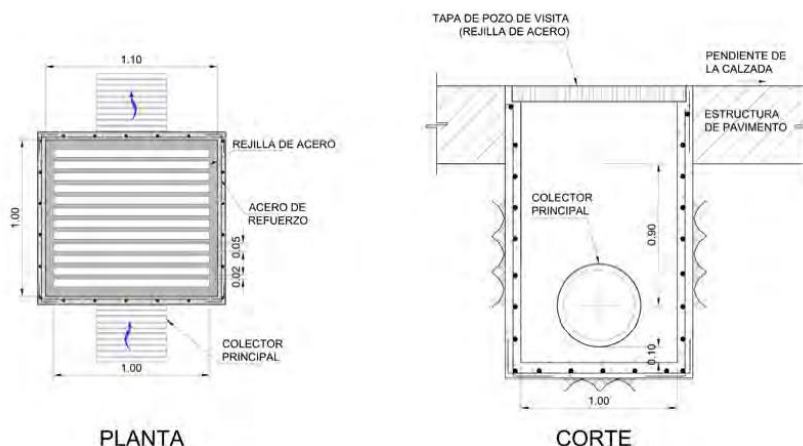


Ilustración 17. Cámara de Inspección con tapa rectangular hecha en obra.
(Secretaría de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México)

²⁸ Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras 2015, Arriagada y Echaveguren, Chile.

■ **Colectores (Canal Colector o Contrafoso)**

Son canales abiertos contruidos en la cima, media ladera o zona inferior del talud o cerro aledaño a la vía. Su trazado se proyecta de manera transversal a la vía, y son revestidos con hormigón. Su función es captar aguas que fluyen desde el talud o ladera de un cerro, hasta entregarlas en cauces naturales u otras áreas adecuadas para ese fin, sin causar erosión del terreno cercano o en la base de la vía²⁹.

■ **Deterioros en colectores**

Para colectores se tienen 7 tipos de deterioros: Escalonamiento, Grietas, Abrasión, Fracturas, Estructura de entrega, Obstrucción y Deslizamiento:

Tabla 7. Posibles deterioros en colectores de hormigón.

Elemento:	Colector	Variable a Inspeccionar	Severidad		
Material:	Hormigón		Baja	Media	Alta
Deterioro:	Escalonamiento	Diferencia de altura	< 0,6 mm	Entre 6 mm y 25 mm	> 25 mm
	Grietas	Abertura	< 0,1 mm	Entre 0,1 mm y 1 mm	> 1 mm
	Abrasión	Apreciación visual	leve de superficie	Superficie medianamente rugosa	Superficie muy rugosa
	Fracturamiento	Apreciación visual	Bloques sin desplazamiento	Separación entre 3 mm y 10 mm	Separación mayor a 10 mm
	Estructura de entrega	Apreciación visual	-	Siempre	-
	Obstrucción	% Obstrucción	< 20 %	Entre 20 % y 50 %	> 50 %
	Deslizamiento	% Obstrucción	< 20 %	Entre 20 % y 50 %	> 50 %

■ **Soleras**

Son cordones de aglomerado, de sección trapezoidal, situado al borde de la berma. Cumplen con la función de conducir las aguas superficiales a una canalización adecuada para su desagüe³⁰.

■ **Deterioros en soleras**

Presentan seis tipos de deterioros, ya que tienen revestimiento de hormigón: Asentamientos, Grietas, Desplazamientos, Obstrucciones, Baches y Estructura de entrega.

²⁹ Secretaria de Comunicaciones y Transporte (2016). Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera. México.

³⁰ Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras 2015, Arriagada y Echaveguren, Chile.

Tabla 8. Posibles deterioros en soleras de hormigón.

Elemento:	Soleras	Variable a	Severidad		
Material:	Hormigón	Inspeccionar	Baja	Media	Alta
Deterioro:	Asentamiento	Profundidad	< 30 mm	Entre 30 mm y 70 mm	> 70 mm
	Grietas	Abertura	< 3 mm	Entre 3 mm y 15 mm	> 15 mm
	Desplazamiento	Ancho	< 2 mm }	Entre 2 mm y 10 mm	> 10 mm
	Obstrucción	Altura	< 30 mm	Entre 30 mm y 70 mm	> 70 mm
	Bache	Ancho	-	< 10 mm	> 10 mm
	Estructura entrega	Apreciación visual	-	Siempre	-

▪ Sumideros

Independiente 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, con la mínima interferencia en el tráfico vehicular y peatonal, evitando que se introduzca al colector material de arrastre o residuos por el cauce, y deberán estar provista de una tapa para realizar el mantenimiento periódico³¹.

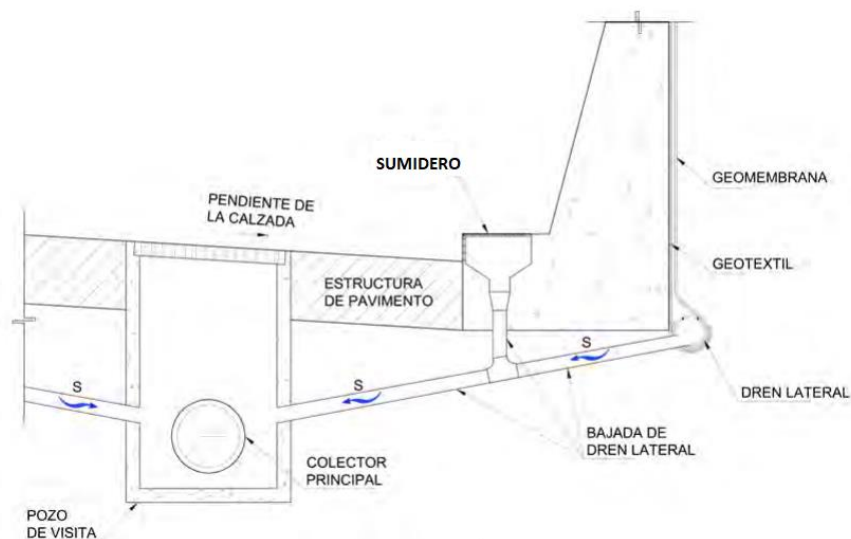


Ilustración 18. Ubicación e Instalación de sumideros.

(Secretaría de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México)

▪ Deterioros en sumideros

Consta con seis deterioros posibles: Escalonamiento, Grietas, Abrasión, Oxidación, Obstrucción y Estructura de entrega.

³¹ Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2016). Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera. México.

Tabla 9. Posibles deterioros en sumideros de hormigón.

Elemento:	Sumidero	Variable a	Severidad		
Material:	Hormigón	Inspeccionar	Baja	Media	Alta
Deterioro:	Escalonamiento	Diferencia de altura	-	< 10 mm	> 10 mm
	Grietas	Ancho	< 1 mm	Entre 1 mm y 5 mm	> 5 mm
	Abrasión	Abrasión superficie	Leve de superficie	Medianamente rugosa	Muy rugosa
	Oxidación	% Superficie repartida	< 5 %	Entre 5 % y 10 %	> 10 %
	Obstrucción	Apreciación visual	< 50 %	Entre 50 % y 100 %	Agua invade pavimento
	Estructura entrega	Apreciación visual	Siempre	-	-

Drenaje Exterior del Túnel

Corresponde al conjunto de obras complementarias, que ayudan a encauzar las aguas superficiales fuera de la zona de taludes y así evitar daños serios por problemas de estabilidad.

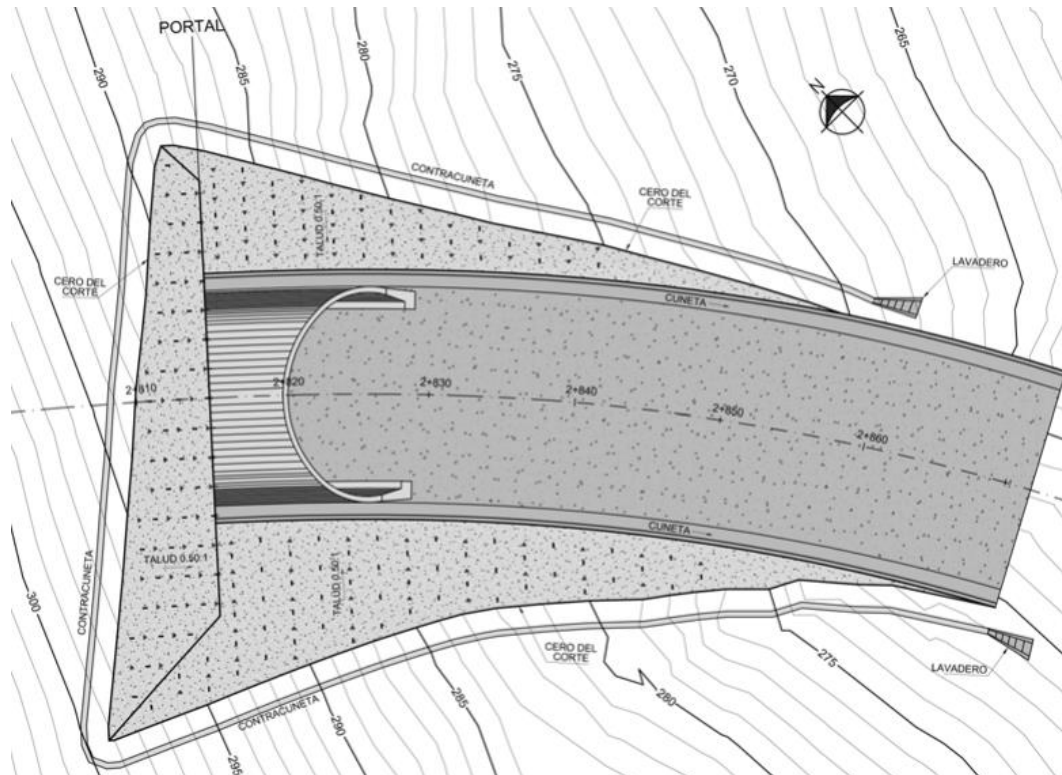


Ilustración 19. Acceso al túnel con obras de drenaje exterior.

(Secretaría de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México)

■ **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.

Las cunetas se construyen generalmente en los costados de las bermas de manera paralela al eje de la vía, revestidos de algún material impermeable, con sección trapecial 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 subrasante³².

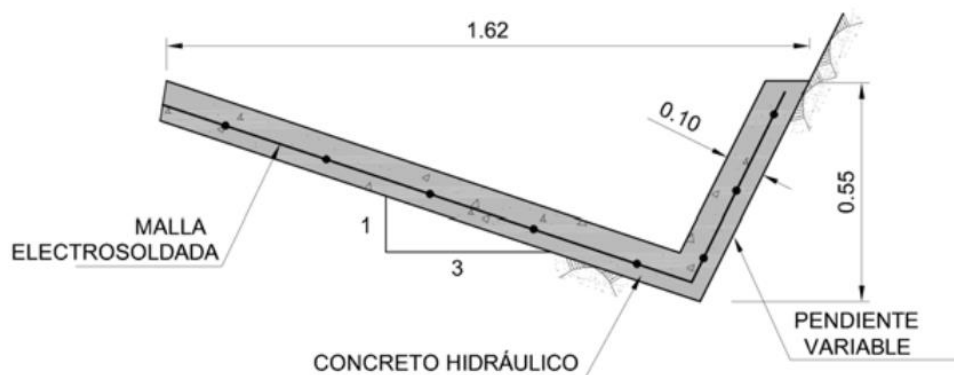


Ilustración 20. Sección tipo de cuneta.

(Secretaría de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México)

■ **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).

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 deberían esperar sobre el talud.

³² Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2016). Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera. México.

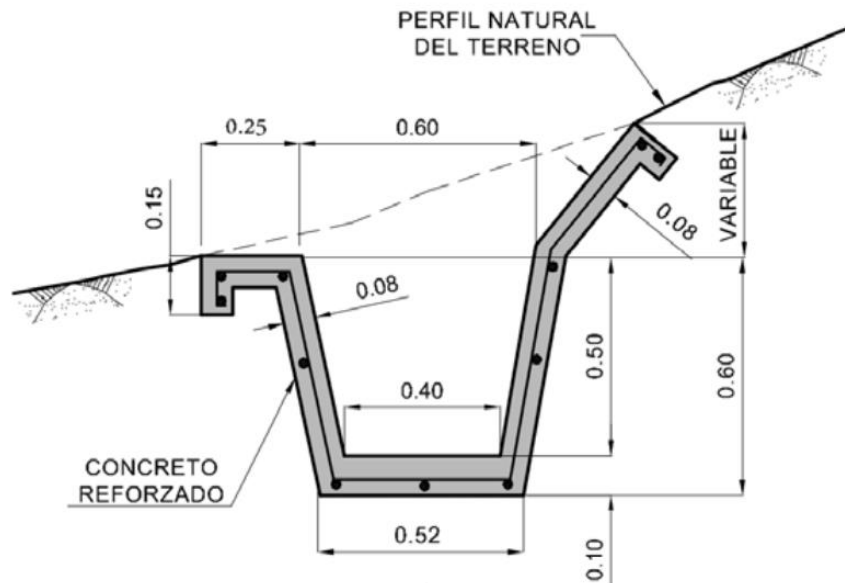


Ilustración 21. Sección tipo de contracuneta.

(Secretaría de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México)

■ Deterioros en cunetas y contracunetas

Se identifican los siguientes tipos de deterioros en este elemento:

Tabla 10. Posibles deterioros en cunetas y contracunetas revestidas de hormigón.

Elemento:	Cuneta/Contracuneta Revestida	Variable a Inspeccionar	Severidad		
Material:	Hormigón		Baja	Media	Alta
Deterioro:	Escalonamiento	Diferencia de altura	< 6 mm	Entre 6 mm y 25 mm	> 25 mm
	Grietas	Ancho	< 0,1 mm	Entre 0,1 mm y 1 mm	> 1 mm
	Abrasión	Abrasión superficie	Leve de superficie	Medianamente rugosa	Muy rugosa
	Bache	Ancho	< 5 cm	Entre 5 cm y 15 cm	> 15 cm
	Fracturamiento	Apreciación visual	Bloques sin desplazamiento	Separación entre 0,1 y 10 mm	Separación mayor a 10 mm
	Separación de la cuneta	Distancia desnivel	< 3 mm	Entre 3 mm y 10 mm	> 10 mm
	Obstrucción	Apreciación visual	< 30 %	Entre 30 % y 70 %	100 %
	Estructura de entrega	Apreciación visual	-	Siempre	-

Tabla 11. Posibles deterioros en cunetas revestidas con geotextil.

Elemento:	Cuneta/Contracuneta Revestida	Variable a Inspeccionar	Severidad		
Material:	Geotextil		Baja	Media	Alta
Deterioro:	Abrasión	Apreciación visual	Abrasión menor	Superficie con roturas	Superficie inexistente
	Separación de la cuneta	Distancia desnivel	-	< 10 mm	> 10 mm
	Discontinuidad	Apreciación visual	-	-	Siempre (informar longitud)
	Obstrucción	Apreciación visual	< 30 %	Entre 30 % y 70 %	100 % (agua invade pavimento)
	Estructura de entrega	Apreciación visual	-	Siempre	-

▪ **Disipador**

Estructuras que permiten la conducción de agua desde un nivel superior a otro inferior en grandes distancias. Funcionan como canales abiertos que consideran la particularidad de quitar energía cinética al fluido mediante obstáculos especialmente diseñados para aquello. Se consideran elementos que disminuyen la energía al flujo constantemente a lo largo del trayecto y otros que en sectores puntuales cuentan con dispositivos a tal efecto. Disipan la energía cinética al flujo por impacto (de manera mecánica), por la formación de resaltos hidráulicos completos o incompletos, generación de turbulencia y aumento en la rugosidad del lecho. Reducen constantemente el proceso de erosión mecánica en el terreno³³.

▪ **Deterioro en disipador**

Para disipadores construidos de hormigón se observan ocho posibles deterioros:

Tabla 12. Posibles deterioros en disipadores de hormigón.

Elemento:	Disipador	Variable a Inspeccionar	Severidad		
Material:	Hormigón		Baja	Media	Alta
Deterioro:	Abrasión	Apreciación visual	Abrasión leve de superficie	Superficie medianamente rugosa	Superficie muy rugosa
	Obstrucción	% Obstrucción	< 20 %	Entre 20 % y 50 %	> 50 %
	Socavación	Profundidad	< 10 mm	Entre 10 mm y 30 mm	> 30 mm
	Colapso	Apreciación visual	-	-	Siempre
	Estructura de entrega	Apreciación visual	-	Siempre	-

³³ Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras 2015, Arriagada y Echaveguren, Chile.

	Escalonamiento	Diferencia de altura	< 6 mm	Entre 6 mm y 25 mm	> 25 mm
	Grietas	Abertura	< 6 mm	Entre 6 mm y 15 mm	> 15 mm
	Geometría	Apreciación visual	Perdida de secciones acotadas	No se distingue geometría	Desintegración total

■ 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 y contracunetas) y darle paso por debajo de la carretera hacia un cauce natural de manera que no afecte los taludes de acceso³⁴.

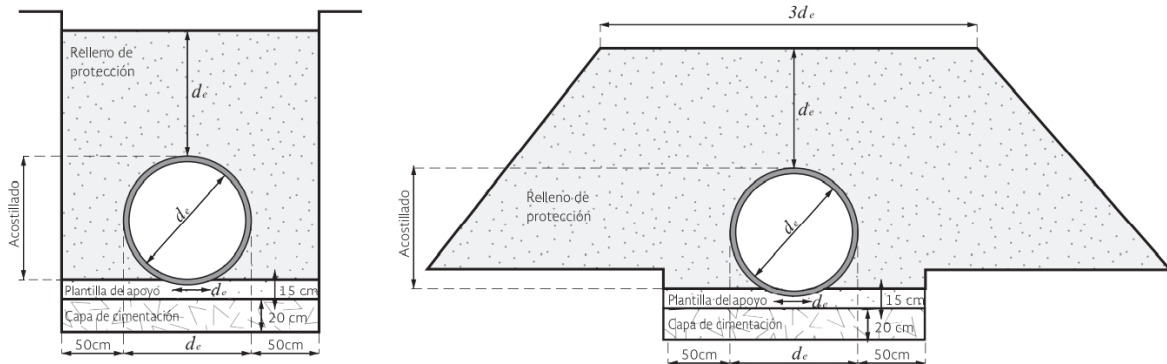


Ilustración 22. Excavación y relleno en alcantarillas.

(Secretaría de Comunicaciones y Transporte 2016, Manual de diseño y construcción de túneles Carreteros, México)

■ Deterioros en alcantarillas

Las alcantarillas con muro de boca pueden presentar los siguientes deterioros:

Tabla 13. Posibles deterioros en alcantarillas con muro de boca, de metal corrugado.

Elemento:	Alcantarilla con muro de boca	Variable a Inspeccionar	Severidad		
Material:	Metal corrugado		Baja	Media	Alta
Deterioro:	Sedimentación	% Obstrucción	< 20 %	Entre 20 % y 50 %	> 50 %
	Deformación	Profundidad de grietas	Todas < 15 mm	Algunas > 15 mm	Desprendimientos
	Abolladura	Profundidad de grietas	< 10 % diámetro	> 10 % diámetro	Rotura

³⁴ Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2016). Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera. México.

	Mala conexión	Deformación de la junta	Abrasión menor	< 10 mm	Entran suelos
	Oxidación	% superficie repartida	< 10 %	Entre 10 % y 50 %	> 50 %
	Exposición al tráfico	Apreciación visual	-	Siempre	-
	Enfierraduras a la vista	Apreciación visual	-	-	Siempre
	Grietas	Profundidad	Todas < 15 mm	Algunas > 15 mm	Desprendimientos
	Fractura	Apreciación visual	-	-	Siempre
	Socavación	Apreciación visual	-	Leve erosión entradas	30 % cauce fluye por debajo

Tabla 14. Posibles deterioros en alcantarillas con muro de boca, de hormigón.

Elemento:	Alcantarilla con muro de boca	Variable a Inspeccionar	Severidad		
Material:	Hormigón		Baja	Media	Alta
Deterioro:	Grietas de tubería	Ancho	< 1 mm	Entre 1 y 5 mm	> 5 mm
	Abrasión	Apreciación visual	-	Superficie medianamente rugosa	Superficie muy rugosa
	Sedimentación	% Obstrucción	< 20 %	Entre 20 % y 50 %	> 50 %
	Mala conexión	Aspecto superficial	Presencia humedad	Infiltra	Entran suelos
	Exposición al tráfico	Apreciación visual	-	Siempre	-
	Enfierradura a la vista	Apreciación visual	-	-	Siempre
	Grietas	Profundidad	Todas < 15 mm	Algunas > 15 mm	Desprendimientos
	Fracturas	Apreciación visual	-	-	Siempre
	Socavación	Apreciación visual	-	Leve erosión entradas	30 % cauce fluye por debajo

▪ **Baden**

Se definen como depresiones en el perfil de una carretera que permiten el paso de vehículos y además actúa como dren superficial generalmente de agua proveniente de una quebrada aledaña que atraviesa la vía. Al tener superficie de rodadura actúa tanto porción del canal como tramo corto de la carretera³⁵.

³⁵ Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras 2015, Arriagada y Echaveguren, Chile.

▪ Deterioros en baden

Los badenes presentan cinco tipos de deterioro:

Tabla 15. Posibles deterioros en badenes de hormigón.

Elemento:	Baden	Variable a	Severidad		
Material:	Hormigón	Inspeccionar	Baja	Media	Alta
Deterioro:	Escalonamiento	Diferencia de altura	< 6 mm	Entre 6 mm y 25 mm	> 25 mm
	Grietas	Abertura	< 3 mm	Entre 3 mm y 15 mm	> 15 mm
	Abrasión	Apreciación visual	Abrasión leve de superficie	Superficie medianamente rugosa	Superficie muy rugosa
	Pendiente	Inclinación	-	< 3.0 %	< 2.5 %
	Bache	Ancho	-	< 10 mm	> 10 mm

5.4 Detalle de Deterioros

A continuación, se detalla en que consiste de manera breve cada uno de los deterioros mencionados en cada tabla previa para cada elemento:

Agua en la Calzada: Se identifican tramos en la calzada con zonas que presentan evidentes escurrimientos de agua, que deberían ser captados por el dren longitudinal. Se considera de igual forma la afloración de agua subterránea desde zonas laterales o en la superficie de taludes.

Socavón: Se entiende como la pérdida de material de relleno o soporte de la vía, que como consecuencia produzca asentamientos considerables de otros activos viales o que deje intransitable la vía por un forado en su superficie. Se deben registrar los [m2] afectados.



Ilustración 23. Ejemplo de agua en la calzada (izquierda) y socavón (derecha).
(Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).

Escalonamiento: Se define como el desnivel entre dos secciones (módulos), separadas o no por una junta transversal.

Grietas: Fisuras por el resultado de esfuerzos mecánicos sobre el concreto. Se pueden relacionar también con defectos constructivos o cargas no consideradas en diseño, que evidencian deterioro estructural del activo. Se considera una inspección de manera aislada (verificando aquellas que permitan infiltración).



*Ilustración 24. Ejemplo de escalonamiento en baden (izquierda) y grietas en cuneta revestida (derecha).
(Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).*

Abrasión: Deterioro en la superficie del activo, se evidencia pérdida de material de revestimiento (hormigón) y presencia de agregados con una cara plana en superficie. Es evidencia de altas velocidades de flujo o agentes erosivos.

Fracturamiento estructural: Agrietamientos en bloques de tamaño mayor de 0,3 [m²]. Se evidencia por la presencia de al menos dos bloques claramente distinguibles en un módulo, de lo contrario se reporta como grietas.



*Ilustración 25. Ejemplo de abrasión en alcantarilla sin muro de boca (izquierda) y fracturamiento estructural en colectores (derecha).
(Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).*

Estructura de entrega: Se debe verificar la forma como se entregan las aguas, verificando si existe la estructura de entrega adecuada (evitando la erosión de activos o terrenos aledaños).

Obstrucción: Obstrucciones en la sección transversal por vegetación o basura (no considera depósitos de suelo) en la estructura, generando estancamiento del fluido.



*Ilustración 26. Ejemplo de estructura de entrega (izquierda) y obstrucción (derecha) en colectores.
(Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).*

Deslizamiento: Depósitos de sedimento que generan un estancamiento del fluido en la sección transversal. Los depósitos provienen de deslizamientos y erosiones de taludes adyacentes.

Asentamiento: Descenso de la cota de la sección media del activo respecto a otro inmediatamente aledaño. Se considera también el ascenso de un activo con respecto a otro.



*Ilustración 27. Ejemplo de deslizamiento en colector (izquierda) y asentamiento en soleras (derecha).
(Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).*

Desplazamiento: Separación entre solera y el revestimiento de la berma inmediatamente aledaña, permitiendo el flujo de agua entre ambas estructuras.

Bache: Desintegración total de una zona puntual del activo, con pérdida de sección transversal, pudiendo afectar inclusive hasta 5 [cm²] (luego se considera pérdida total de la sección afectada de la estructura).



*Ilustración 28. Ejemplo de desplazamiento en solera (izquierda) y bache en baden (derecha).
(Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).*

Oxidación: Presencia de oxido en las paredes del tubo de metal corrugado constituyente de la rejilla de alcantarilla. Se considera de igual manera una sección faltante de la rejilla de metal de la superficie.

Separación de la cuneta: Desnivel de la junta existente entre la calzada (o la berma) con la cuneta. Se considera también (si existe) la separación entre revestimiento y berma no revestida. En la práctica se aprecia un desplazamiento del activo con respecto a la vía.



*Ilustración 29. Ejemplo de oxidación en sumidero (izquierda) y separación de la cuneta (derecha).
(Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).*

Discontinuidad: Falta de secciones (principalmente de recubrimiento) del elemento. Presenta erosión de sus bases en la zona de discontinuidad. Se considera cuando el flujo puede aún retornar su avance por el activo, caso contrario debe informarse como destrucción total.

Socavación: Erosión del suelo alrededor de la estructura. Se evidencian desniveles en la superficie producto de los deslizamientos de terreno (puede inclusive desviarse una parte del caudal transportado por el terreno).



Ilustración 30. Ejemplo de discontinuidad en cuneta revestida (izquierda) y socavación en alcantarilla sin muro de boca (derecha).

(Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).

Colapso: Se identifican los tramos con colapsos en la estructura, precisando si se trata de una falla en la estructura, problemas de inestabilidad del terreno o debido a efectos antrópicos (robo). Informar la causa y destino del cauce (si continua por el terreno o se desvió del trazado original).

Geometría: Deformación geométrica de los desniveles horizontales en la sección transversal. Debe verificarse entonces que se conserven ángulos internos, dimensiones y espesor de los escalones.



Ilustración 31. Ejemplo de colapso de la estructura (izquierda) y geometría (derecha) en dissipador.

(Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).

5.5 Metodología de Inspección Visual y Calificación de Condición

La metodología de inspección considera el modelo de cuatro etapas expuesto en la Ilustración 29, el cual considera en la etapa de “Pre-Inspección” los antecedentes de los elementos y los 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 elementos 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 mantención sugerida luego del análisis de los activos de saneamiento y drenaje estudiados³⁶.

³⁶ Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras 2015, Arriagada y Echaveguren, Chile.



Ilustración 32. Proceso general de inspección de activos.
(Arriagada y Echaveguren; Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras).

▪ **Calificación del estado de elemento inspeccionado**

Los índices necesarios en el proceso 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}).

Para el Índice I (Importancia relativa del activo), se observa cuáles son más esenciales en la operación de la vía, que deben mantenerse siempre en funcionamiento, y cuales pueden considerarse menos importantes, para los cuales no es necesario hacer mantenimiento en el corto plazo. Este valor de indicador, dependerá de las características y dimensiones de cada túnel en estudio y las características climáticas del lugar³⁷.

El índice A_i (Afectación del deterioro i) se obtiene de la importancia asignada a los grupos de deterioro, que según sus efectos son:

- **Desgaste:** Disminución de las capacidades físicas de los materiales (abrasión, oxidación, etc.)
- **Funcionales:** Pérdida de la capacidad funcional de la estructura (obstrucción, desgaste de sellos, etc.)
- **Estructurales:** Disminución de la capacidad resistente de la estructura (Grietas, deformaciones, etc.)
- **Contorno:** Deterioros en áreas aledañas a la estructura, disminuyendo su capacidad de soporte del terreno (erosión, desplazamientos, etc.)

En cuanto a la severidad de cada deterioro, se considera el índice S_{ij} que, según los valores extremos o umbrales indicados en cada deterioro representativo, se obtiene una calificación del estado del deterioro (Baja, Media o Alta).

▪ **Procedimiento de calificación del estado de elementos**

Primero para llevar a cabo la calificación, se obtiene para cada deterioro un ponderador de deterioro (PD_i), que agrupa los índices A_i y S_{ij} según se haya 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 deterioro del activo. Finalmente se obtiene la calificación de estado (CE), donde el procedimiento numérico es:

³⁷ Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras 2015, Arriagada y Echaveguren, Chile.

$$PD_i = A_i S_{ij} \quad (5.1)$$

$$PA = I \sum PD_i \quad (5.2)$$

$$ICSD_a = PA \frac{1}{MAX(PA)} \quad (5.3)$$

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).
- PA : Ponderador del activo.
- I : Índice de importancia del activo.
- $ICSD_a$: Índice de condición para cada activo o elemento.

De esta manera es posible obtener una escala relativa de evaluación, en función del elemento con peor desempeño, lo que entrega una medida de cuales activos necesitan una intervención física o mantención de manera prioritaria.

6. Sistema Estructural

6.1 Introducción

Rara vez la estabilidad estructural de un túnel es puesta en duda, ya que el proceso constructivo se encarga de llegar a un equilibrio de deformaciones, donde el sistema estructural se encarga de mantener este equilibrio. Pero esto no quiere decir que no deba realizarse mantenimiento a los componentes del sistema estructural, ya que pueden encontrarse deterioros individuales como desprendimientos, fisuras, corrosión, etc. Que deben tratarse adecuadamente para evitar riesgos que puedan afectar a los usuarios de la vía.

6.2 Elementos del Sistema Estructural

Según la revisión bibliográfica, tanto nacional como internacional, se determinan los siguientes elementos para el sistema estructural de un túnel, con su respectivo tiempo o periodicidad de inspección, los cuales se detallan a continuación:

Tabla 16. Elementos del Sistema Estructural.

Sistema Estructural	
Elemento	Periodicidad Inspección
Revestimientos (Acero, Hormigón y HP, Madera, Mampostería, Sin Revestimiento (Roca))	- Anual (informe completo); -Revisiones Trimestrales (Auscultación visual y chequeo martillo); -En caso de evento extremo (sismo, incendio, impacto de vehículo, etc.) realizar informe dentro de próximos 3 días por especialista.
Vigas de Techo	
Columnas y Pilotes	
Pasillos de Emergencia	
Paredes Interiores	
Portales	
Estructuras Techo del Túnel	
Juntas y Uniones	

6.2.1 Revestimientos

El revestimiento del túnel apoya el suelo alrededor del túnel y restringe la infiltración de agua subterránea. Muchos túneles tienen dos sistemas de revestimiento de paso, que consta de un revestimiento inicial (o soporte temporal) y un revestimiento final (o apoyo permanente). El soporte inicial generalmente se proporciona con hormigón proyectado y pernos de roca. El revestimiento final generalmente está hecho de revestimientos de hormigón moldeado en el lugar, o segmentos prefabricados de hormigón atornillados y ensamblados³⁸.

Revestimientos de acero: El acero estructural a menudo no se utiliza como un material de revestimiento final debido a su elevado costo, requisitos de fabricación y susceptibilidad a la corrosión. Los túneles más antiguos pueden tener incorporados componentes de acero como parte de

³⁸ FHWA, Tunnel Operations, Maintenance, Inspection and Evaluation, EE. UU. (2015).

su soporte inicial. Los revestimientos temporales más comunes de acero son placas de revestimiento, columnas, vigas y elementos prefabricados. Muchos de estos elementos de acero no fueron diseñados para ser parte de la carga estructural de manera permanente, ya que no estaban suficientemente protegidos contra la corrosión. Por lo general, los elementos de acero temporales se cubrieron o encajaron en revestimientos finales de hormigón. Si se han incorporado componentes de acero estructural en el revestimiento del túnel, estos elementos se deben inspeccionar continuamente.

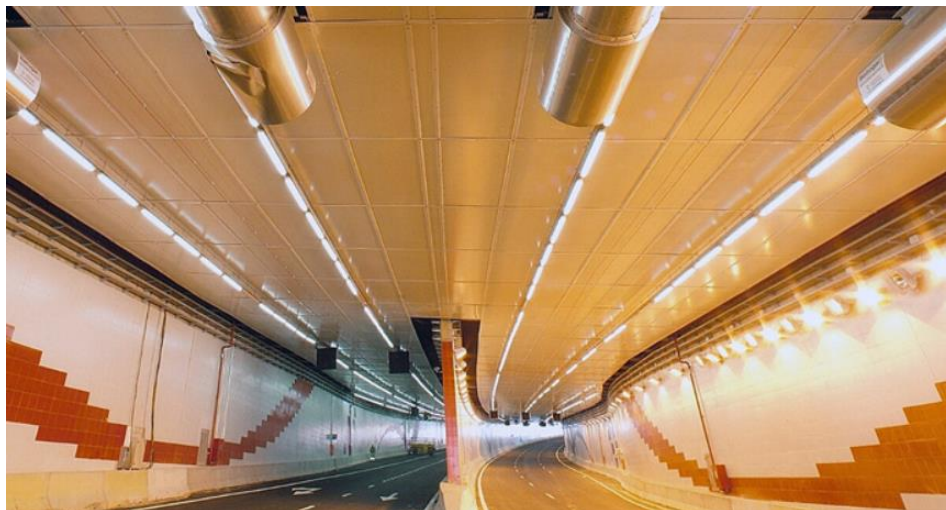


*Ilustración 33. Revestimiento interior de Acero en Túneles.
(Fuente: Túnel urbano en Bilbao, Alliance acero vitrificado)*

Revestimientos de hormigón y hormigón proyectado: Los revestimientos de hormigón prefabricado constituyen la mayor parte de todos los sistemas de revestimiento permanente instalado en túneles de carretera. Debido a su disponibilidad, facilidad de uso y durabilidad, se han instalado revestimientos de hormigón de bajo costo en todo tipo de proyectos de túneles. El hormigón proyectado, se utiliza comúnmente para soporte temporal y como revestimiento final en estructuras con cargas bajas, como túneles de roca que sólo soportan rocas sueltas que podría caer sobre la calzada.



Ilustración 34. Revestimiento de Hormigón en Túneles.

Al inspeccionar estas superficies, se recomienda que el inspector utilice un martillo para hacer sonar el hormigón. Esto debe hacerse en múltiples ubicaciones a lo largo del túnel, y realizarse cerca de defectos conocidos o cuando se sospecha de algún defecto. Cuando se detectan áreas huecas, deben definirse los límites de estas áreas. Al documentar las astillas, se debe anotar el tamaño, la profundidad máxima y la ubicación de las astillas. Al inspeccionar grietas, el largo, ancho, profundidad y la ubicación de estas deben documentarse. Tener en cuenta las grietas con manchas de humedad o corrosión. Inspeccione visualmente las grietas en busca de humedad, fugas, corrosión, manchas y eflorescencias. Registrar la cantidad de fugas activas en número de goteos por minuto o estimar la tasa de flujo continuo.

Revestimientos de madera: Se han instalado revestimientos de madera en algunos túneles de montaña para evitar que caigan piedras sueltas sobre la calzada. El revestimiento de madera puede estar compuesto por techo o secciones de techo, con o sin elementos de pared. Los revestimientos de madera deben inspeccionarse buscando los deterioros descritos anteriormente.

Revestimientos de mampostería: los revestimientos de mampostería no han tenido mucho uso para los túneles de carretera. El método fue reemplazado en gran parte por revestimientos de hormigón. Sin embargo, las estructuras de mampostería son bastante comunes en los portales de los túneles y otros edificios auxiliares.

Túneles sin revestimiento en roca dura: los túneles pueden no tener revestimiento en algunas aplicaciones de roca dura; sin embargo, estos túneles generalmente necesitan refuerzo para evitar que la roca suelta caiga en la calzada. Los pernos de roca y las clavijas se utilizan a menudo para este propósito. También se pueden usar placas u hormigón proyectado en áreas limitadas de túneles sin revestimiento para evitar rocas en la calzada.

Un geólogo o ingeniero geotécnico calificado debe ayudar al equipo de inspección para identificar las deficiencias en el macizo rocoso que potencialmente podrían generar problemas de seguridad y estabilidad en el flujo del tráfico. Se deben monitorear las secciones del túnel para detectar posibles cambios, en intervalos predeterminados (aproximadamente 200 pies).

6.2.2 Vigas de Techo

Una viga de techo es el soporte horizontal principal para un techo de túnel plano. Las vigas del techo sostienen el techo del túnel y las cargas del relleno, sobrecargas y tráfico superior. Estas vigas pueden ser de acero u hormigón. Se debe inspeccionar estos elementos utilizando los métodos descritos anteriormente para hormigón estructural o materiales de acero.



*Ilustración 35. Vigas de Techo en Bóveda del Túnel.
(Fuente: Mecanismos de Sostenimiento de túneles, Structuralia 2021)*

6.2.3 Columnas y Pilotes

Las columnas y pilotes son elementos verticales que generalmente están compuestos de hormigón y/o acero. Los pilotes están incrustados en el suelo y las columnas son elementos independientes ubicados sobre el nivel del suelo. Se pueden incorporar refuerzos laterales para endurecer las columnas.

6.2.4 Vías de Emergencia

Las vías o pasillos de emergencia proporcionan un medio de escape del túnel. En caso de emergencias, los evacuados pueden moverse a un lugar seguro a través de un pasaje transversal y escapar a través de un túnel adyacente. Por lo tanto, estos los pasillos de evacuación no deben estar abarrotados de objetos o escombros, y las puertas deben poder abrirse. El inspector debe verificar si hay grietas, delaminaciones y desconchados en las paredes de hormigón, techos y pisos. Comprobar si hay fugas. Examinar los servicios públicos, luces, conductos, y cualquier sistema de seguridad en caso de deterioros. Si el pasillo está presurizado, una verificación operativa de este sistema es necesaria. Se deben realizar comprobaciones en todas las estructuras de conexión (puertas, ventanas, marcos, techos, pisos, bordillos y pasillos, escaleras, soportes y acabados estructurales).



Ilustración 36. Vías de Emergencia en Túneles.
(Fuente: Túnel Les Monts Francia, Manual de Túneles de Carretera, PIARC 2019)

6.2.5 Portales

Los portales están ubicados en las entradas y salidas del túnel. Al inspeccionar las fachadas del portal, es importante considerar el estado de los elementos que se encuentran por encima de la calzada, ya que las astillas o la caída de objetos podrían afectar la seguridad de los usuarios del túnel. También es importante documentar el estado del material ubicado fuera y encima de los portales, especialmente si existe preocupación por los deslizamientos de tierra. Un deslizamiento de tierra podría dañar fácilmente la fachada del portal o el portal. Un ingeniero geotécnico o geólogo calificado debe ayudar al equipo de inspección cuando evaluar los potenciales deslizamientos de tierra. Inspeccionar las paredes, techos y pisos del edificio del portal en busca de grietas, delaminaciones y desconchados, utilizando los métodos descritos para el material estructural apropiado. Utilice un martillo para hacer sonar paredes en ubicaciones aleatorias y alrededor de defectos. Se deben realizar verificaciones estructurales en todas las conexiones, puertas, ventanas, marcos, techos, pisos, escaleras, soportes, y acabados estructurales.



Ilustración 37. Portal en Túnel Carretero
(Fuente: Túnel de Hsuehshan, Taiwán, Ingeniería y Computación 2007)

6.2.6 Estructuras de Techo del Túnel

Las estructuras de techo en el túnel consisten en losas o paneles que están soportados por vigas o perchas y anclajes. Se instalaron muchos túneles con techos sobre la calzada para crear espacios disponibles para el sistema de ventilación. Este espacio, comúnmente conocido como el pleno superior, se utiliza para descargar o suministrar aire al túnel. El inspector debe asegurarse de que toda la distribución de aire, los difusores, registros y conductos están en buenas condiciones y libres de residuos acumulados. Los elementos estructurales en los techos de túneles incluyen losas de hormigón armado o paneles de hormigón prefabricado que se apoyan en vigas o perchas y anclajes. Estos sistemas de soporte estructural soportan cargas por su propio peso, presiones de ventilación, sobrecarga de personal, presión del viento de camiones y terremotos. Muchas estructuras de techo son relativamente pesadas, proporcionando estabilidad cuando los camiones grandes pasan por el túnel y crean ondas de presión de aire entre el camión y el techo. Ya que los techos se encuentran directamente encima de la calzada, existe la posibilidad de que estos objetos caigan sobre la calzada. Al inspeccionar las estructuras del techo, es fundamental examinar minuciosamente cada componente del sistema de soporte del techo, para garantizar que las cargas del techo se transfieren a los elementos de soporte según el diseño. Antes de realizar una inspección de los elementos del techo, el inspector debe revisar todos los planos y procedimientos pertinentes.

6.2.7 Juntas y Uniones

Las juntas son parte integral de muchos elementos estructurales y se utilizan para simplificar la construcción o adaptarse a las tensiones de las deformaciones térmicas. Las juntas suelen estar selladas para mantener fuera el agua. Se deben examinar las juntas en busca de deterioro, eflorescencia y penetración de humedad. Revisar el hormigón alrededor de la junta en busca de grietas, desconchados y delaminaciones. Utilizar un martillo para hacer sonar el hormigón adyacente a la junta. Verificar el estado de los selladores entre los elementos del panel prefabricado. Documentar las ubicaciones y la gravedad de la penetración de humedad o el deterioro de las juntas. Existen muchos tipos de juntas, como plomo, masilla o caucho. Los materiales de la junta pueden desprenderse de la articulación debido a la infiltración de agua, aflojamiento de los pernos, etc. Las juntas también pueden fallar debido al deterioro químico o biológico del material. Los movimientos estructurales del revestimiento también pueden rasgar o distorsionar la junta y hacer que se rompa.

6.3 Detalle y Tipos de Deterioros

Al inspeccionar túneles, debe ser posible reconocer las deficiencias comunes que afectan los sistemas estructurales, civiles y funcionales. Las observaciones y mediciones utilizadas para realizar inspecciones a elementos del sistema estructural deben ser lo más completas posibles.

Los elementos estructurales se componen de materiales como acero, hormigón, madera y mampostería. Existen diversas técnicas de evaluación de materiales, que incluyen varios campos pruebas, muestreo de materiales y pruebas de laboratorio. Las pruebas de hormigón incluyen métodos de resistencia, métodos sínicos, técnicas ultrasónicas, métodos magnéticos, métodos eléctricos,

métodos nucleares, termografía, radar, radiografía y endoscopios. Las pruebas de campo de acero incluyen radiografía, examen de partículas magnéticas, corrientes parásitas examen, examen con tintes penetrantes y examen ultrasónico. Las pruebas de campo de madera incluyen métodos de penetración, métodos eléctricos y examen ultrasónico

Los deterioros considerados para el sistema estructural, específicos para cada elemento y el material con el que está construido, los mantenimientos que se deben realizar, indicaciones para inspeccionar estos elementos, y los deterioros posibles, se muestran en la siguiente tabla³⁹:

Tabla 17. Deterioros según Materialidad presentes en Elementos del Sistema Estructural.

Deterioros en Materiales Estructurales	
1. Estructuras de Acero	Corrosión
	Grietas
	Hebillas y Torceduras
	Fugas o Filtraciones
	Descamación o Desconchado
2. Estructuras de Hormigón	Incrustación (ESCALA)
	Agrietamiento
	Delaminación
	Descascarado
	Desprendimiento de Articulaciones
	Ventanas Emergentes
	Bolas de Barro
	Eflorescencia
	Teñido
	Forma Panal
3. Estructuras de Madera	Fugas o Filtraciones
	Decaimiento
	Presencia de Insectos
	Grietas o Divisiones
	Daños por Fuego
	Áreas Huecas o Vacías
4. Estructuras de Mampostería	Fugas o Filtraciones
	Revisión de Unidades
	Adhesión del Mortero
	Forma
	Alineación
	Fugas o Filtraciones

³⁹ FHWA, Tunnel Operations, Maintenance, Inspection and Evaluation, EE. UU. (2015).

6.4 Mantenimiento del Sistema Estructural

El mantenimiento del sistema estructural en Túneles interurbanos, va más destinado al revestimiento que cubre la bóveda del túnel. A continuación, se explica en que consiste el mantenimiento de los revestimientos interiores del túnel según su materialidad, y que actividades se realizan según el deterioro que se presente en este sistema.

▪ Revestimientos Funcionales

Este tipo de revestimiento, que habitualmente tiene exigencias de tipo arquitectónico, alcanza normalmente una altura de 2,5 [m] y se extiende a lo largo de los muros de hormigón que aseguran la estabilidad definitiva de la roca; su principal objetivo es colaborar con una mejor luminosidad en el túnel y, por lo tanto, resulta indispensable que se encuentre permanentemente limpio.

Por consideraciones relativas a la seguridad del personal de mantenimiento y de los usuarios, es conveniente que el lavado de estos elementos se ejecute por medios mecánicos, utilizando una solución de agua con detergente que se lanza mediante chorros a presión, seguido de un escobillado mecánico. Antes de lavar, no debe olvidarse de proteger los elementos de toma de muestras del aire, pues si no se procede así será necesario cambiar sus filtros después de cada lavado.

Se recomienda lavar los revestimientos con una periodicidad mínima cada 60.000 vehículos y como máximo cada tres meses.

Un papel similar al revestimiento descrito cumple el cielo del túnel (bóveda o losa); se recomienda lavar este elemento con una periodicidad mínima cada 2.000.000 de vehículos o una vez al año⁴⁰.

Para el sistema estructural también existen mantenciones dependiendo de la frecuencia o necesidad que exista, donde, a continuación, se explica en detalle cómo se realiza la mantención del túnel, ya sea de modo preventivo, bajo demanda o rehabilitaciones necesarias⁴¹.

▪ Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo se lleva a cabo para reducir la probabilidad de fallas y extender la vida útil de componentes. Un enfoque de mantenimiento optimizado se centra en varios esquemas preventivos tales como métodos cíclicos, condicionales y basados en predicciones.

Con los métodos cíclicos, el mantenimiento se realiza a intervalos predeterminados y es común cuando hay una vida útil establecida. El mantenimiento condicional se basa en observaciones y mediciones para medir la aparición de fallas. Un ejemplo de este esquema es el uso de indicadores de desgaste en las correas del ventilador, las cadenas de transmisión y las ruedas dentadas. Finalmente, el mantenimiento predictivo se basa en modelos matemáticos de predicción y análisis estadístico

▪ Mantenimiento Correctivo o Bajo Demanda

⁴⁰ Dirección de Vialidad (2020); Manual de Carreteras Volumen 7: Mantenimiento Vial.

⁴¹ FHWA, Tunnel Operations, Maintenance, Inspection and Evaluation, EE. UU. (2015).

Este tipo de mantenimiento es la estrategia más eficaz contra incidentes difíciles de predecir como daños por impactos de vehículos, mal funcionamiento repentino del equipo o sistemas de túnel que fallan de imprevisto. Los planes de contingencia deben desarrollarse con anticipación para facilitar el proceso de reparación y volver a poner el túnel en servicio.

▪ **Rehabilitación de los Sistemas del Túnel**

Los sistemas de túneles individuales a menudo se rehabilitan cuando están cerca del final de su vida útil. La rehabilitación, también llamada remodelación, implica que se están realizando programas de reparación a gran escala con duraciones extendidas, aportes de ingeniería sustanciales y costos sustanciales. La rehabilitación incluye proyectos como la revisión de los sistemas de ventilación, reemplazo en el sistema de iluminación o haciendo reparaciones estructurales extensas.

6.4.1 Mantenimiento Preventiva del Sistema Estructural

Dentro de las actividades preventivas de mantenimiento importantes para el sistema estructural, destaca la siguiente:

▪ **Lavado interior del Túnel**

El túnel debe lavarse cuando el interior se vuelva opaco por la suciedad (Ilustración 30). El lavado también se recomienda para facilitar el trabajo de inspección. El proceso de lavado consiste en rociar el túnel con agua y detergentes, fregar las superficies con cepillos giratorios y enjuagar el jabón y la suciedad con chorros de agua. La frecuencia de lavado varía de un túnel instalaciones a la siguiente debido a las condiciones ambientales, los niveles de tráfico y el tipo de vehículos como camiones que queman Diesel. Algunos túneles deben lavarse trimestralmente, mientras que otros solo pueden limpiarse anualmente. El lavado del túnel a veces se suspende durante los meses de invierno para evitar la formación de una acumulación excesiva de hielo.



*Ilustración 38. Lavado interior del túnel.
(FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)*

6.4.2 Mantenimiento Bajo Demanda o Correctiva del Sistema Estructural

Continuando con el mantenimiento bajo demanda o correctivo, las cuales se realizan en respuesta a eventos que son más difíciles de predecir por daños por impacto, desconchado del concreto, fallas del equipo y baches, etc. Dentro de este tipo de mantenimiento destacan las siguientes para el sistema estructural:

- ***Daño en el túnel***

Entre otras cosas, los túneles pueden resultar dañados por colisiones de vehículos, incendios, explosiones, inundaciones, terremotos, deslizamientos de rocas y deslizamientos de tierra. Después de uno de estos incidentes, se debe realizar una inspección de daños de acuerdo con las pautas proporcionadas en el Manual, que veremos en la sección de Inspección del Sistema Estructural del túnel más adelante.

- ***Desprendimiento de Hormigón***

El concreto puede aflojarse y desprenderse debido a técnicas de colocación defectuosas, corrosión de las barras de refuerzo, daños por calor excesivo, impacto de vehículos y deterioro. Algunos de estos procesos pueden ocurrir sin previo aviso. Cuando se descubren escombros de concreto en la parte de la calzada del túnel, debe limpiarse inmediatamente; y cualquier hormigón suelto o que cuelgue debe ser quitado utilizando pequeños martillos de mano, palancas, martillos mecánicos u otras herramientas apropiadas.

- ***Filtración de Agua Subterránea a través de Revestimientos***

Las filtraciones de agua subterránea se pueden controlar temporalmente mediante soluciones provisionales utilizando canaletas de captación y revestimientos interiores compuestos; sin embargo, estas soluciones temporales no protegen el revestimiento contra corrosión y degradación a largo plazo. Antes de implementar estos métodos, un ingeniero debe evaluar el potencial de:

- Migración de partículas finas del suelo, creación de vacíos y redistribución de las tensiones alrededor del revestimiento del túnel.
- Migración fina del suelo, provocando obstrucción del drenaje.
- Protección de los materiales estructurales contra la corrosión y una mayor degradación.
- Asentamiento de estructuras adyacentes debido a la deshidratación del suelo o del macizo rocoso.
- Ocultación de importantes defectos de seguridad durante futuras inspecciones del revestimiento final.

Entre las posibilidades de reparación de este problema de filtración de agua, el manual rescata las siguientes:

i. Canaletas y Tuberías de Captación

Se pueden instalar canaletas en el interior del revestimiento para recoger el agua que gotea y llevarla al sistema de drenaje mediante tuberías interconectadas. Estos sistemas están hechos de neopreno, acero, tubos de fibra de vidrio y de PVC flexibles o rígidos; sin embargo, algunos de los materiales de tipo plástico liberan humos tóxicos durante los incendios. En la Ilustración 31 se pueden observar sistemas de captación simples, pero también hay sistemas más complejos que minimizan las posibilidades de fuga de agua. La acumulación de presiones hidrostáticas se puede aliviar un poco drenándolas, lo que en última instancia podría reducir la cantidad de grietas en el revestimiento del túnel.



*Ilustración 39. Sistemas de captación de filtraciones en túneles.
(FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)*

El tamaño y tipo de la canaleta depende de factores como la gravedad de la infiltración de agua, la posibilidad de congelación en el invierno, la inclinación de las grietas y consideraciones para el fuego en el túnel. Los problemas de obstrucción se pueden minimizar limpiando el sistema y filtrando el agua. En climas más fríos, el aislamiento o la calefacción generalmente pueden prevenir la formación de hielo.

ii. Revestimientos Interiores Compuestos para Túneles:

Se puede construir un revestimiento compuesto en el interior del revestimiento del túnel para controlar la filtración. Esto se logra colocando una membrana impermeable y un geotextil entre los revestimientos del túnel existente y una nueva capa de hormigón proyectado aplicado (Ilustración 32). Se utiliza un geotextil para proteger la membrana impermeable de daños y proporcionar un camino para el drenaje. Para drenaje más significativo, se puede utilizar un geo-drenaje. Poliuretano

de alta densidad (HDPE) y polivinilo El cloruro (PVC) crean una barrera impermeable. La aplicación de hormigón proyectado protege los materiales contra incendios.

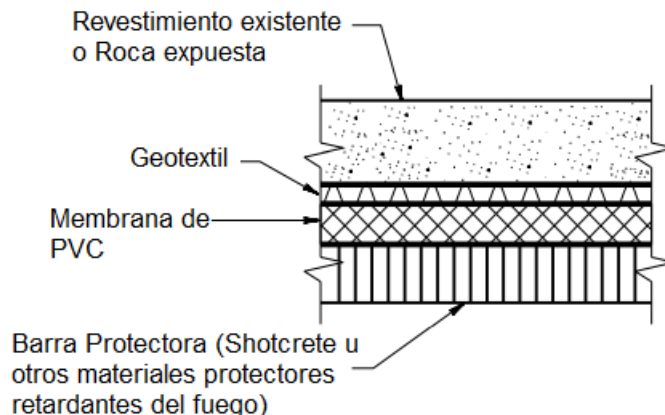


*Ilustración 40. Sección del sistema a prueba de agua en la membrana.
(FHWA; Manual de Operación, Inspección, Mantenimiento y Evaluación en Túneles)*

Antes de la instalación de los revestimientos compuestos, las áreas de la superficie deben limpiarse con pequeños martillos cinceladores, rociadores de agua de alta velocidad o cepillos de alambre. Grietas y juntas que gotean primero deben sellarse. Colocar un parche termosellado sobre las ubicaciones de anclaje se considera “buena práctica” para minimizar las posibilidades de futuras fugas.

El agua que circula puede hacer que se desprendan las láminas impermeabilizantes del lado negativo. El anclaje insuficiente, la soldadura deficiente y los materiales inadecuados son problemas comunes.

iii. Barreras Exteriores de Agua Subterránea:

Las barreras exteriores de agua subterránea son difíciles de instalar en túneles existentes. Cuando las disposiciones apropiadas están incorporadas en el diseño, algunos elementos con fugas se pueden tratar con selladores. En casos extremos, se pueden instalar barreras externas para formar un muro de corte impermeable; sin embargo, este método es caro y no siempre es factible. Cuando se construyen los túneles en roca fracturada, las discontinuidades se pueden enlechar con cierto éxito para formar una cortina exterior; sin embargo, con este enfoque, las fugas generalmente se “persiguen” a una nueva ubicación.

iv. Recubrimientos de Cemento:

Los recubrimientos cementosos se pueden rociar sobre una superficie de concreto húmedo para ayudar a reducir su permeabilidad. Mantener una superficie húmeda facilitará la formación de enlaces químicos con la cal libre contenida en el sustrato de hormigón y reduce el tamaño de los poros, que tiende a inhibir la filtración.

v. Juntas de Construcción:

Si las juntas de construcción tienen fugas, entonces se puede inyectar lechada química para sellar la junta. Los defectos como delaminaciones y desconchados cerca de la articulación deben eliminarse y reconstruirse con sonido. materiales que tienen propiedades similares al sustrato de hormigón.

Mientras realiza el trabajo, la filtración el agua se puede dirigir al sistema de drenaje utilizando una tubería de drenaje flexible.

vi. Grietas Secas:

Las grietas secas (generalmente de más de 1/32 "de ancho) se pueden reparar en una superficie horizontal al represar los bordes de la grieta y permitir que el sellador penetre en la grieta. En todos los casos las grietas deben limpiarse de toda materia suelta, suciedad y manchas con agua a alta presión o aire comprimido.

vii. Penetración de Sal y Congelación/Descongelación:

En climas más fríos, el reverso de la calzada puede tratarse con sal para evitar la formación de hielo en la superficie de desgaste, especialmente cerca de los portales del túnel. Los iones de cloruro en la sal pueden filtrarse en las estructuras de hormigón adyacentes y acelerar la velocidad de corrosión en el acero de refuerzo, lo que puede provocar un desconchado del concreto o un aumento en la tasa de baches. En túneles más antiguos construidos antes En 1950, el hormigón generalmente se mezclaba sin aditivos incorporadores de aire. La entrada de aire natural en estas viejas estructuras de hormigón puede no ser suficiente para resistir adecuadamente el daño. causado por ciclos repetitivos de congelación / descongelación.

6.5 Informe de Evaluación e Índice de Condición

Para el modelo de Nivel de Servicio a los usuarios elaborado previamente⁴², se propone el desarrollo de un informe completo del estado estructural del túnel, basado en métodos de auscultación visual y monitoreo usando sistemas de escaneo por tecnología láser, ultrasonido, e incluso micro-geofísica. El objetivo de esto, es de una manera preventiva, basado en la activación del daño en los distintos elementos estructurales a saber: Pernos de anclaje, hormigón de revestimiento, marcos de acero, hormigón proyectado, etc. Considerando como el principal factor que evidenciara daños estructurales, la apertura de grietas en el hormigón de revestimiento.

Este informe completo, se generará con una frecuencia anual, basado en las tecnologías mencionadas anteriormente en los elementos estructurales de este sistema, complementado por revisiones trimestrales mediante inspecciones visuales y chequeo martillo como mínimo. En caso de catástrofe como sismo, atentado, incendio, impacto de vehículo u otros eventos extraordinarios que pudieran afectar la estabilidad de la estructura, se deberá realizar un informe por especialistas que detallen las condiciones reales del túnel dentro de los tres primeros días.

A partir de la inspección realizada, según el deterioro encontrado y el avance o grado de este, se realiza el informe completo, entregando una calificación de condición general del sistema estructural, según la siguiente escala:

⁴² Indicadores de Desempeño en Túneles Viales para Modelo de Nivel de Servicio de Carreteras 2019, R. Sepúlveda.

- **Estado Excelente:** No se detectan deterioros
- **Estado Bueno:** No son necesarias reparaciones, salvo en ciertas zonas o elementos con deterioros leves aislados (separados más de 3 [m]) y algunas pequeñas zonas de eflorescencias
- **Estado Regular:** Son necesarias reparaciones leves pero los elementos o elementos estructurales siguen cumpliendo su función. En el hormigón aparecen grietas de gravedad media (ancho > 1 [mm]) con separaciones entre 1.5 y 3 [m] entre ellas 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, eflorescencias y el descascarado están presentes en una superficie amplia y se presentan filtraciones graves (goteras > 30 [gotas/min], tramos mayores que 1 [litro/min] cada 100 [m]). El hormigón presenta más del 50 % de su superficie con delaminaciones, desconchados y armaduras expuestas, han perdido un 15 % de su cuantía.
- **Estado Grave:** Se necesitan reparaciones importantes y 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 necesitar reparaciones inmediatas. El hormigón presenta una extensa superficie con delaminaciones y numerosos deterioros graves: grietas (> 3 [mm]), desconchados (profundidad > 25 [mm], diámetro > 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. Técnicas de Valorización

De la revisión bibliográfica realizada, se analizan diferentes técnicas para la valorización patrimonial de activos, de las cuales destacan las siguientes:

- Técnicas basadas en el costo:

En este caso, el valor del activo vial corresponde al coto histórico de construcción, de reemplazo o de adquisición (valor base), pudiendo ser ajustado o no por depreciación y/o deterioro en el tiempo.

Son las más utilizadas actualmente para la valorización de activos viales. Dentro de estas, existen métodos con un enfoque centrado en la **contabilidad**, mientras que otros están centrados en **aspectos ingenieriles** de los activos. Los métodos **tradicionales** basados en el costo incluyen los enfoques de **depreciación**, el enfoque “**modificado**” y el “**otro**” enfoque.

Los enfoques de depreciación no son los óptimos ya que considera una vida útil fija y no evalúan la condición del activo en el tiempo para su cálculo de valor patrimonial. Podrían utilizarse en activos de menor valor, cuya vida útil esperada sea muy menor que la vida útil de la carretera completa, y no justifique un cálculo más detallado.

Los métodos modificados si podrían ser buenas opciones, ya que evalúan la condición del activo en estados aceptables y no aceptables.

Tabla 18. Ventajas y desventajas de técnicas basadas en el costo.

Objetivo/Definición	Ventajas	Desventajas
Basado en costos de reemplazo o construcción (histórico). Hay distintos métodos de cálculo, pudiendo considerar la condición y vida útil de los activos	- Hay distintos métodos desarrollados y utilizados actualmente. - Consideran la condición y/o vida útil de los activos, lo que se puede relacionar con el nivel de servicio a los usuarios. - Algunos métodos son compatibles con el modelo de nivel de servicio ya que utilizan umbrales de condición. - Tienen un bajo costo de cálculo, generalmente. - Son útiles para valorar activos que no son comúnmente vendidos en el mercado o que no forman parte de uno.	- Hay distintos métodos desarrollados y utilizados actualmente, por lo tanto, se pueden tener distintos valores para un mismo activo. - Algunos métodos necesitan calibración en base a datos y/o necesitan modelos de comportamiento de desempeño. - No consideran el rol económico que tienen los activos. - Generalmente, no toma en cuenta la funcionalidad ni la utilización general de los activos, solo la condición física.

- Técnicas basadas en la productividad:

El valor del activo vial se basa en el beneficio o impacto económico que logra durante su vida de servicio. Se consideran ahorros de tiempos de viaje, costos operacionales, niveles de tránsito, actividad de la zona y otros factores de impacto económico directos e indirectos en la sociedad.

Dentro de este enfoque sólo se destaca un trabajo de tesis (Stone, 2014), el cual tiene como objetivo establecer un marco metodológico para cuantificar el valor económico de las carreteras existentes.

Tabla 19. Ventajas y desventajas de técnicas basadas en la productividad.

Objetivo/Definición	Ventajas	Desventajas
Basados en beneficio económico que trae un activo en su vida de servicio. Son técnicas basadas netamente en la productividad, considerando tiempos de viaje, nivel de tránsito y actividad de la zona.	- Evaluación económica se utiliza como respaldo para la toma de decisiones financieras. - Incluye todos los costos en que deben incurrirse para reemplazar un activo. - Es adaptable a las necesidades de las agencias viales. - Consideran el rol económico de los activos. - Permiten conocer el impacto de una posible falla o no funcionamiento de una autopista.	- No se considera impacto directo de construcción, rehabilitación y mantenimiento. - No se considera la condición de los activos ni la vida útil. - No se puede compatibilizar con el modelo de nivel de servicio, ya que no trabaja con indicadores técnicos. - Uso limitado por parte de agencias viales en la actualidad (poco utilizado). - Pueden tener un alto costo computacional, al considerar el desarrollo de modelos de redes de transporte. - Se deben hacer muchas suposiciones y las fuerzas de mercado afectan la valoración.

- Técnicas basadas en la teoría de la utilidad:

Estas técnicas buscan mezclar los dos enfoques anteriores (costo y productividad), asignando una función de utilidad a cada uno de los indicadores de desempeño de los activos viales, que pueden estar relacionados con su condición física, funcionalidad y utilidad general.

Este enfoque permite calcular el valor actual de activos viales ocupando el **costo de reemplazo** como **valor base**, y luego agregándole valor según tres **factores clave**, que corresponden a la **condición física, funcionalidad y utilización general** de los activos.

El objetivo de utilizar este enfoque es estimar el valor de activos viales, reflejando no sólo el **valor de capital** sino también la **productividad económica**.

Tabla 20. Ventajas y desventajas de técnicas basadas en la utilidad.

Objetivo/Definición	Ventajas	Desventajas
Basado tanto en el impacto económico como en los costos, al considerar medidas de desempeño para tres factores clave: condición física, funcionalidad y utilización general de los activos.	- Considera la condición física y funcionalidad de los activos. - Considera los beneficios y/o le agrega valor a una carretera en función de su desempeño. - Considera tanto el rol económico como el valor capitalizado de los activos. - Otorga flexibilidad al momento de escoger medidas de desempeño.	- Requiere de muchos supuestos y consideraciones en el cálculo de factores clave, además de datos para calibrar las funciones. - El factor de utilidad total es siempre positivo (entre 0 y 1), por lo que no consideran pérdidas de condición. - Se requiere del desarrollo de funciones de utilidad, que dependen de la actitud hacia el riesgo de cada agencia.

La técnica de valorización patrimonial que más se adapta a las necesidades del proyecto, son las basadas en el costo, ya que se necesita que incorporen la condición del activo, junto con su obsolescencia (umbrales de mantención o intervención del activo), que lo hace compatible con el nivel de servicio a los usuarios⁴³.

Existen varios métodos enfocados en el costo, ya sea de depreciación, enfoques modificados, que incluyen la condición del activo, otros enfoques incluyen parámetros como el costo de reemplazo, costo histórico, costo de rehabilitación, etc. Y los enfoques nuevos que han emergido en los últimos años⁴⁴.

A continuación, se presentan posibles candidatos para la valorización patrimonial en los sistemas de protección contra incendios, saneamiento y drenaje, y estructural en túneles.

Método 1: Costo histórico

En este método, el valor patrimonial del activo corresponde a su costo histórico, referido a su costo de construcción original o de compra según la naturaleza del elemento, considerando lo que se gastó originalmente en el elemento. Método recomendado para el sistema de protección contra incendios (PCI), al ser elementos de bajo valor y sin considerar un índice de condición. El valor del activo se calcula según la ecuación 7.1:

$$V_t = CH \quad (7.1)$$

Donde:

- V_t : Valor del elemento en el año t.
- CH : Costo Histórico (monto gastado originalmente en la construcción o adquisición del elemento).

Método 2: Prueba de Concepto de Colorado

Básicamente, es un enfoque basado en costos con un descuento adicional. Este método es buen candidato especialmente para el sistema de protección contra incendios (PCI), ya que estima un valor patrimonial a partir de los datos disponibles de costo histórico, e índice de condición binario dependiendo si el elemento se encuentra funcional o no, obteniendo el valor del capital de la infraestructura según su condición actual⁴⁵. La metodología, para el caso de túneles, utiliza un método de costo unitario para el valor de reemplazo y un enfoque basado en condiciones para el valor actual como evaluaciones de condición. El valor patrimonial del elemento se calcula según la ecuación 7.2.

$$V_t = \sum_i rv_i * WC_i$$
$$rv_i = \text{Costo unitario}_i * q_i \quad (7.2)$$

⁴³ Resumen y análisis de métodos basados en el costo 2021, Arce, L., Chile.

⁴⁴ A methodology for highway asset valuation in Indiana 2012, Dojutrek, M. S., Makwana, P. A., & Labi, S.

⁴⁵ Asset Valuation of Transportation Infrastructure, Proof of Concept in Colorado 2017, Weldemicael E., Xiaoyang S. & Redd L.

Donde:

- V_t : Valor del elemento en el año t.
- rv_i : Costo de reemplazo del elemento i.
- WC_i : Índice de Calificación de Condición.
- q_i : Cantidad de elementos i.

Método 3: Valor Ajustado Respecto a Condición Limite

Método similar a costo de reemplazo escrito, solo que, en este caso, se ajusta la relación de condición con respecto a un umbral de condición limite, es decir, a la peor condición posible⁴⁶. Posible método a utilizar en el sistema de saneamiento y drenaje (SSyD), obteniendo un porcentaje del costo histórico del elemento, en función de su condición actual comparado con la mejor y peor condición posible, según la ecuación 7.3:

$$V_t = CH * \left(\frac{P_t - P_{worst}}{P_{best} - P_{worst}} \right) \quad (7.3)$$

Donde:

- V_t : Valor del elemento en el año t.
- CH : Costo histórico del elemento.
- P_t : Condición del elemento en el tiempo t.
- P_{best} : Mejor condición posible del elemento.
- P_{worst} : Peor condición posible del elemento.

Método 4: Valor Fijo Respecto a Condición Limite

Método el cual considera el valor del elemento instante durante toda su vida útil, siempre que su condición no supere un umbral de desempeño mínimo establecido. Cuando este umbral es sobrepasado, el valor del elemento es igual a cero. Este método es posible opción para el sistema estructural del túnel, ya que este sistema utiliza un índice de condición cualitativo para evaluar la condición actual. La ilustración 41 refleja este método de valorización:

⁴⁶ Transportation Asset Valuation 2014, Acharya D.

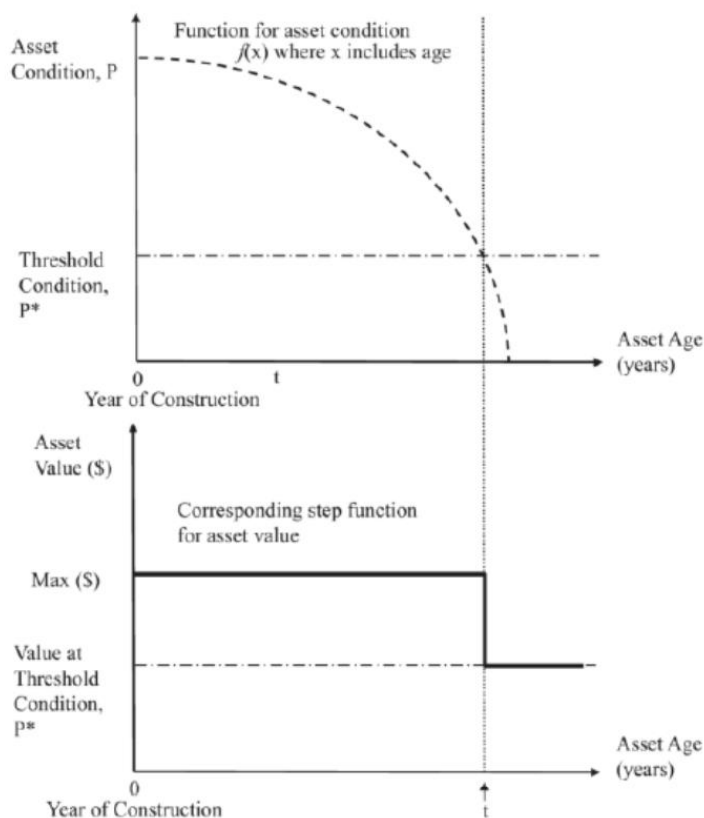


Ilustración 41. Gráfico conceptual del método de valor fijo respecto a condición límite.
(Fuente: A methodology for highway asset valuation in Indiana 2012, Dojutrek, M. S., Makwana, P. A., & Labi, S.)

Método 5: Costo de Reemplazo Escrito (WDRC)

En este método se entiende que el valor del elemento corresponde a su costo de construcción, reducido en función del cociente entre la condición actual y la mejor condición posible. El valor del costo de construcción a considerar en el cálculo puede ser el costo histórico del elemento⁴⁷. Este método puede adaptarse para el sistema estructural, asignan de un valor numérico para cada evaluación de condición de la estructura del túnel, entregada en el informe anual. El valor del elemento se calcula según la ecuación 7.4:

$$V_t = CH * \left(\frac{P_t}{P_{best}} \right) \quad (7.4)$$

Donde:

- V_t : Valor del elemento en el año t.
- CH : Costo histórico del elemento.
- P_t : Condición del elemento en el tiempo t.
- P_{best} : Mejor condición posible del elemento.

⁴⁷ Transportation Asset Valuation 2014, Acharya D.

8. Propuesta de Metodología de Valorización para cada Sistema

8.1 Metodología de Valorización usada Actualmente

Actualmente, la valorización del activo túnel se realiza de manera independiente, considerando una **depreciación lineal** para determinar el valor actual de los activos. La pérdida anual de valor o tasa constante de depreciación, se calcula como el costo histórico menos el valor residual dividido por la vida de servicio del túnel. A continuación, se presenta la ecuación empleada para el cálculo del valor del activo:

$$V_{\text{Actual}} = CH - \frac{CH-VR}{t_s}(t - t_c) \quad (8.1)$$

Donde:

- V_{Actual} : Valor actual del túnel.
- CH : Costo de Construcción.
- VR : Valor residual. Se supone igual al costo de excavación.
- $t - t_c$: Periodo analizado.
- t_s : Vida útil. Se supone un valor de 100 años.
- t_c : Año de construcción.
- t : Año actual.

Para la implementación de este método de depreciación, se define previamente el valor residual (VR) y la vida útil de los túneles. El valor residual corresponde al valor que tendrá el activo al terminar su vida útil (t_s), o luego de ser completamente depreciado. En el caso de los túneles se supondrá un valor igual al costo de excavación de acuerdo a la sección transversal de cada túnel. El costo estimado de construcción dependerá del volumen de excavación, cantidad de revestimiento, volumen de pavimento y cantidad de equipamiento, cuyas cantidades dependen de la geometría del túnel y su longitud. De acuerdo con la base de datos disponibles se consideran 3 secciones transversales para los túneles: tipo herradura de fondo plano, cuadrada y de punto medio⁴⁸.

En la ilustración 42 se muestra la secuencia de cálculo del valor actual para túneles utilizando esta metodología de depreciación lineal, donde a partir de la base de datos se obtiene la cubicación de cada característica (área transversal, revestimiento, pavimentación y equipamiento dependiendo de la longitud y geometría del túnel), donde se obtienen sus dimensiones, y junto con los precios unitarios de los costos de construcción, se tiene el costo de excavación, que al combinar con la vida útil fija de 100 años y el valor residual (igual al costo de excavación), se obtienen el valor actual del túnel.

⁴⁸ Valor del Patrimonio Vial de la Red Vial Nacional 2013, Dirección de Vialidad, MOP, Chile.

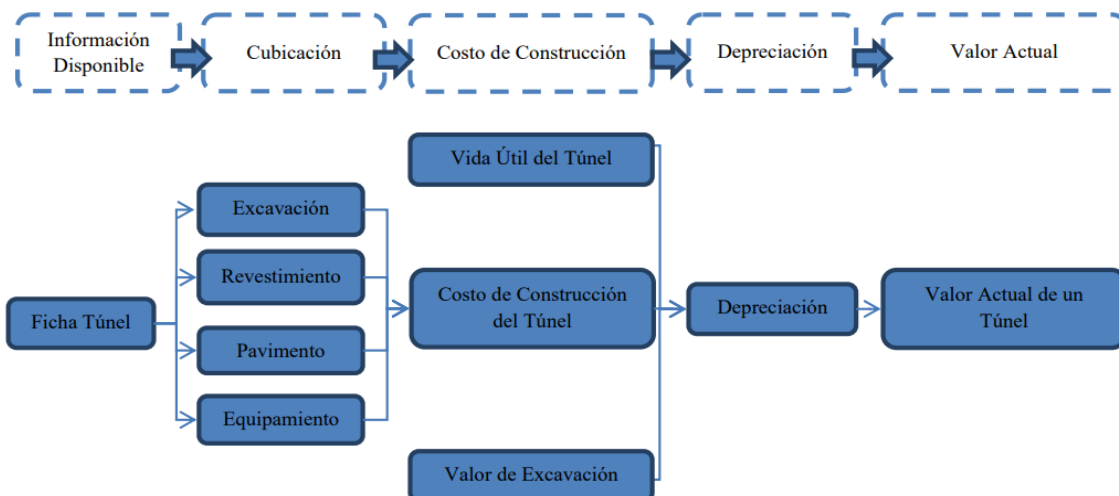


Ilustración 42. Secuencia lógica del cálculo del valor actual de un túnel.
(Valor del Patrimonio Vial de la Red Vial Nacional, Dirección de Vialidad MOP 2013)

8.2 Métodos Recomendados para cada Sistema de Elementos del Túnel

A continuación, se presenta una propuesta de valorización patrimonial, para cada sistema:

8.2.1 Sistema de Protección Contra Incendios

Al realizar un análisis a los enfoques y técnicas de valorización, se estudia la compatibilidad de todas las técnicas de valorización basadas en costos, con la finalidad de identificar el método que más se adapta al sistema de protección contra incendios, considerando que solo se cuenta con datos de costos para los elementos, y se propone la utilización de un índice de condición binario en este sistema solo para los elementos en los que se evalúa su funcionamiento, sin considerar los que dependen de un factor o capacitación humana.

Tabla 21. Compatibilidad de Métodos basados en Costos con el Sistema de Protección contra Incendios.

Enfoque	Metodología	Sistema de Protección Contra Incendios
ENFOQUE DE DEPRECIACIÓN	Depreciación Lineal (SD)	No se cuenta con información de vida útil.
	Balance de Declinación (DB)	
	Suma de Dígitos Anuales	
	Depreciación Sigmoidal (SD)	Se utilizan coeficientes calibrados, para lo cual se necesita información de un largo periodo de tiempo
ENFOQUE MODIFICADO	Costo de Reemplazo (RC)	Se prefiere uso de Costo Histórico (CH)
	Costo Histórico (HC)	Posible, pero asume que todos los elementos están en operación.

	Costo de Reemplazo Ajustado (Rcaj)	Está sujeto a precios de construcción en año "t", independiente de la concesión.
	Costo de Reemplazo Escrito (WDRC)	Depende de mejor condición posible y condición actual, no compatible si usamos índice binario.
	Valor Ajustado Respecto a Condición Límite	Depende de mejor y peor condición posible además de condición actual, no compatible si usamos índice binario.
	Valor Fijo Respecto a Condición Límite	Compatible, asumiendo condición límite 1 para elementos en operación y valor 0 para los no operativos.
	Valor Neto Residual (NSV)	No se cuenta con información de costos de rehabilitación
OTROS ENFOQUES	Costo de Reemplazo Depreciado	Factor D depende de la depreciación del activo en el tiempo. No se cuenta con datos históricos
METODOS NO TRADICIONALES	Descomposición Elemental y Multicriterio (EDMC)	Falta de datos históricos en general.
	Valoración Probabilística	Método complejo para elementos de bajo costo. Se necesitan funciones de comportamiento para cada elemento. Se necesita base de datos para calibrar variables.
	Prueba de Concepto de Colorado	Entrega VP para el sistema completo, relaciona costo histórico del elemento con índice de condición. (elementos no operativos tendrán VP=0 debido al IC binario).

Se identifican 3 posibles metodologías, de las cuales se considera mejor opción el **Valor Fijo respecto a Condición Límite**.

Se propone la utilización de la metodología de valor fijo respecto a condición límite, que es de fácil aplicación, relaciona el costo histórico de cada elemento, con el índice de condición binario que entrega valor "1" cuando el elemento se encuentra operativo, y un valor de "0" (cero) cuando el elemento no está en funcionamiento o no cumple con la normativa.

Índice de Condición	
Funcionamiento/Cumple Normativa	
Sí	No
1	0

Ilustración 43. Índice de Condición propuesto para elementos del SPCI.

▪ **Valor Fijo respecto a Condición Límite**

$$V_{SPCI_t} = \sum_{i=1}^{N_{SPCI}} V_{i_t} \quad (8.2)$$

$$V_{i_t} = \begin{cases} CH_i & \text{si } P_{i_t} > P_{peor} \\ 0 & \text{si } P_{i_t} \leq P_{peor} \end{cases}$$

Donde:

- V_{SPCI_t} : Valor del Sistema de Protección contra incendios del túnel en el tiempo "t".
- V_{i_t} : Valor del elemento "i" en el tiempo "t".
- CH_i : Costo Histórico del elemento "i" del SPCI del túnel.
- P_{i_t} : Parámetro indicador de la condición del elemento "i" en el tiempo "t".
- P_{peor} : Indicador que representa la peor condición posible ($P_{peor} = 0$).
- N_{SPCI} : Número de elementos "i" del SPCI en la concesión.

Se debe considerar que este sistema al ser de bajo costo en comparación con los demás, no es de gran necesidad utilizar un método más complejo para el cálculo de valor patrimonial, además, recalcar que debido a la falta de información disponible, comenzando por el índice de condición que es una propuesta, tampoco se cuenta con datos de vida útil y actividades de mantenimiento, siendo este método propuesto la mejor alternativa según las características e información con que se cuenta de este sistema.

8.2.2 Sistema de Saneamiento y Drenaje

Al realizar el análisis a los enfoques y técnicas de valorización, se estudia la compatibilidad de todas las técnicas de valorización basadas en costos, con la finalidad de identificar el método que más se adapta al sistema de saneamiento y drenaje, considerando que se cuenta con los valores de los costos de los elementos, y un índice de condición en base a la cantidad de deterioros que afectan al elemento, tipos de deterioros y su severidad, entregando el ICSD definido anteriormente, propuesto para el modelo de nivel de servicio a los usuarios.

Tabla 22. Compatibilidad de métodos basados en costos con el Sistema de Saneamiento y Drenaje.

Enfoque	Metodología	SSyD
ENFOQUE DE DEPRECIACIÓN	Depreciación Lineal (SD)	No considera índice de condición ICSD.
	Balance de Declinación (DB)	
	Suma de Dígitos Anuales	
	Depreciación Sigmoidal (SD)	Se utilizan coeficientes calibrados, para lo cual se necesita información de un largo periodo de tiempo
ENFOQUE MODIFICADO	Costo de Reemplazo (RC)	No considera índice de condición.
	Costo Histórico (HC)	No considera índice de condición.
	Costo de Reemplazo Ajustado (Rcaj)	Está sujeto a precios de construcción en año "t", independiente de la concesión.
	Costo de Reemplazo Escrito (WDRC)	Compatible al relacionar el ICSD actual con la mejor condición posible, obteniendo un porcentaje del CH.

	Valor Ajustado Respecto a Condición Limite	Compatible al relacionar el ICSD actual con la mejor y peor condición posible, obteniendo un porcentaje del CH.
	Valor Fijo Respecto a Condición Limite	Compatible, fácil de aplicar y método no complejo para un sistema que no afecta en gran cantidad el valor del túnel.
	Valor Neto Residual (NSV)	No se cuenta con información de costos de rehabilitación
OTROS ENFOQUES	Costo de Reemplazo Depreciado	Factor D depende de la depreciación del activo en el tiempo. No se cuenta con datos históricos
METODOS NO TRADICIONALES	Descomposición Elemental y Multicriterio (EDMC)	Falta de datos históricos en general.
	Valoración Probabilística	Método muy complicado de aplicar para elementos de bajo costo. Se necesitan funciones de comportamiento para cada elemento.
	Prueba de Concepto de Colorado	Entrega VP para el sistema completo, relaciona costo histórico del elemento con índice de condición.

Se identifican 3 posibles metodologías, siendo la mejor opción el **Valor Fijo Respecto a Condición Limite**.

Se propone la metodología de Valor Fijo Respecto a Condición Limite, que toma en cuenta el costo histórico de cada elemento y el ICSD definido con anterioridad, pero aplicando de manera más severa la condición limite, entregando una valorización nula en caso que se detecte alguna severidad, independiente de su grado (Baja, Medio o Alta), según el cuadro en la ilustración 44.

Estado Elemento		Valorización Elemento
Sin deterioros		$V_{t,a} = CH_a$
Presenta Severidad	Baja	$V_{t,a} = 0$
	Media	
	Alta	

Ilustración 44. Cuadro de condiciones limites según severidad detectada.

▪ Valor Fijo respecto a Condición Limite

Se ajusta esta metodología para entregar valores fijos según si el elemento se encuentra sin deterioros, o presenta cierto grado de severidad, en alguno de los deterioros detallados anteriormente mediante la inspección visual.

$$V_{t,a} = P_{lim} \cdot CH_a \quad (8.3)$$

$$Si P_{lim} = \text{"Sin Deterioros"} ; V_{t,a} = CH_a$$

$$\text{Si } P_{lim} = \text{"Baja"} ; V_{t,a} = 0$$

$$\text{Si } P_{lim} = \text{"Media"} ; V_{t,a} = 0$$

$$\text{Si } P_{lim} = \text{"Alta"} ; V_{t,a} = 0$$

Donde:

- $V_{t,a}$: Valor actual del elemento "a".
- CH_a : Costo Histórico del elemento "a".
- P_{lim} : Condición límite.

Para la evaluación total del sistema de saneamiento y drenaje, se considera como la suma total de las valorizaciones entregadas para cada uno de los elementos evaluados.

$$V_{t,SSyD} = \sum_{i=1} V_{t,a} \quad (8.4)$$

Donde:

- $V_{t,SSyD}$: Valor actual del Sistema de Saneamiento y Drenaje completo.
- $V_{t,a}$: Valor actual del elemento "a".

Esta metodología permite una estimación de la valorización del sistema de saneamiento y drenaje total de una manera más simplificada, pero a su vez, más severa, donde para cada elemento, en caso de presentar alguna severidad, la valorización de este inmediatamente se considera como nula, caso contrario, al tener un estado sin deterioros, la valorización se considera igual al costo histórico del elemento. Para trabajos a futuro es buena opción incorporar a esta metodología actividades de mantenimiento, las cuales sean necesarias según el elemento, su calificación de condición, deterioros que afectan y sus severidades, para lo cual se requiere más información a la hora de realizar las inspecciones, ya que con la información actual no es posible desarrollar una metodología considerando estas actividades.

8.2.3 Sistema Estructural Interno

Al realizar el análisis a los enfoques y técnicas de valorización, se estudia la compatibilidad de todas las técnicas de valorización basadas en costos, con la finalidad de identificar el método que más se adapta al sistema estructural. Dado que para el sistema estructural se cuenta con información cualitativa con respecto al estado o funcionalidad del sistema estructural, información la cual es entregada en el informe anual mediante inspección completa, y con valores de costo histórico, se desarrolla la siguiente tabla de compatibilidad de métodos de valorización patrimonial.

Tabla 23. Compatibilidad de Métodos basados en Costos con el Sistema Estructural.

Enfoque	Metodología	SE
ENFOQUE DE DEPRECIACIÓN	Depreciación Lineal (SD)	No considera índice de condición entregado en informe anual.
	Balance de Declinación (DB)	
	Suma de Dígitos Anuales	
	Depreciación Sigmoidal (SD)	Se utilizan coeficientes calibrados, para lo cual se necesita información de un largo periodo de tiempo
ENFOQUE MODIFICADO	Costo de Reemplazo (RC)	No considera índice de condición.
	Costo Histórico (HC)	No considera índice de condición.
	Costo de Reemplazo Ajustado (Rcaj)	Este sujeto a precios de construcción en año "t", independiente de la concesión.
	Costo de Reemplazo Escrito (WDRC)	La calificación de condición cualitativa. Podría ser compatible si en informe anual se entrega valor numérico de IC
	Valor Ajustado Respecto a Condición Límite	La calificación de condición en este sistema es de manera cualitativa.
	Valor Fijo Respecto a Condición Límite	Possible, asumiendo bajo valor limite VP igual a costo de excavación, y superior a valor limite VP igual a costo histórico.
	Valor Neto Residual (NSV)	No se cuenta con información de costos de rehabilitación
OTROS ENFOQUES	Costo de Reemplazo Depreciado	Factor D depende de la depreciación del activo en el tiempo. No se cuenta con datos históricos
METODOS NO TRADICIONALES	Descomposición Elemental y Multicriterio (EDMC)	La calificación de condición cualitativa. Falta de datos históricos en general.
	Valoración Probabilística	Se necesita base de datos para calibrar variables.
	Prueba de Concepto de Colorado	La calificación de condición en este sistema es de manera cualitativa.

Se identifican 2 posibles metodologías, siendo la mejor opción el **Valor Fijo Respecto a Condición Límite**.

Se propone la metodología de Valor Fijo Respecto a Condición Límite, ya que, al tener un índice de calificación para el estado actual del sistema estructural del túnel, se considera que al sobrepasar una condición límite, el valor patrimonial se considera igual al valor residual o costo de excavación.

▪ **Valor Fijo Respecto a Condición Límite**

Se ajusta esta metodología para entregar valores fijos según el índice de condición cualitativo que se obtiene de la información entregada en el informe completo mediante la inspección anual.

$$V_{t,SE} = P_{lim} \cdot CH_{SE} \quad (8.5)$$

$$Si P_{lim} \geq "Justo"; V_{t,SE} = CH_{SE}$$

$$Si P_{lim} < "Justo"; V_{t,SE} = CE$$

Donde:

- $V_{t,SE}$: Valor del Sistema Estructural en el tiempo "t".
- CH_{SE} : Costo histórico del Sistema Estructural.
- P_{lim} : Condición límite.
- CE : Costo de excavación del túnel.

Se considera adecuada esta metodología, según la información con la que se cuenta, ya que el informe anual entrega información del sistema estructural en general, identificando cierta cantidad de fallas superficiales, y considerando más importantes los deterioros hallados en el hormigón de revestimiento del túnel. Para poder realizar una metodología con más detalle, se deberían realizar inspecciones individuales por elementos y su materialidad, identificando los deterioros y su severidad por cada elemento y no entregando una calificación de condición generalizada para el sistema estructural completo.

9. Calibración de Metodologías de Valorización Propuestas

9.1 Recopilación de datos disponibles y proceso de calibración

Al no contar con información de túneles concesionados, se utiliza información de túneles viales en Chile, disponible en la página de la Dirección de Vialidad del MOP, donde se obtienen los siguientes datos:

Tabla 24. Datos de túneles viales en Chile (Dirección de Vialidad, MOP).

Nombre Túnel	Longitud [km]	Costo de Excavación (\$)	Costo de Construcción (\$)	Valor Actual (\$)
Caracoles	1,46	17.088.070.619	22.234.587.930	22.234.587.930
Cristo Redentor	1,564	16.745.548.046	30.216.439.788	25.636.336.595
El Farellón	0,24	1.304.847.900	1.839.496.873	1.700.488.140
Jardín Botánico	0,245	1.440.769.556	1.771.836.639	1.712.244.564
Pedro Galleguillos	0,793	4.311.434.935	7.582.077.169	6.927.948.722
Puclaro	0,37	2.120.377.837	2.328.629.366	2.328.629.366
La Pólvora T1	2,18	11.868.679.021	27.534.097.349	26.437.518.066
La Pólvora T2	0,32	1.679.991.671	1.869.696.438	1.854.520.057
La Pólvora T3	0,44	2.386.784.283	2.642.986.455	2.622.490.281

Cabe destacar que el valor actual calculado en la tabla anterior corresponde al resultado de aplicar la metodología actual de depreciación lineal. El valor entregado corresponde a la valorización completa del túnel y no por sistemas, utilizando el costo histórico y de excavación, pero considerando una vida útil fija de 100 años.

Los datos disponibles para la calibración del modelo se obtuvieron de estudios internacionales (dada la falta de información nacional de ubicaciones de los elementos para cada sistema). A partir de estos estudios se pudo obtener información del peso del equipamiento de un túnel, correspondiente al peso de la suma de los sistemas que conforman el túnel (sin considerar el sistema estructural).

Esta información al ser el resultado de una base de datos de varios túneles no necesariamente va a cumplir con dicha distribución para un túnel específico, pero sirve para tener una referencia del orden de magnitud de la distribución de costos de los sistemas respecto del equipamiento y respecto del túnel.

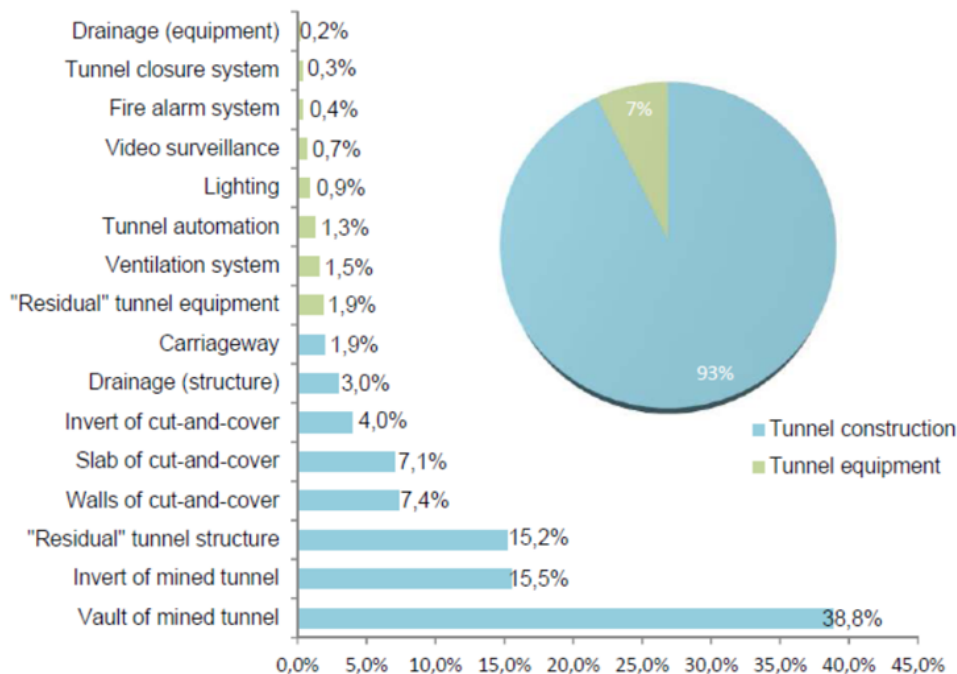


Ilustración 45. Distribución de costos iniciales (diseño + construcción/equipamiento).
Fuente: Recommendations for the Determination of Lifecycle Costs for Road Tunnels (2018).

El estudio permite obtener el peso de cada sistema, donde primero se obtiene el costo total del equipamiento como la suma de los equipos, luego el costo de cada sistema se divide por el costo del equipamiento para obtener el peso porcentual del sistema respecto del equipamiento⁴⁹.

Cabe mencionar que el ítem de “Control de CO” fue considerado en conjunto con el ítem de “Ventilación”, para obtener el peso del sistema. Finalmente, con el peso del equipamiento respecto del túnel y con el peso de cada sistema respecto del equipamiento, se tiene el peso del sistema respecto del túnel como el producto de los pesos, obteniendo un porcentaje de 7,04 [%] sin contar el sistema estructural.

Tabla 25. Pesos de los sistemas respecto del costo del túnel.

Equipamiento			% Equipamiento	% Túnel
Eléctrico	m	\$ 284.710	7,36	0,52
Iluminación	m	\$ 1.305.514	33,75	2,36
Ventilación	m	\$ 284.710	7,36	0,52
Control CO	m	\$ 284.710	7,36	0,52
CC.TV.	m	\$ 284.710	7,36	0,52
Comunicaciones	m	\$ 284.710	7,36	0,52
C. Vel.	m	\$ 284.710	7,36	0,52
Señalización	m	\$ 284.710	7,36	0,52
Emergencia	m	\$ 284.710	7,36	0,52
Contra Incendio	m	\$ 284.710	7,36	0,52
TOTAL EQUIPAMIENTO		\$ 3.867.902		

⁴⁹ Recommendations for the Determination of Lifecycle Costs for Road Tunnels (2018).

Ahora bien, lo ideal sería poder contar con el peso de cada elemento que conforma cada sistema, ya que las metodologías desarrolladas para este activo se realizan a nivel de sus elementos (dada su depreciación específica según la información recopilada para ese elemento), pero como no se tiene información de ubicaciones específicas para túneles, ni para sus sistemas ni elementos, se realiza un contraste a nivel de sistema del comportamiento de depreciación.

Por otro lado, la valorización actual de túneles en nuestro país corresponde a una depreciación lineal considerando una vida útil de 100 años, un costo histórico igual al costo de construcción y un valor residual igual al costo de excavación. A partir de lo anterior, el contraste del comportamiento de depreciación realizado para los sistemas se realiza entre dos casos, el primero de ellos asumiendo que el comportamiento de depreciación de los sistemas del túnel se comporta de la misma manera que el túnel en general, el segundo caso corresponde al valor del sistema como la suma de sus elementos depreciados según la metodología adoptada en este proyecto.

Otro punto importante es que no se cuenta con la información de vida útil de todos los elementos que componen los sistemas y solo es posible aplicar la metodología de depreciación a los elementos que cuentan con este dato, por lo que los elementos sin esta información no son considerados. En caso de contar con todas las vidas útiles el comportamiento sería el mismo y el peso del sistema se distribuiría entre más elementos.

9.2 Presentación de Resultados

A continuación, se presenta los resultados obtenidos, lo que consiste en mostrar el contraste de comportamiento de depreciación para cada uno de los sistemas haciendo un versus entre la depreciación del sistema como si se depreciara de la misma manera actual que se deprecian los túneles y la depreciación del sistema que resulta de la suma de las depreciaciones de sus elementos depreciados según las metodologías adoptadas para cada uno de ellos.

9.2.1 Calibración del Sistema de Protección contra Incendios

El método de valorización desarrollado para el sistema de protección contra incendios en túneles corresponde al método de valor fijo respecto a condición límite basado en costos históricos. Este método debido a sus características requiere contar con datos de costos y datos de inventario, los cuales se deben obtener de las Bases de Licitación de la concesión a valorizar.

- **Datos de inventario:** datos necesarios para conocer la cantidad de elementos presentes en el sistema, considerando la cantidad de cada uno según longitud del túnel, cantidad de pista, tamaño sección transversal, cantidad de salidas, etc.
- **Datos de costos:** necesarios para la utilización del método, combinando con datos de condición dependiendo de las inspecciones realizadas a cada elemento.

Análisis de Casos

Se realiza un análisis de la metodología a utilizar, considerando que al inicio de la concesión todos los elementos del sistema de protección contra incendios en el túnel se encuentran operativos y en regla con la normativa del Manual de Carreteras (referencia). Además, al no contar con datos de costos históricos de este sistema con respecto a túneles, se asigna un porcentaje (%) de valor estimado para cada elemento en función del sistema de protección contra incendios total.

Tabla 26. Elementos del SPCI con sus respectivos porcentajes de valor con respecto al sistema completo.

Sistema	Elemento	Elemento	Índice de Condición	Porcentaje c/r a SPCI Total [%]
Protección Contra Incendios	1. Redes de incendio con su equipamiento	Estanques (Gravitacionales)	1	10%
		Sala de Bombas	1	13%
		Red de Cañerías	1	10%
		Válvulas	1	8%
	2. Combate Manual de incendios y su Equipamiento	Carrete con manguera	1	10%
		Teléfono de emergencia	1	1%
		Hachas	1	1%
		Luz de Emergencia	1	1%
		Extintores Manuales de 6 [kg]	1	1%
		Carro	1	2%
		Extintores de al menos 90 [kg]	1	1%
		Vestimenta	1	1%
		Equipos de Respiradores Autónomos	1	1%
	3. Manejo de aire y su equipamiento	Ventiladores extractores de humo	1	4%
		Iluminación antipánico	1	3%
		Red eléctrica a prueba de incendio	1	3%
	4. Cortinas de agua	-	1	5%
	5. Red Húmeda	Hidrantes	1	5%
	6. Monitoreo y Control	CCTV (Cámaras)	1	5%
		Sistema de telefonía	1	3%
		Sensor de niveles de estanque (Estanque de agua en caso de incendio)	1	2%
	7. Sensores de detección de incendio	Pulsadores de alarma de incendio	1	2%
		Detectores de incendio (o Humo)	1	2%
		Detectores de apertura de Puertas S.O.S.	1	1%
	8. ERP	Señalización e Iluminación de Emergencia	1	5%
			Total	100%

Se realiza análisis entre “Buena Gestión” y “Mala Gestión” para un periodo de 20 años, considerando como buena gestión que todos los elementos del sistema de protección contra incendios se encuentren siempre operativos, ya que, al momento del fallo de alguno de estos, se realiza la mantención según corresponda. Para el caso de mala gestión, cuando ocurra el fallo de algún elemento, no se realice mantención para estos, y se vayan acumulando elementos que no cumplan la normativa, haciendo que la valorización de cada elemento de este sistema sea cada vez menor.

Este análisis permite realizar comparación de como varía el valor del sistema de protección contra incendios si no se mantiene los elementos según normativa, pero en términos de operatividad del túnel. Para que se permita el tráfico a través del túnel, todos los elementos de este sistema deben encontrarse en funcionamiento, ya que son de carácter esencial, ante una emergencia que pueda suceder dentro del túnel, y que permita mantener a salvo a los usuarios.

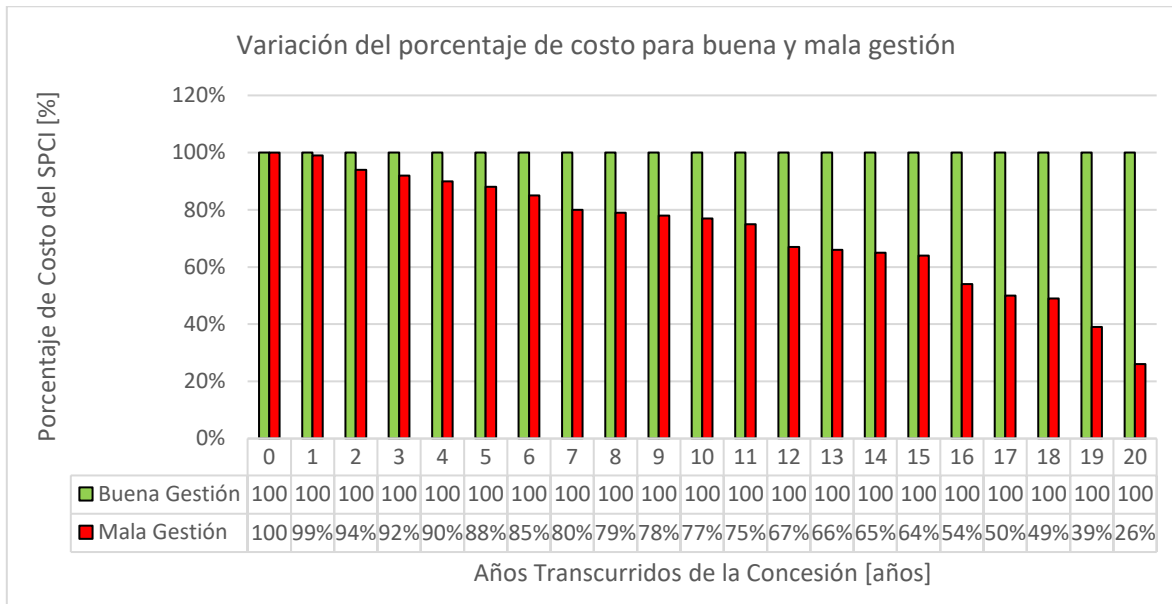


Ilustración 46. Gráfico comparativo entre Buena y Mala Gestión para el SPCI.

El análisis descrito en el grafico anterior, entrega que a medida que transcurre un año de la concesión, en el caso de la mala gestión, uno de los elementos presenta una falla, mientras que en la buena gestión el porcentaje de valor patrimonial de este sistema se mantiene igual que a inicio de la concesión debido a que se hace mantenimiento a los elementos de este sistema. Se observa que, al paso de 20 años de la concesión, con una mala gestión del sistema de protección contra incendios, este disminuye a un 26% de su valor al inicio de la concesión.

Considerando que el sistema de protección consta de los elementos de Circuito Cerrado de TV, Comunicaciones, Elementos de Emergencia y Equipamiento Contra Incendios de la Ilustración 45⁵⁰, se obtiene un estimado que el sistema de protección contra incendios corresponde a un 2,08% del valor total del túnel. Con este porcentaje de valor se compara como cambia el valor del túnel con la depreciación lineal actual, con una buena y mala gestión, para túneles de valor máximo, medio y mínimo respectivamente.

⁵⁰ Recommendations for the Determination of Lifecycle Costs for Road Tunnels (2018).

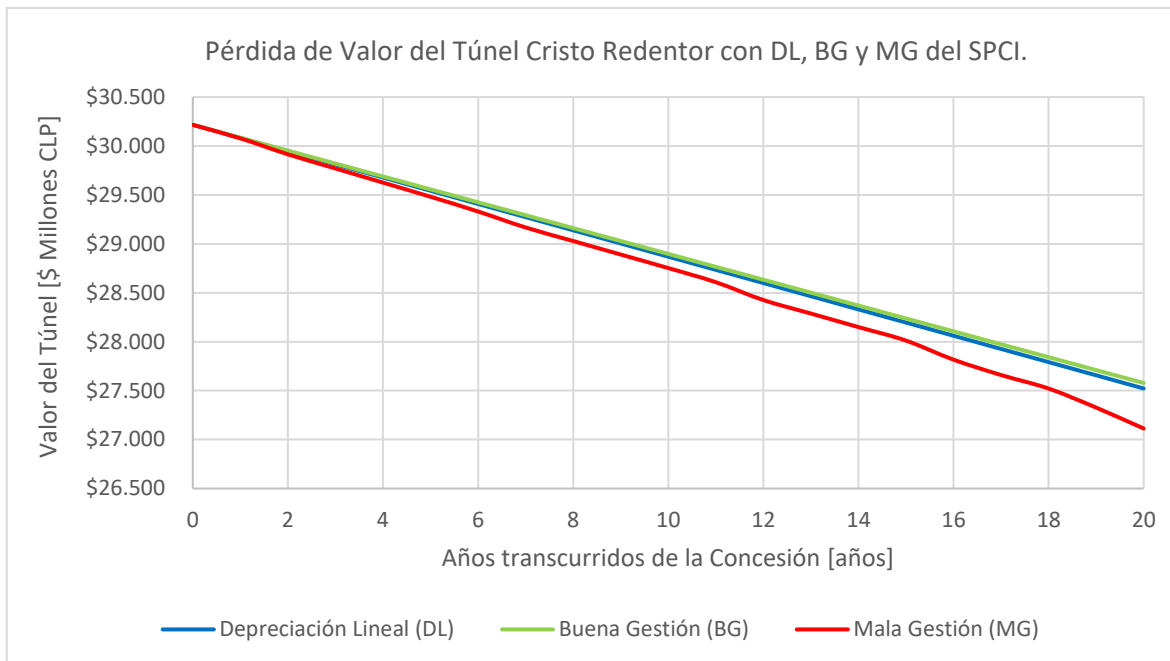


Ilustración 47. Gráfico de valor con depreciación lineal, buena y mala gestión del SPCI para Túnel Cristo Redentor en 20 años de Concesión.

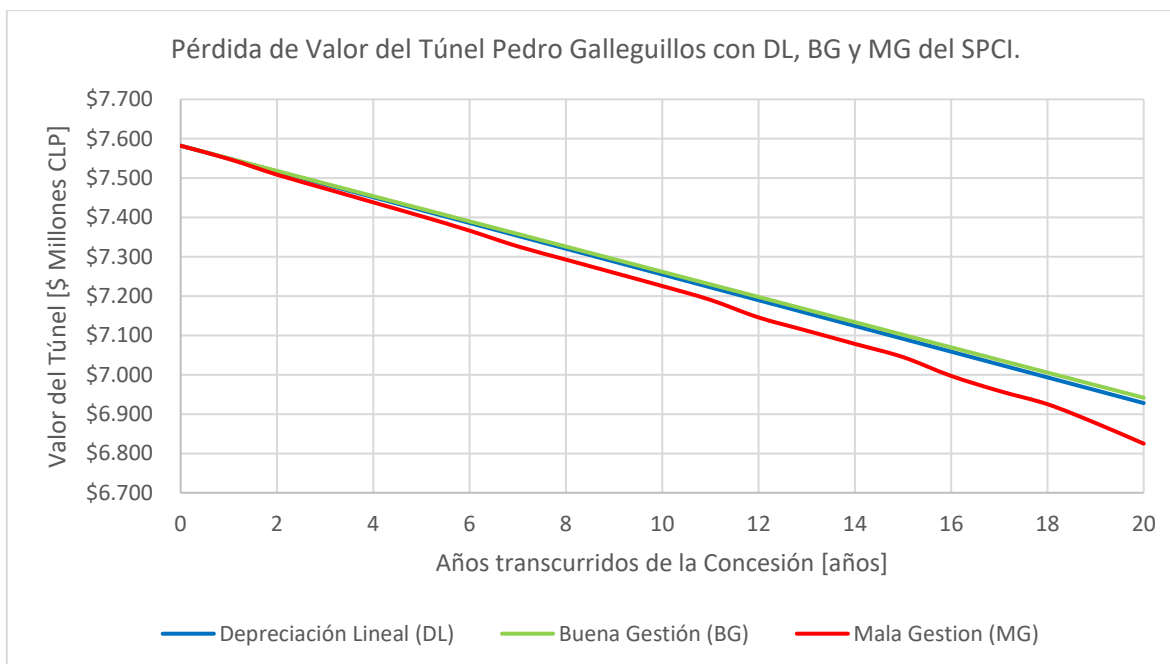


Ilustración 48. Gráfico de valor con depreciación lineal, buena y mala gestión del SPCI para Túnel Pedro Galleguillos en 20 años de Concesión.

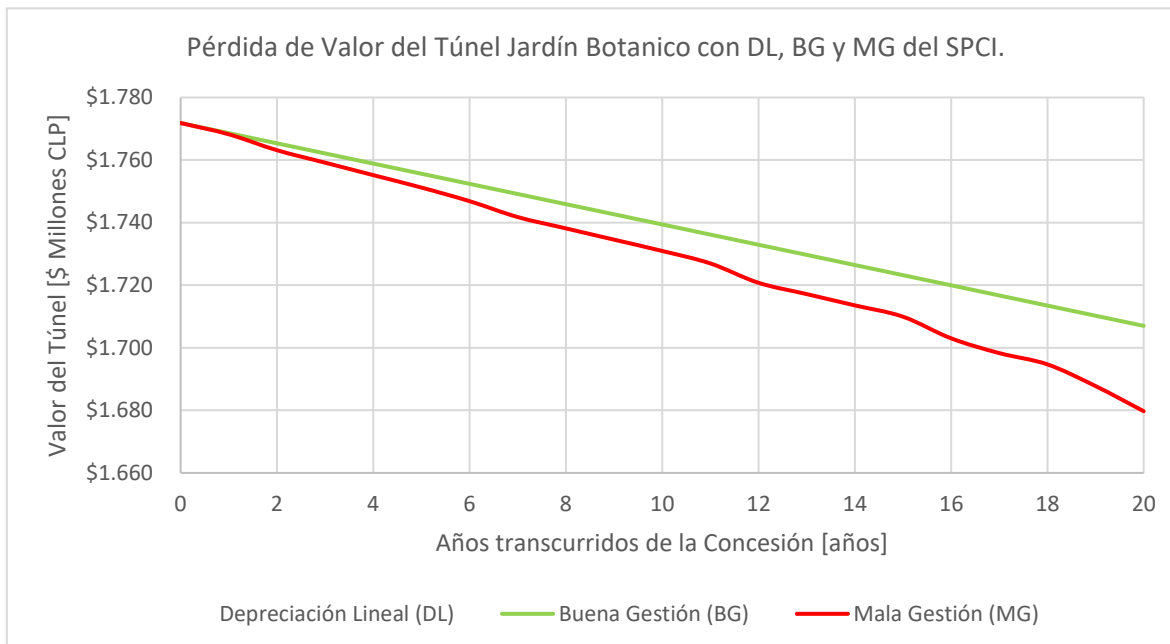


Ilustración 49. Gráfico de valor con depreciación lineal, buena y mala gestión del SPCI para Túnel Jardín Botánico en 20 años de Concesión.

Del análisis realizado en los tres gráficos anteriores, analizando túneles viales de valor Máximo (Cristo Redentor), valor Medio (Pedro Galleguillos) y valor Mínimo (Jardín Botánico) se obtiene la siguiente tabla resumen:

Tabla 27. Cuadro Resumen Porcentajes de diferencia entre Depreciación Lineal, Buena Gestión y Mala Gestión en cada túnel en 20 años de Concesión.

Años	Cristo Redentor		
	DL	BG	MG
0 años	\$ 30.216.439.788	\$ 30.216.439.788	\$ 30.216.439.788
20 años	\$ 27.522.261.440	\$ 27.578.300.349	\$ 27.113.208.908
Porcentaje diferencia		0,204%	-1,486%
Años	Pedro Galleguillos		
	DL	BG	MG
0 años	\$ 7.582.077.169	\$ 7.582.077.169	\$ 7.582.077.169
20 años	\$ 6.927.948.722	\$ 6.941.554.594	\$ 6.824.851.262
Porcentaje diferencia		0,196%	-1,488%
Años	Jardín Botánico		
	DL	BG	MG
0 años	\$ 1.771.836.639	\$ 1.771.836.639	\$ 1.771.836.639
20 años	\$ 1.705.623.222	\$ 1.707.000.461	\$ 1.679.728.352
Porcentaje diferencia		0,081%	-1,518%

Del cuadro resumen se observa una similitud entre los porcentajes para cada túnel, pero a medida que el túnel tiene un mayor costo de Construcción (Cristo Redentor), en una buena gestión esto puede

significar una diferencia cercana a 400 millones (\$) en un periodo de 20 años solo teniendo una buena gestión del sistema de protección contra incendios, siendo factible realizar una metodología de valorización para este sistema.

9.2.2 Calibración del Sistema de Saneamiento y Drenaje

Análisis Método Propuesto

Al no contar con información de costos históricos, específicamente para el sistema de saneamiento y drenaje en túneles, se hace la similitud para elementos de saneamiento y drenaje en carreteras concesionadas, utilizando los costos históricos de estos elementos en carreteras, y aplicando el método propuesto de valor fijo con respecto a condición limite en este sistema en túneles, variando solamente si se detecta o no severidad.

Tabla 28. Costos históricos disponibles de Saneamiento y Drenaje en carreteras concesionadas de ruta en Zona Norte.

ZONA NORTE			
Sistema	Elemento	Elemento	Costo Histórico [UF]
Drenaje y Saneamiento	1. Drenaje Interior	Drenes Longitudinales	-
		Colectores	-
		Cámaras de Inspección	-
		Soleras	-
		Sumideros	-
	2. Drenaje Exterior	Cunetas (Revestidas o No Revestidas) y Contracunetas	1.068
		Caja disipadora (para evitar erosiones en lavaderos)	105
		Alcantarillas (Con o Sin Muro de Boca)	317
		Baden (*Entrada y Salida de túnel)	-

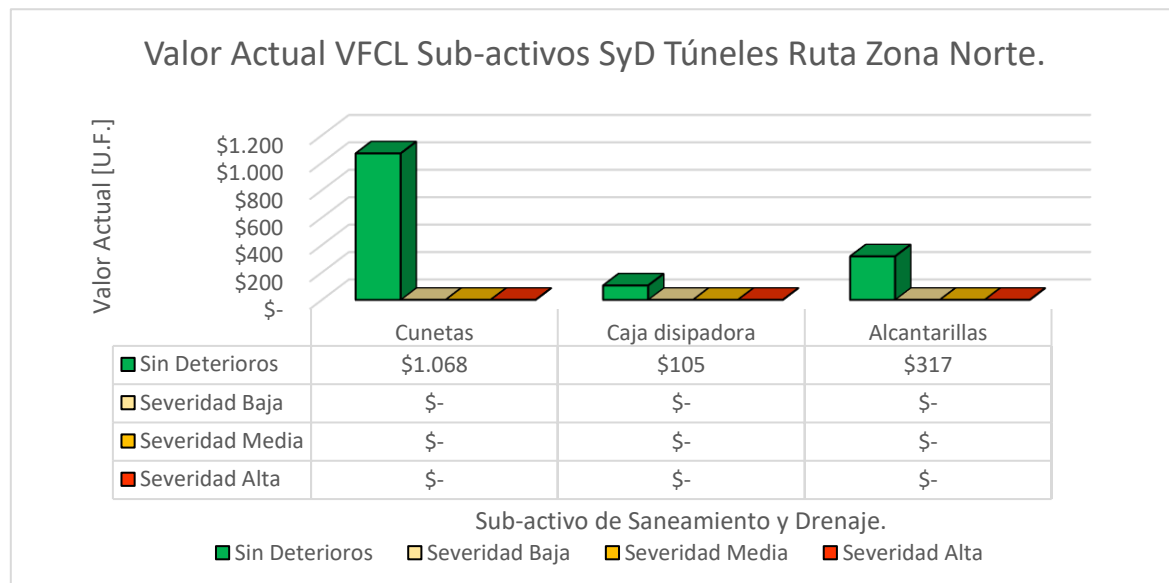


Ilustración 50. Gráfico con valorización de cada elemento en ruta de Zona Norte.

Al no contar con información de costos históricos para todos los elementos de saneamiento y drenaje en carreteras, se aplica metodología en Cunetas, Cajas disipadoras y Alcantarillas. En cada caso, se

aplica metodología de Valor Fijo respecto a Condición Límite, y se compara resultados en caso de estar sin deterioros, o con severidades Baja, Media y Alta.

Tabla 29. Costos históricos disponibles de Saneamiento y Drenaje en carretera concesionada de ruta Zona Centro.

ZONA CENTRO			
Sistema	Elemento	Elemento	Costo Histórico [UF]
Drenaje y Saneamiento	1. Drenaje Interior	Drenes Longitudinales	-
		Colectores	2.960
		Cámaras de Inspección	-
		Soleras	-
		Sumideros	-
	2. Drenaje Exterior	Cunetas (Revestidas o No Revestidas) y Contracunetas	-
		Caja disipadora (para evitar erosiones en lavaderos)	-
		Alcantarillas (Con o Sin Muro de Boca)	81.712
		Baden (*Entrada y Salida de túnel)	-

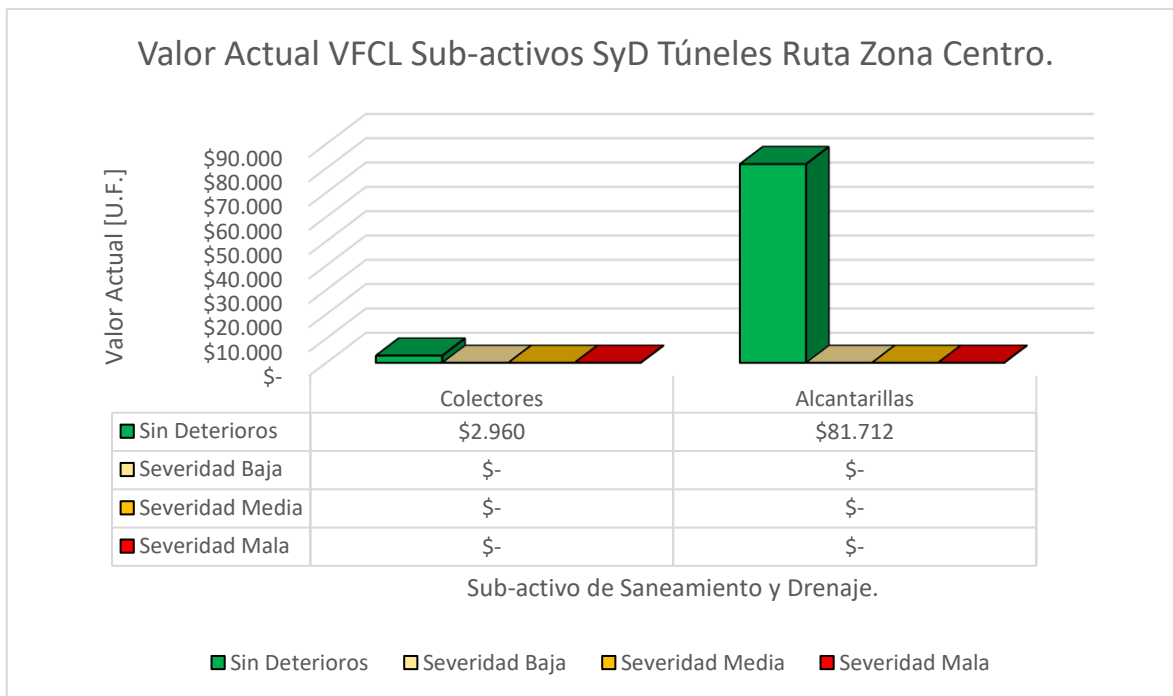


Ilustración 51. Gráfico con valorización de cada elemento en ruta de Zona Centro.

Igual que el caso anterior, se realiza análisis a elementos con los cuales se cuenta información de costos históricos en esta concesión, entregando valores para Colectores y Alcantarillas.

Tabla 30. Costos históricos disponibles de Saneamiento y Drenaje en carretera concesionada de Ruta Zona Sur.

ZONA SUR			
Sistema	Elemento	Elemento	Costo Histórico [UF]
Drenaje y Saneamiento	1. Drenaje Interior	Drenes Longitudinales	-
		Colectores	2.485
		Cámaras de Inspección	-
		Soleras	-
		Sumideros	-
	2. Drenaje Exterior	Cunetas (Revestidas o No Revestidas) y Contracunetas	18.843
		Caja dissipadora (para evitar erosiones en lavaderos)	-
		Alcantarillas (Con o Sin Muro de Boca)	241.917
		Baden (*Entrada y Salida de túnel)	-

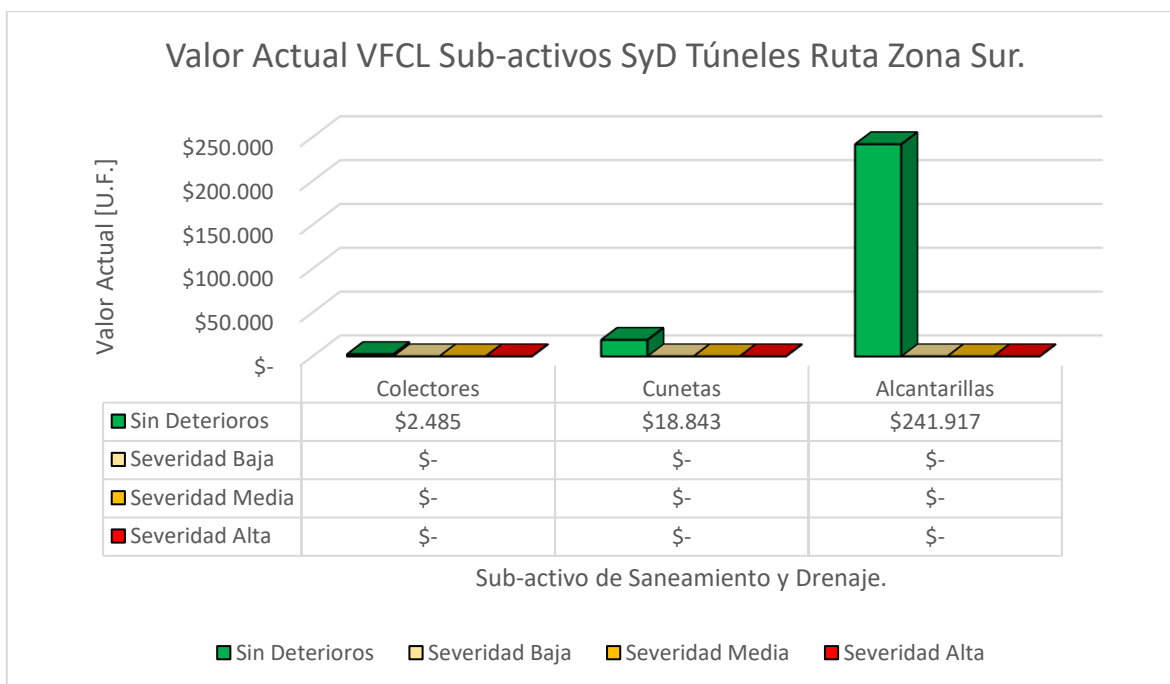


Ilustración 52. Gráfico con valorización de cada elemento en Ruta Zona Sur.

Similar a casos anteriores, se realiza análisis a elementos con los cuales se cuenta información de costos históricos en esta concesión, entregando valores para Colectores, Cunetas y Alcantarillas.

De la Ilustración 45, se obtiene entre construcción de elementos de drenaje del túnel y equipamiento de drenaje, este sistema corresponde al 3,2% de la totalidad del valor del túnel.

Se hace análisis de como varía el valor del túnel para un año específico, para cada condición del sistema de saneamiento y drenaje en túneles, evaluando túneles de valor máximo, medio y mínimo de túneles viales.

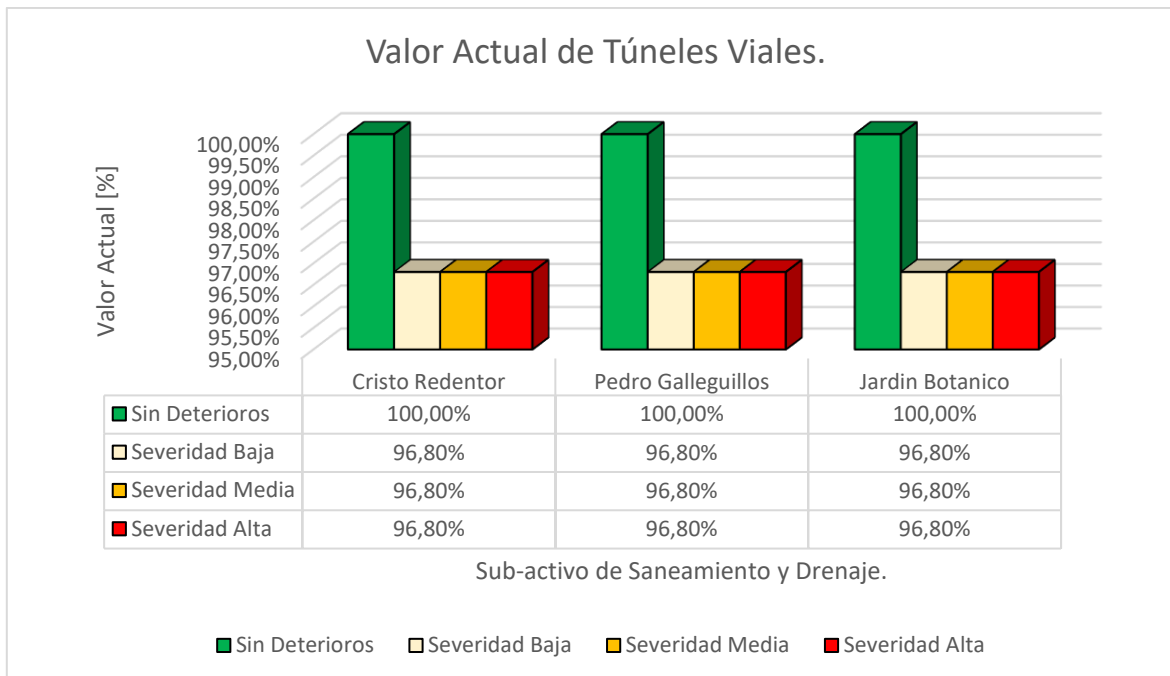


Ilustración 53. Valor actual de Túneles Viales, con diferentes Índices de Condición para el SSyD.

Tabla 31. Diferencia de Valor Patrimonial en Túneles Viales, con diferentes Índices de Condición para el SSyD.

Nombre Túnel	Costo de Construcción (\$)	Severidad Detectada	Valor Actual
Cristo Redentor	\$ 30.216.439.788	Sin Deterioros	\$ 30.216.439.788
		Severidad Baja	\$ 29.249.513.715
		Severidad Media	\$ 29.249.513.715
		Severidad Alta	\$ 29.249.513.715
Pedro Galleguillos	\$ 7.582.077.169	Sin Deterioros	\$ 7.582.077.169
		Severidad Baja	\$ 7.339.450.700
		Severidad Media	\$ 7.339.450.700
		Severidad Alta	\$ 7.339.450.700
Jardín Botánico	\$ 1.771.836.639	Sin Deterioros	\$ 1.771.836.639
		Severidad Baja	\$ 1.715.137.867
		Severidad Media	\$ 1.715.137.867
		Severidad Alta	\$ 1.715.137.867

Se observa de Ilustración 53 y de la Tabla 31, que para el caso en que todos los elementos del sistema de saneamiento y drenaje presentan un estado sin deterioros, el valor del túnel se mantiene, pero en caso que todos los elementos del sistema de saneamiento y drenaje presenten algún deterioro, ya sea con severidad Baja, Medio o Alta, el valor del túnel disminuye su valorización en el mismo porcentaje en el cual esta evaluado el sistema de saneamiento y drenaje en túneles.

9.2.3 Calibración del Sistema Estructural

El método de valorización desarrollado para este sistema corresponde al de Valor Fijo respecto a Condición Límite, basado en costo histórico (construcción) del túnel y costo de excavación. Dadas las características de este método, no se requiere de una calibración propiamente tal, pero sí de los siguientes factores:

- **Datos de costos:** necesarios para obtener el valor actual del túnel. En particular, para obtener el costo histórico se deben utilizar los precios unitarios de construcción, precios cuales deben estar definidos en las Bases de Licitación del contrato de concesión correspondiente. Para el caso de túneles, se cuenta información de costos de construcción y costos de excavación de túneles no concesionados.
- **Datos de condición:** datos necesarios para conocer el desempeño del túnel en el momento de la valorización. En túneles, se propone que esta información se obtenga de inspecciones realizadas de manera trimestral mediante golpeteo martillo y auscultación visual, además de un informe completo anual mediante tecnología láser, ultrasonido y micro-geofísica.

De la Tabla 26 de costos históricos de túneles viales, se compara la relación entre longitud del túnel, costos de excavación y costo de construcción para cada túnel vial disponible con información.

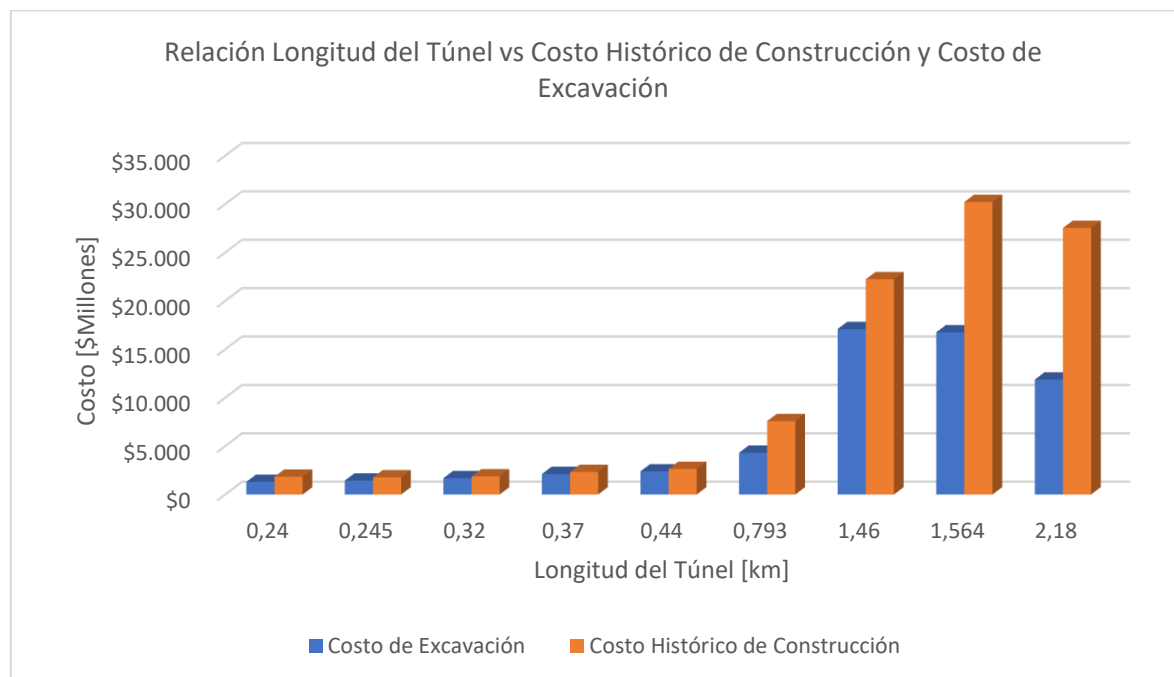


Ilustración 54. Gráfico de relación Longitud del Túnel vs Costo de Construcción y Costo de Excavación.

Se puede observar a partir del gráfico, que a medida que aumenta la longitud del túnel, mayores son los costos de excavación y de construcción, y a la vez, también lo es la brecha de valor entre estos costos.

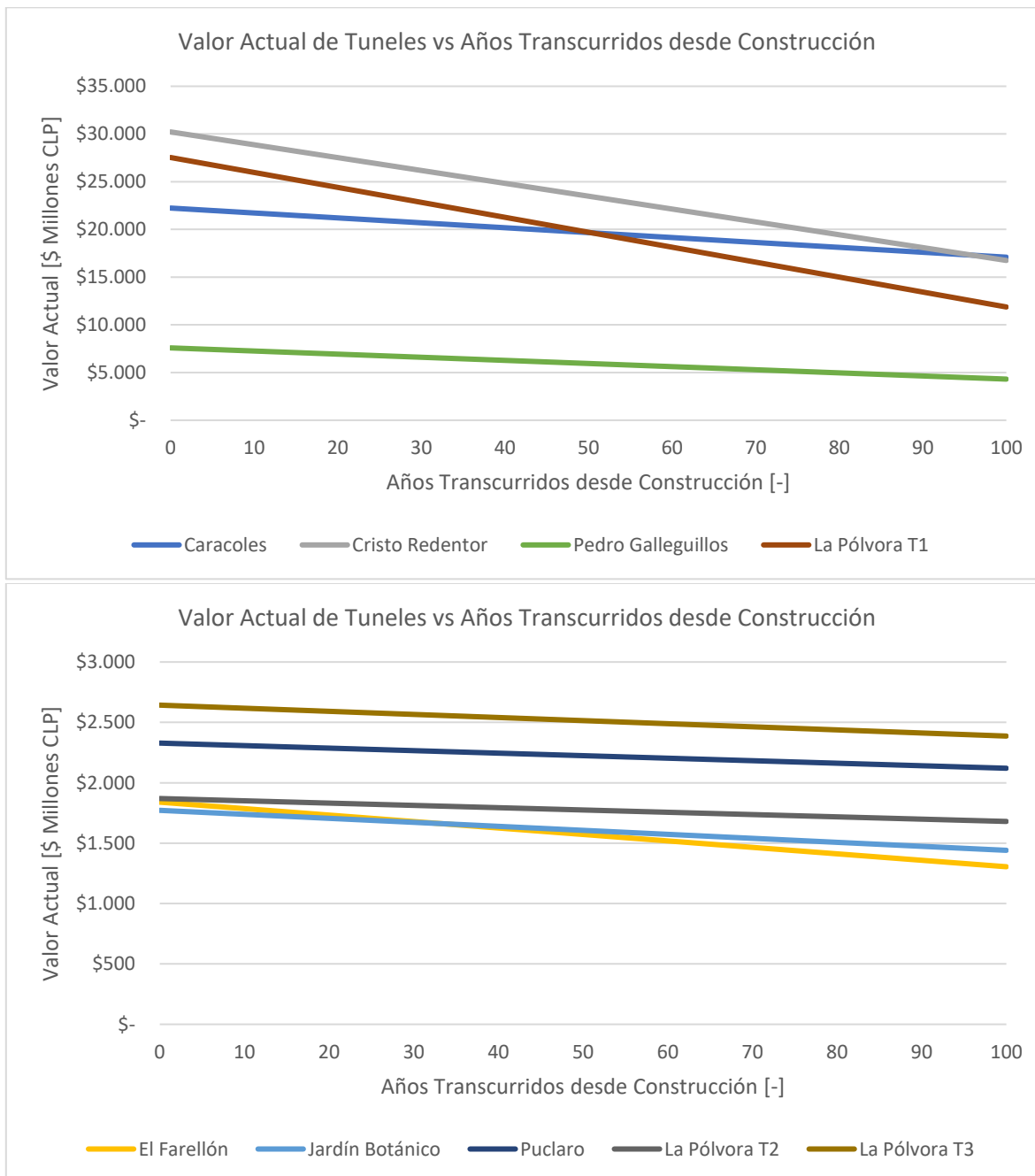


Ilustración 55. Gráficos de variación de valor actual en 100 años de vida útil con depreciación lineal.

Del gráfico anterior, se observa que, para la metodología actualmente utilizada para la valorización de túneles, a mayor monto de costo histórico, y a mayor diferencia entre costo histórico y costo de excavación, más varía el valor del túnel a medida que pasan los años con respecto a su año de construcción. Se puede concluir que a cuando el túnel tiene mayor longitud, lo que implica mayores diferencias entre costo de excavación y construcción, la pendiente de la depreciación lineal es mayor.

Información Disponible

Al contar con información de costos históricos y costos de excavación anteriores, pero no con datos de informe anual mediante inspecciones, se procede a analizar como varia el valor actual del túnel haciendo variar el índice de condición en la formulación del valor fijo respecto a condición límite.

Se propone analizar el caso con la formulación que entrega un valor del costo histórico de construcción del túnel cuando el indicador de condición es “Muy bueno” y “Bueno”, un valor igual al costo de excavación cuando el indicador de condición es “Justo”, “Malo” y “Muy Malo”.

Tabla 32. Valor Actual del Sistema Estructural usando VFCL, con dos montos escalonados.

Nombre Túnel	Longitud [km]	Año Construcción	Costo de Excavación (\$)	Costo de Construcción (\$)	Índice de Condición	Valor Actual (\$) VFCL
Cristo Redentor	1,564	1980	16.745.548.046	30.216.439.788	MB	30.216.439.788
					B	30.216.439.788
					J	16.745.548.046
					M	16.745.548.046
					MM	16.745.548.046
Caracoles	1,46	1910	17.088.070.619	22.234.587.930	MB	22.234.587.930
					B	22.234.587.930
					J	17.088.070.619
					M	17.088.070.619
					MM	17.088.070.619
Pedro Galleguillos	0,793	1994	4.311.434.935	7.582.077.169	MB	7.582.077.169
					B	7.582.077.169
					J	4.311.434.935
					M	4.311.434.935
					MM	4.311.434.935
Puclaro	0,37	1997	2.120.377.837	2.328.629.366	MB	2.328.629.366
					B	2.328.629.366
					J	2.120.377.837
					M	2.120.377.837
					MM	2.120.377.837
Jardín Botánico	0,245	1996	1.440.769.556	1.771.836.639	MB	1.771.836.639
					B	1.771.836.639
					J	1.440.769.556
					M	1.440.769.556
					MM	1.440.769.556

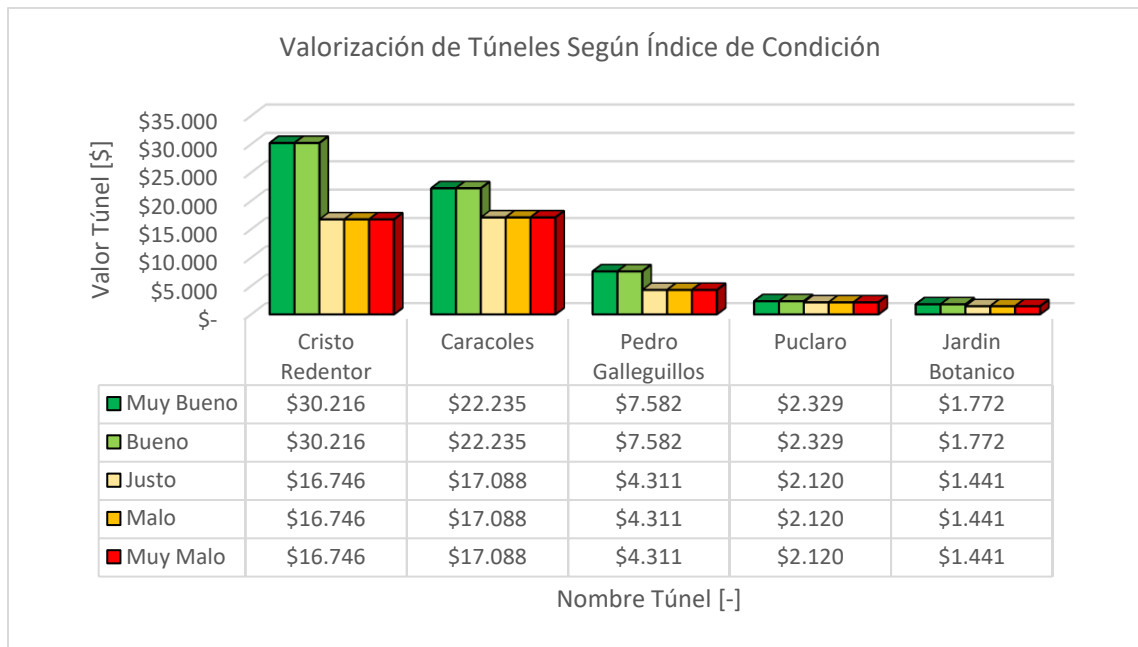


Ilustración 56. Gráfico con valores actuales del Sistema Estructural usando VFCL, variando Índice de Condición.

Se observa a través del gráfico y la tabla anteriores, que a medida que aumentan los costos de construcción e históricos, y mientras mayor sea la brecha entre tales costos, mayor es la diferencia entre el valor patrimonial del sistema estructural del túnel, entregando para el caso más extremo del valor máximo (Cristo Redentor), casi un 50% de diferencia de valor patrimonial al comparar en estado “Muy Bueno” y “Muy Malo”, cuyo porcentaje se acerca a los 14 mil millones [\$], siendo de gran influencia este sistema que se considera cercano al 90% del valor total del túnel.

10. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología de valorización de los sistemas de protección contra incendios, saneamiento y drenaje, y estructural, con el fin de obtener el valor de los túneles, y posteriormente, del patrimonio de una carretera.

Para obtener los resultados mencionados se realizó, en primer lugar, la identificación y caracterización de los elementos que componen cada uno de los sistemas, y que son necesarios para la valorización de cada uno de estos. En su búsqueda, se revisó el Manual de Carreteras (MC2020), Bases de Licitaciones y normativas internacionales, desde los cuales fue posible identificar diversos elementos que les otorgan valor a los sistemas de protección contra incendios, saneamiento y drenaje, y estructural de túneles.

En segundo lugar, se realizó una revisión bibliográfica referente a las diferentes metodologías de valorización, las cuales fueron posteriormente analizadas según su compatibilidad con cada uno de los sistemas, siendo medidas mediante los parámetros que exige cada modelo y la información disponible para ellos.

Las metodologías propuestas deben ser compatibles con los indicadores de nivel de servicio desarrollados anteriormente (*"Indicadores de Desempeño en Túneles Viales para Modelo de Nivel de Servicio de Carreteras"*, Sepúlveda 2019). En el caso del sistema de protección contra incendios, el parámetro a evaluar es el funcionamiento y cumplimiento de la normativa establecida para que se permita el tráfico de vehículos dentro del túnel. En el caso del sistema de saneamiento y drenaje se evalúa la condición de cada elemento, según los deterioros presentes, y su nivel de severidad para cada deterioro. Y finalmente, en el caso del sistema estructural, se evalúa la estructura completa del túnel en busca de deterioros, grietas o filtraciones en el revestimiento, para asigna una calificación de condición cualitativa.

En el sistema de protección contra incendios, este se compone de 8 elementos (redes de incendio, combate manual de incendios, manejo de aire, cortinas de agua, red húmeda, monitoreo y control, sensores de detección de incendios y planes de respuesta ante emergencias), y cada elemento con sus respectivos elementos. Para su valorización se propone el uso de un índice de condición binario que entrega valor "1" si el elemento está en funcionamiento y cumple la normativa exigida para el paso de vehículos dentro del túnel, y un valor "0" en caso contrario. Esto junto con el costo histórico de cada elemento, se aplica en la metodología de valor fijo respecto a condición límite, la cual multiplica el costo de cada elemento con el índice de condición, y la suma del valor patrimonial de cada elemento entrega el valor patrimonial del sistema de protección contra incendios en túneles.

En el caso del sistema de saneamiento y drenaje, este se compone de drenaje interior (drenes longitudinales, colectores, cámaras de inspección, soleras y sumideros) y drenaje exterior (cunetas y contracunetas, cajas disipadoras, alcantarillas y badenes). Para su valorización, mediante inspección visual se identifica si alguno de los deterioros que pueden afectar a cada uno de los elementos de este sistema, presenta algún grado de severidad (Baja, Media o Alta), para posteriormente aplicar la metodología de valor fijo respecto a condición limite. La formulación de valor fijo respecto a condición limite se aplica a cada elemento del sistema de saneamiento y drenaje, evaluando si hay deterioros presentes o no, donde en caso de no tener deterioros, se considera la valorización del elemento igual al costo histórico, y, en caso contrario, al presentar algún deterioro, independiente el grado de severidad, la valorización de este elemento se considera nula o igual a cero. La suma de los valores de cada elemento entrega el valor patrimonial del sistema de saneamiento y drenaje en túneles.

Finalmente, para el sistema estructural, mediante inspecciones trimestrales por auscultación visual y golpeo martillo, junto con un informe completo anual que evalúa la presencia de deterioros en la estructura del túnel, se obtiene una calificación de condición cualitativa, con la cual se propone la metodología de valorización del valor fijo respecto a condición límite, obteniendo valores que varían entre el costo de construcción histórico del túnel en caso de tener calificación “Muy Bueno”, hasta el costo de excavación del túnel para la calificación “Muy Malo”, con lo cual se obtiene el valor patrimonial para el sistema estructural completo del túnel, y no por elemento.

Por otra parte, el objetivo de proponer una metodología de valorización compatible con el nivel de servicio a los usuarios no es alcanzado íntegramente debido a que en la investigación se evidenció que existen sistemas que no tienen modelos de nivel de servicio, o no reflejan la condición del activo, lo que trae por consecuencia el no poder reflejar el valor del activo.

Cabe mencionar que todas las metodologías deben incorporar parámetros que sean de fácil obtención para que las concesionarias puedan tener acceso a la medición de estos, con el fin de que el resultado posea altos niveles de precisión y fiabilidad en cuanto al valor patrimonial.

11. Trabajos a Futuro

Entre los trabajos a futuro que se pueden identificar, se encuentra validar cada una de las metodologías propuestas en este informe, con datos que se pueden obtener de la dirección de concesiones, entregando información de distintos parámetros de cada sistema, reflejando la condición en la que se encuentra cada sistema y sus elementos, considerando las vidas útiles de estos cuando sea requerido, para obtener el valor de cada sistema y comprobar la precisión que entrega la metodología en cuanto a la valorización de estos sistemas, para ver si es necesario realizar ajustes.

Además, se podría estudiar qué valor toma cada sistema cuando se encuentra en cierto nivel de desempeño, basado en la opinión de un panel de expertos, y adecuarlos para cada uno de los sistemas del túnel, junto con hacer la diferencia entre túneles por zonas a nivel país, dependiendo de condiciones ambientales, niveles de tráfico en el túnel, entre otras. De esta manera, se podría comparar entre las diferentes metodologías, para aplicar la que entregue mejores resultados, y las concesionarias sean capaces de aplicar en su metodología de valorización.

12. Referencias

- Acharya D., University of Toledo (2014). *Transportation Asset Valuation*. Alliance España. *Revestimiento de Túneles en Acero Vitrificado*.
- Arce, L., (2021). *Resumen y análisis de métodos basados en el costo*.
- Arriagada, H., Echaveguren, T., Chile (2015). *Manual de Inspección Visual de Activos de Saneamiento y Drenaje de Carreteras*.
- Dirección de Vialidad (2020), Chile. *Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño*.
- Dirección de Vialidad, Chile (2020). *Manual de Carreteras Volumen 6: Seguridad Vial*.
- Dirección de Vialidad, Chile (2020). *Manual de Carreteras Volumen 7: Mantenimiento Vial*.
- Dirección de Vialidad, Chile (2021). *Nómina de Túneles chilenos*. Obtenido de <https://vialidad.mop.gob.cl/areasdevialidad/tuneles/Paginas/default.aspx>
- Dirección de Vialidad, Departamento de Gestión Vial, Chile (2013). *Valor del Patrimonio Vial de la Red Vial Nacional*.
- Dojutrek, M. S., Makwana, P. A., & Labi, S. (2012). *A methodology for highway asset valuation in Indiana*.
- Federal Highway Administration (FHWA), EE.UU. (2015). *Tunnel Operations, Maintenance, Inspection and Evaluation. TOMIE Manual*.
- German Tunnelling Committee (2018). *Recommendations for the Determination of Lifecycle Costs for Road Tunnels*.
- Ingeniería y Computación (2007). *Túnel de Hsuehshan, Taiwán*.
- MetroLight (2002). *Iluminación de emergencia para vías de evacuación*.
- Ministerio de Fomento, España (1998). *Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS 98)*.
- Ministerio de Obras Públicas, Chile (2013). *Base de Licitación Concesión Américo Vespucio Oriente*.
- Ministerio de Obras Públicas, Chile (2013). *Base de Licitación Concesión Interconexión Vial Santiago – Valparaíso – Viña del mar*.
- Ministerio de Obras Públicas, Chile (2015). *Base Licitación, Re licitación Concesión Túnel El Melón*.
- Muñoz, R. (2019). *Desarrollo de un Modelo para Evaluar el Nivel de Servicio de Carreteras Interurbanas Concesionadas desde el Punto de Vista del Usuario. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María*.
- Norwegian Public Roads Administration (2004). *Road Tunnel*.
- Pefipresa (2015). *Sistemas de Protección contra Incendios en Túneles*.
- PIARC (2019). *Manual de Túneles de Carretera*.
- PIARC, Manual de Túneles de Carretera (2019). *Tunnel Les Monts, Francia*.
- Revista de Transporte Terrestre, Chile (2020). *Tecnología implementada en Túnel El Melón II*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte, México (2016). *Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera*.
- Sepúlveda, R. (2019). *Indicadores de Desempeño en Túneles Viales para Modelo de Niveles de Servicio de Carreteras. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María*.
- Structuralia (2021). *Mecanismos de Sostenimiento de túneles*.
- WaterFire. *Ropa de trabajo y Equipo de Protección contra Incendios*.
- Weldemicael E., Xiaoyang S. & Redd L. (2017). *Asset Valuation of Transportation Infrastructure, Proof of Concept in Colorado*.

Anexos

Anexo.1: Ejemplos de Intervalos de Mantención para sistemas contra fuego y seguridad de personas.

Fire and Life Safety Systems	Service Interval (1)						
	Daily	Weekly	Monthly	Quarterly	Semi-Annually	Annually	Bi-Annually
Fire Protection							
Inspect Manual Fire Alarm Boxes			X				
Closed-Circuit TV (CCTV) – Confirm Operation	X						
Automatic Fire Detectors				X			
Fire Extinguishers							
Inspect each fire extinguisher in the tunnel and support spaces				X			
If in a cabinet – Confirm operation of cabinet door – Door must latch securely and open freely				X			
Lubricate door handle and hinges as necessary				X			
Fire Standpipes							
Fire Department Connections Capped and Clear				X			
Confirm threads are undamaged and caps in place				X			
Test flow hydrant				X			
Confirm top nut and caps are tight but not over-torqued				X			
Fire Hydrants							
Grease top nut					X		
Confirm cap's in place					X		
Test flow hydrant					X		
Confirm top nut and caps are tight but not over-torqued					X		
Fire Lines							
<i>Freeze Protection Pumps</i>							
Clean and visually inspect				X			
Lubricate and grease pumps						X	
Heat Tracing – Verify system operation (prior to system operation)						X	
Pipe Insulation with Heat Tracing - Verify condition (prior to system operation)						X	

Fire and Life Safety Systems	Service Interval (1)						
	Daily	Weekly	Monthly	Quarterly	Semi-Annually	Annually	Bi-Annually
Fire Pumps							
Visually inspect fire pump		X					
Operate pump – Note unusual noises or vibrations				X			
Lubricate pump, motor, and coupling							X
Operate pump and measure current					X		
Check shaft alignment and shaft endplay					X		
Check and correct pressure gauges as required					X		
Measure motor and pump vibration				X			
Fire Pump Controller							
Exercise disconnect switch and circuit breaker		X					
Operate pumps from alternate and primary power supplies		X					
Conduct annual test of system including flow and no flow conditions in accordance with NFPA 72						X	
Fire Tank Fill Pump							
Visually inspect pump		X					
Operate pump – Note unusual noises or vibrations						X	
Lubricate pump, motor, and coupling				X			
Check shaft alignment and shaft endplay				X			
Secondary containment provided for all hazardous materials		X					
MSDS sheets for all materials posted (on file)					X		
Inspect all floors for oil leakage. Add absorbent and clean as required to maintain safe footing	X						
Fire Alarm System							
<i>Perform all tests and inspections in accordance with NFPA 72</i>							
<i>Make and file a permanent record of all inspections and tests conducted</i>							
Open primary power supply to fire alarm panel and note sounding of trouble alarm and light		X					
Perform fire drill by use of drill switch on fire alarm panels, and check that all visual and audible signals emit a sound and tunnel SCADA system (if any) receives alarm		X					

Fire and Life Safety Systems	Service Interval (1)						
	Daily	Weekly	Monthly	Quarterly	Semi-Annually	Annually	Bi-Annually Manufacturer or AHJ (2)
Visually inspect all supervisory and water flow alarms on any standpipe systems		X					
Test all heat detectors with a calibrated heat source and replace all failed units					X		
Test all smoke detectors by measuring and recording sensitivity; replace all failed units					X		
Clean all smoke and heat detector housings and check battery voltage under load					X		
Verify that proper alarm devices operate for the appropriate initiating device circuit					X		
Verify that all remote annunciators operate				X			
Check all lamps, alarm devices, and printers for proper operation				X			
Make a discharge test of batteries to determine capacity for operating system for 24 hours					X		
Communications							
Radio	X						
Telephone	X						
Egress							
Emergency Egress		X					
Exit Lighting/Signage/Identification		X					
Tenable Environment (Note: Smoke Control Ventilation is located in Fire Suppression Section)		X					
Emergency Exits		X					
Cross-Passageways		X					
Electrical							
Emergency Lighting			X				
Power			X				

Fire and Life Safety Systems	Service Interval (1)						
	Daily	Weekly	Monthly	Quarterly	Semi-Annually	Annually	Bi-Annually
Redundant Power			X				
Security Plan			X				
Emergency Response Plan (ERP)							
ERP on File and all Personnel Aware of Requirements					X		
ERP reviewed and update periodically					X		
Tunnel Personnel Training of execution of ERP			X				
Training Exercises with Participating Agencies						X	
Hydrocarbon Detector							
Confirm Hydrocarbon Detector will initiate local and remote alarms							X
CO Monitoring Equipment							
Tunnel (Local) Sensors (Confirm Calibration and/or sensor replacement)							X
Vacuum Tubing (Leak Test)				X			
Vacuum Pump (lubrication)				X			
Central Sensor							X
System Calibration (as required by individual system)							X
Comparison Gas Refill (as required)							X
Life Safety and Fire Code Issues (Flammable/Hazardous Materials)							
All safety guards and covers (belt, chain, electrical panel) in place and secure.		X					
No plastic (PVC, CPVC) pipe located in supply air passages.					X		
All batteries properly stored and vented. Confirm battery charging only taking place in well ventilated spaces.		X					
Flammable material stored in proper containers and properly ventilated spaces.		X					
Secondary containment provided for all hazardous materials		X					
MSDS sheets for all materials posted (on file)					X		
Inspect all floors for oil leakage. Add absorbent and clean as required to maintain safe footing	X						

Fire and Life Safety Systems	Service Interval (1)							
	Daily	Weekly	Monthly	Quarterly	Semi-Annually	Annually	Bi-Annually	Manufacturer or AHJ (2)
Notes: (1) The above table is intended as a guide. In all cases, maintenance should be performed in accordance with the manufacturer's specific recommendations. (2) Perform in accordance and as recommended in unit manufacturer's literature or inspect on an interval required by the local authority having jurisdiction (AHJ).								