

# **DISEÑO DE TÚNELES Y PROBLEMÁTICA DE LA SEGURIDAD EN LA EXPLOTACIÓN: VISIÓN DESDE LA PERSPECTIVA DE LA NORMATIVA**

**M. Alberto Abella  
Ignacio García-Arango  
Fernando Hacar**

## **Resumen**

**D**esde la publicación de la Directiva Europea, y su trascipción al Real Decreto se dispone en España de una Normativa propia acerca de los elementos a considerar en el diseño de los túneles.

Pese a ello, el Real Decreto deja en otras normativas parte de los aspectos considerados en esa normativa de túneles, asimismo hay que mencionar que otros no están regulados.

La delegación en normativas vigentes, pero no actualizadas, sobre aspectos tales como la definición de túnel, o la importancia, tanto del trazado, como de la sección transversal a emplear, así como la aplicación de determinadas normativas, como es el caso de la de las instalaciones contra incendios, tienen consecuencias de gran importancia a la hora de la explotación del túnel, tanto desde el punto de vista de la seguridad en la operativa, como en la racionalización y optimización de los costes. Asimismo, la adecuación a las disposiciones del Real Decreto es un asunto de enorme relevancia, por las implicaciones económicas derivadas de la gran inversión necesaria; por ello este asunto debe ser objeto de reflexión.

En esta ponencia se tratará de dar una visión basada en la experiencia de más de diez años explotando túneles de diversas tipologías.

## Introducción

La publicación del Real Decreto 635/2.006, trascipción de la Directiva Europea 2004/54/CE, ha sido, sin ninguna duda, una luz en la oscuridad normativa en materia de seguridad, referida a los túneles carreteros.

Como es sabido a partir de su publicación quedan regulados los principales aspectos en cuanto a las instalaciones a colocar. Desde el año 2.005 hasta la fecha, se han explotado los túneles de acuerdo con las directrices emanadas desde dicho Real Decreto, y se han ido observando, aspectos inconcretos, lagunas y hasta contradicciones que, a lo largo de esta charla, se comentarán.

Existen dos aspectos distintos de la explotación de un túnel, que condicionan el que esta sea más o menos dificultosa:

- Los derivados de la aplicación de las normas existentes, o de las meras recomendaciones tomadas de forma literal.
- Los derivados, tanto del diseño de la instalación, como de los elementos colocados.

Aunque el Real Decreto explicita los elementos a colocar en un túnel en función de su longitud, tipología, IMD, el diseño del mismo, en cuanto a sección transversal, pendiente etc., se debe hacer conforme a la Normativa de trazado 3.1-IC.

En el siguiente cuadro se puede apreciar las características de la plataforma en la sección transversal según el tipo de carretera:

TIPO CARRETERA		SECCION NORMAL	SECCION TÚNEL
CALZADAS SEPARADAS	2 Carriles sin posible ampliación	$\frac{1}{2} \times 3,5 / 2,5 = 10,5$	$\frac{1}{2} \times 3,5 / 2,5 = 10,5$ Excepción: $0,5 / 2 \times 3,5 / 1 = 8,5$
	2 Carriles con posible ampliación	$\frac{1}{2} \times 3,5 / 2,5 = 10,5$ $1/3 \times 3,5 / 2,5 = 14$	$1/3 \times 3,5 / 1 = 12,5$
	3 Carriles	$1/3 \times 3,5 / 2,5 = 14$	$1/3 \times 3,5 / 1 = 12,5$
VIAS RAPIDAS		$2,5 / 2 \times 3,5 / 2,5 = 12$	$1/3,5 / 1,5 / 3,5 / 1 = 10,5$
CARRETERAS CONVENCIONALES	C-100 con arcenes de 2,5 m.	$2,5 / 2 \times 3,5 / 2,5 = 12,0$	$1,0 / 3,5 / 1,0 / 3,5 / 1,0 = 10,0$
	C-100 con Arcenes de 1,50 m C-80	$1,5 / 2 \times 3,5 / 1,5 = 10,0$	$1,0 / 3,5 / 1,0 / 3,5 / 1,0 = 10,0$
	C-60 con arcenes de 1,50 m	$1,5 / 2 \times 3,5 / 1,5 = 10,0$	$1,0 / 2 \times 3,5 / 1,0 = 9,0$
	C-60 con arcenes de 1,00 m	$1,0 / 2 \times 3,5 / 1,0 = 9,0$	$1,0 / 2 \times 3,5 / 1,0 = 9,0$
	C-40 con carriles de 3,50 m	$0,5 / 2 \times 3,5 / 0,5 = 8,0$	$0,5 / 2 \times 3,5 / 0,5 = 8,0$
	C-400 con carriles de 3,0 m	$0,5 / 2 \times 3,0 / 0,5 = 7,0$	$0,5 / 2 \times 3,0 / 0,5 = 7,0$

Tras dejar al margen la tipología de la sección C-40, por estar en un nicho muy definido, y poco usual, se puede profundizar algo más en otros tipos más comúnmente utilizados:

- 1. Calzadas Separadas, 2 Carriles sin posible ampliación.**
- 2. Carreteras Convencionales C-100 con Arcenes de 2,50 m**

En el primer caso, el ancho de plataforma del túnel se corresponde con las siguientes medidas:  $\frac{1}{2} \times 3,5 / 2,5 = 10,5$ , que permiten una explotación racional y segura del túnel, al disponer de una anchura de arcén suficiente para retirar cualquier vehículo averiado; también es posible realizar, si se dispone de él, gran parte de las labores de mantenimiento sin afectar en gran medida a la circulación. No se contempla en esta sección el ancho de las aceras, que el Real decreto fija en 0,75 m. lo que lleva el ancho final de la plataforma a 12 metros (10,5 + 2x0,75) .

Existe una excepción que es la de un ancho de plataforma de 8,5 metros, sin contemplar las aceras. Esta sección introduce, tanto una clara situación de inseguridad, como un mayor coste en los trabajos de explotación, al ser necesario cortar un carril para cada actuación. Es claro que resulta más económico construir un túnel con esta sección que con otra mayor, aunque el sobrecoste puede resultar muy asumible a tenor de los ahorros durante la vida útil del túnel; así como por la mayor seguridad durante la explotación.



*Foto1: Sección de túnel con los dos anchos de arcén: derecha 2m, izquierda 1m.*

El caso de las carreteras con doble sentido de circulación, C-100 con arcenes de 2,5 metros, el ancho de plataforma pasa, en el interior del túnel, de 12 a 10 m.

disponiéndose así de una separación de 1m entre los carriles, según se puede ver en el siguiente esquema:

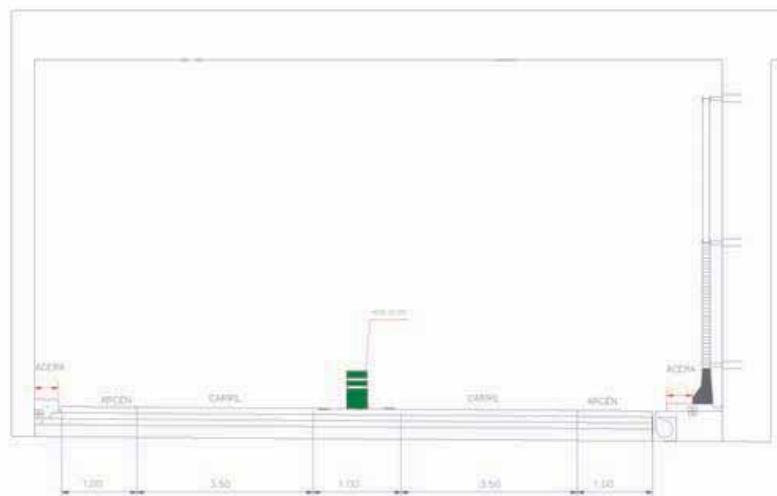


Figura 1: Sección transversal normalizada

Sin negar los beneficios de este diseño, surge una pregunta inevitable, tanto más acuciante, cuanto mayor sea la longitud del túnel: Y ella es, en caso de avería de un vehículo, ¿Qué le pasa al tráfico? La respuesta inmediata es que se queda retenido, especialmente si es un vehículo pesado, pues los 2,5 metros de anchura de un camión ocupan buena parte de la calzada e impide el paso de otro vehículo pesado. Ello genera una situación evidente de inseguridad.

Una mayor sección, aunque siga siendo estricta, aseguraría el flujo del tráfico, y por tanto unas condiciones de explotación más segura en el túnel. El siguiente esquema muestra esa posible sección:

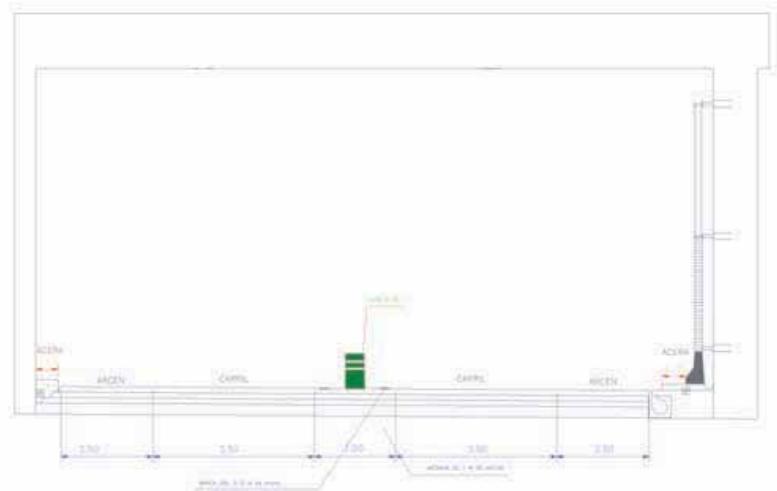


Figura 2: Sección transversal optimizada

Si se hace una comparativa de los costes de excavación y sostenimiento de un túnel del tipo medio, unos 1.000 metros, con un terreno atravesado compuesto por un porcentaje alto (en torno al 50 %) de terrenos de calidad mala, que obliga a sostenimientos pesados, un 30 % de terreno medio, con sostenimientos mas normales, y un 20 % de terrenos buenos, con sostenimientos ligeros, se llega a la conclusión de que la diferencia de coste entre la sección estricta de la norma, y la propuesta, que mejora sustancialmente la seguridad, es de un 7,5%, según se muestra en el cuadro comparativo, en el cual se detalla el análisis y las características de las secciones a excavar, que son las siguientes.

## **Comparación Entre Secciones Tipo**

---

### **Tipo A**

Cajón de 9,30 m de altura y 11,50 m de ancho (2 carriles de 3,50 m, mediana de 1,50 m, arcenes de 1,00 m y 0,50 m y aceras de 0,75 m).

Revestimiento de 0,30 m de espesor de hormigón, con impermeabilización de PVC, lámina de Geotextil y tubo dren de 150 mm ø por hastial.

Sostenimiento de 0,25 m de espesor de gunita con fibra, cercha HEB cada 0,75 m de avance y mallazo 15x15x10. Bulones de acero, de 25mm ø y 4 m de longitud, cada 0,75 m de avance, espaciados 1 m. Contrabóveda de 0,50 m de espesor de hormigón con cercha y mallazo.

Paraguas de micropilotes de 88 mm ø con lechada de cemento, separados 0,50 m entre sí, a lo largo del techo y de 5 m de cada hastial

Excavación con 0,15 m de abono de sobre excavación y 1,50 m bajo rasante.

---

### **Tipo B**

Cajón de 9,30 m de altura y 13,50 m de ancho (2 carriles de 3,50 m, mediana de 1,00 m, arcenes de 2,00 m y aceras de 0,75 m).

Revestimiento de 0,30 m de espesor de hormigón, con impermeabilización de PVC, lámina de Geotextil y tubo dren de 150 mm ø por hastial.

Sostenimiento de 0,25 m de espesor de gunita con fibra, cercha HEB cada 0,75 m de avance y mallazo 15x15x10. Bulones de acero de 25mm ø y 4 m de longitud cada 0,75 m de avance y espaciados 1 m. Contrabóveda de 0,50 m de espesor de hormigón con cercha y mallazo.

Paraguas de micropilotes de 88 mm ø con lechada de cemento, separados 0,50 m entre sí, a lo largo del techo y de 5 m de cada hastial.

**V SIMPOSIO DE TÚNELES**  
**SEGURIDAD PARA LOS TÚNELES DEL SIGLO XXI**

	Tipo A			Tipo B			incremento	%
	Medición	Ud	Coste	Medición	Ud	Coste		
<b>EXCAVACIÓN</b>	148,35 m <sup>3</sup>		<b>12.516,29 Ř</b>	165,60m <sup>3</sup>		<b>13.971,67Ř</b>	<b>1.455,38 Ř</b>	<b>11,63</b>
<b>SOSTENIMIENTO</b>			<b>20.951,70 Ř</b>			<b>22.184,63 Ř</b>	<b>1.232,93 Ř</b>	<b>5,88</b>
* Gunita	8,83m <sup>3</sup>		3.494,65 €	9,20m <sup>3</sup>		3.641,08 €	146,43 €	<b>4,19</b>
* Cerchas	52,95m		5.033,96 €	55,20m <sup>3</sup>		5.247,86 €	213,91 €	<b>4,25</b>
* Bulones	207,00m		3.887,46 €	216,00m		4.056,48 €	169,02 €	<b>4,35*</b>
Mallazo	34,50m <sup>2</sup>		404,34 €	36,00m <sup>2</sup>		421,92 €	17,58 €	<b>4,35</b>
* Contrabóveda			2.864,30 €			3.205,28 €	340,99 €	<b>11,90</b>
Cerchas	18,90m		1.796,82 €	21,15m		2.010,73 €	213,91 €	<b>11,90</b>
Hormigón	6,30m <sup>3</sup>		919,80 €	7,05m <sup>3</sup>		1.029,30 €	109,50 €	<b>11,90</b>
Mallazo	12,60m <sup>2</sup>		147,67 €	14,10m <sup>2</sup>		165,25 €	17,58 €	<b>11,90</b>
* Paráguas	45,80m		5.267,00 €	48,80m		5.612,00 €	345,00 €	<b>6,55</b>
<b>REVESTIMIENTO</b>			<b>2.045,79 Ř</b>			<b>2.143,88 Ř</b>	<b>98,09 Ř</b>	<b>4,79</b>
Hormigón	9,21m <sup>3</sup>		1.344,66 €	9,66m <sup>3</sup>		1.410,36 €	65,70 €	<b>4,89</b>
* PVC + Geotextil	30,70m <sup>2</sup>		662,81 €	32,20m <sup>2</sup>		695,20 €	32,39 €	<b>4,89</b>
* Tubo dren	2,00m		38,32 €	2,00m		38,32 €	0,00 €	<b>0,00</b>
<b>TOTAL</b>			<b>35.513,78 Ř</b>			<b>38.300,18 Ř</b>	<b>2.786,40 Ř</b>	<b>7,85</b>

Excavación con 0,15 m de abono de sobre excavación y 1,50 m bajo rasante.

Aplicando estos costes a un túnel de 1.000 metros de longitud, el resultado obtenido es que el incremento de una sección estricta normalizada frente a una sección propuesta más holgada, y segura es del 7,5% m, coste que parece bastante asumible.

	% Tipo I	% Tipo II	% Tipo III	m de paraguas	Longitud del túnel	
TÚNEL TIPO	50,00%	35,00%	15,00%	30,00	1000,00	
	Sección Tipo A		Sección Tipo B		Incremento	%
Coste del Túnel	<b>25.250.994,10 €</b>		<b>27.297.158,38 €</b>		<b>2.046.164,27 €</b>	<b>7,50</b>

Los elementos que se deben disponer en las instalaciones de seguridad y control, también están “regulados” por otras normativas, en su mayor parte ajenas, tanto a la realidad del túnel, como a los objetivos principales que se buscan. Entre estas normativas se pueden mencionar:

- Norma de incendios NBE-CPI-96, para el caudal y presión de la instalación contra incendios.
- Señalización: Normas 8.1-IC y 8.2-IC.

También existen otras normativas de aplicación en los túneles: El Reglamento de Instalaciones de Baja Tensión (REIBT), Reglamento sobre Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación, etc., que, por su carácter más específico y clara competencia profesional ajena a la ingeniería civil, no serán objeto de comentario.

La norma NBE-CPI-96 está dirigida a los sistemas de extinción de incendios en edificación, y trata de solventar los problemas derivados de los siniestros de este tipo en edificios, con la problemática de la altura, los múltiples puntos de acceso del aire, y el nulo control sobre ellos.

En un túnel el escenario es bien distinto, y por tanto las necesidades se deberían adecuar a él. Siguiendo la norma mencionada, aparecen dos puntos relevantes: Las dimensiones de los aljibes, y el funcionamiento de los grupos de presión.

Los aljibes, aplicando la mencionada norma, deberían tener una capacidad entorno a los 200 m<sup>3</sup>, que es un volumen muy respetable, y que en numerosas ocasiones constituye un problema, tanto en su construcción, como en su mantenimiento. Si en lugar de la norma de edificación se aplica la de instalaciones industriales, la capacidad del aljibe se torna bastante más contenida y asequible.

La mayor parte de los túneles tienen una afluencia de agua debida, a filtraciones del terreno, manantiales cortados, etc., que debe ser canalizada hacia el aljibe; esto permite mantenerlo siempre con agua, ahorrando los costes de llenado mediante cisternas. Es más económico y fiable disponer de un sistema automatizado de bombeo, en el caso de que el aljibe esté a una cota por encima de la rasante del túnel, que llenarlo con cisternas, y siempre se puede constatar el nivel de agua en el aljibe de forma automática.

Respecto a los grupos de presión, la normativa exige que haya una bomba principal, una de reserva y una bomba jockey para mantener la presión en el circuito. La potencia a la que se dimensionan estas bombas (generalmente muy generosa) viene

determinada por el caudal exigido en la mencionada norma; al igual que su funcionamiento: Una vez que la bomba principal se pone en funcionamiento, su parada ha de ser efectuada de forma manual, porque así viene exigido en la mencionada norma. En un entorno antropizado, para el que está pensada la NBE-CPI-96, este hecho no presenta mucho problema. No así en el túnel, en el que los grupos de presión están alojados en una caseta en las inmediaciones, cerrada para los bomberos y personal de vigilancia.... Si ocurre una avería en la tubería dentro del túnel que arranque esta bomba, se puede vaciar el aljibe, y en el mejor de los casos se está llenado la calzada de agua, cuando no creando una cortina que incida gravemente en la seguridad, sin que desde la Sala de Control se pueda hacer nada por impedirlo, salvo señalizar, hasta que el personal de mantenimiento se persone y para la bomba, si para entonces no se ha quemado por falta de agua. Como es natural, disponer de un interruptor de telemando soluciona la cosa, pero entonces se incumple la norma.

La señalización de los túneles se rige por la 8.1-IC, al igual que el resto de la carretera, no obstante, el Anexo III del real decreto incluye señales y símbolos que se han de utilizar en los túneles. Considerando que la mayor parte de los túneles ya disponen de señalización dinámica, tanto en la Paneles de mensajes variables, como en la propia entrada de los túneles, no parece muy indicado, casi por contradictorio, que se coloque a la entrada el cartel del gráfico:



CARTEL AUTOPISTA 2A

*Figura 3: Cartel Normalizado*

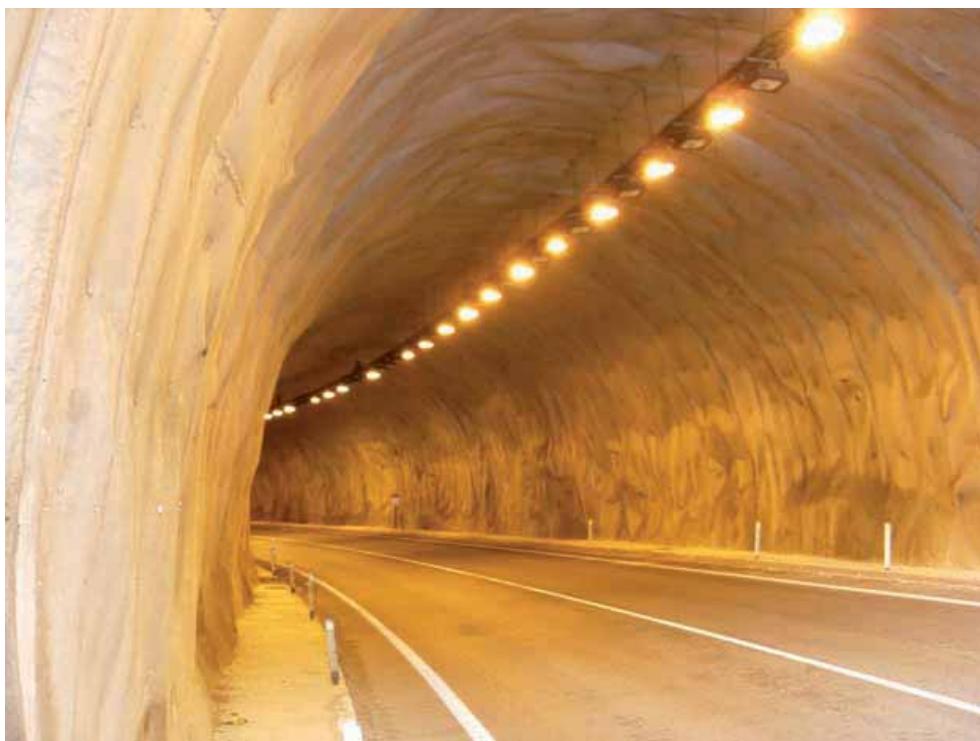
En el cual existe una limitación de velocidad que en determinados momentos contradice lo indicado en la señal de velocidad variable. Si bien es verdad que prevalece la variable, también lo es que el usuario “de a pie”, no se caracteriza por un exhaustivo conocimiento del Código de Circulación, y a él es a quien se deben facilitar las cosas.

## DISEÑO DE TÚNELES Y PROBLEMÁTICA DE LA SEGURIDAD EN LA EXPLOTACIÓN: VISIÓN DESDE LA PERSPECTIVA DE LA NORMATIVA

La colocación de la señalización en el interior del túnel es otra asignatura, muchas, veces pendiente:



*Foto 2: Interior de túnel. Detalle de acera*



*Foto 3: Señal en mitad de la acera.*

La colocación de las señales fijas, como se puede ver en muchas ocasiones, dificulta el tránsito por la acera. En caso de emergencia- salir del túnel guiándose o apoyándose en la pared del mismo- el cumplimiento de las normas se torna una trampa para el usuario; además de dificultar las labores propias del mantenimiento.

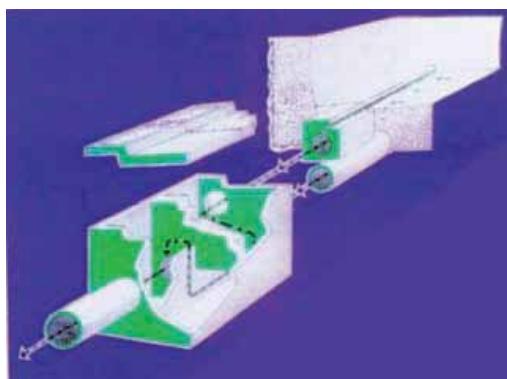
## Instalaciones Singulares

Casi todos los elementos y sistemas que se instalan en los túneles se ha “importado” de otros entornos, en los cuales han sido objeto de regulación y de normalización. El entorno del túnel, no es en la mayor parte de las veces ni similar, ni comparable al de origen, se pueden citar entre otros los sistemas de detección de CO, NOx, opacidad....

Los sistemas de control y señalización variable también se han importado, en su mayor parte de las instalaciones realizadas por la DGT, que reguló y normalizó muchos elementos, como pueden ser las estaciones remotas o ERU, los sistemas de comunicaciones mediante postes SOS, etc.

El uso en el túnel de estos elementos “normalizados” presenta ciertas ventajas, como pueden ser la pretendida estandarización que permite el intercambio de fabricantes, que no se da en la práctica, y también inconvenientes, como es el hecho de estar pensados para una tarea que no requiere las exigencias del túnel: Un panel de tráfico no requiere la misma inmediatez de uso en una carretera normal que en un túnel, en el que se pide que la transmisión y funcionamiento de los equipos se realice en tiempo real, puesto que la tecnología lo permite, y en muchos casos, por utilizar sistemas y tecnologías “importadas”, los instaladores no lo cumplen.

En otros casos sistemas que se han desarrollado para los túneles no han sido todo lo afortunados que debieran: como ejemplo el diseño del cañ de vertidos, que si bien cumple su función, el diseño hace muy difícil, o casi inviable un adecuado mantenimiento, así como la necesidad de asegurarse de que funciona:



Y, por otra parte, la colocación en obra, de este elemento, resulta compleja, y por tanto sujeta a problema, posteriores, de funcionamiento. El gran espacio necesario para colocar las arquetas sifónicas, y el poco margen disponible en la mayor parte de los túneles, unido a factores a priori poco previsibles, como pueden ser las contra bóvedas necesarias, que limitan la profundidad, las canalizaciones de cableado, de drenaje de filtraciones, y todos los avatares que surgen en una obra compleja como es la excavación del túnel, hacen que el acceso definitivo al interior de las arquetas sea casi imposible, lo que impide hacerles un correcto mantenimiento.

## **Conclusión**

Actualmente se dispone de una normativa que regula las instalaciones mínimas de seguridad en los túneles de carretera, que era una necesidad absoluta.

No obstante se debería profundizar, aún más, en el desarrollo y la regulación de los elementos que la componen, tanto desde el aspecto de “homologación”, entendiendo por tal la disposición de los elementos y sistemas de mercado, no de marcas propietarias, más adecuados al entorno del túnel, como del diseño de los mismos teniendo en cuenta que la tecnología avanza a velocidades a veces difíciles de seguir (de ahí un posible handicap para tratar de normalizar) pero que si permiten aplicar arquitecturas de comunicaciones, toma de datos y decisiones actualizadas, cada vez más fiables, sencillas y de componentes de más fácil y barata adquisición; solo hay que recordar el coste y recursos de los equipos informáticos que se utilizaban en los túneles hace 15 años, y compararlos con los actuales.

Es importante desarrollar los aspectos normativos, de modo que no sean de aplicación normas pensadas para otros entornos,-edificación- ajustándolas a la realidad en que deben operar-, no se trata de destruir o eliminar, si no de adecuar y racionalizar, en un camino que lleva poco trecho recorrido, y en el que se debe aún caminar mucho.