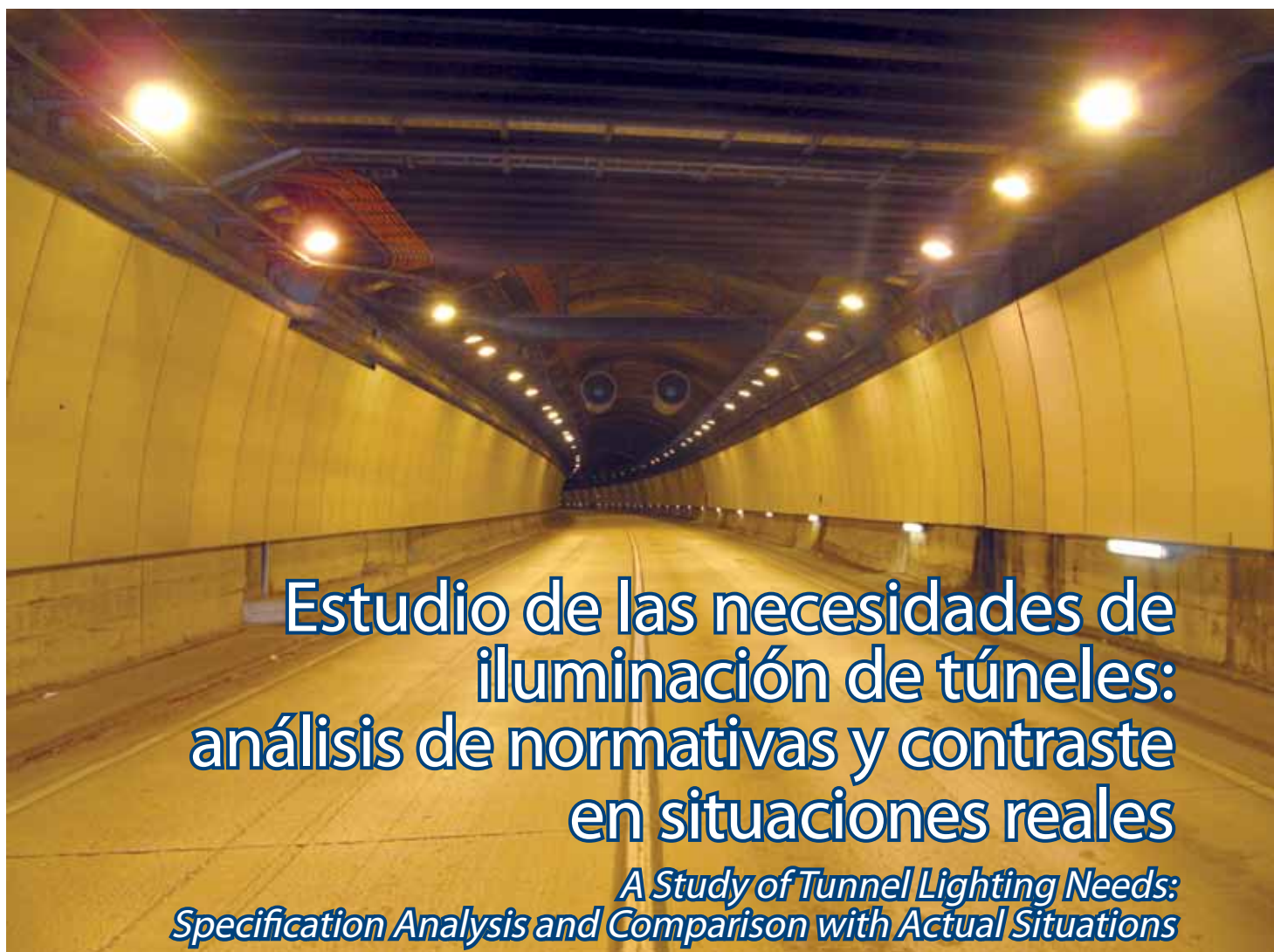




Estudio de las necesidades de iluminación de túneles: análisis de normativas y contraste en situaciones reales

A Study of Tunnel Lighting Needs: Specification Analysis and Comparison with Actual Situations

Jorge Manuel Fanlo Montes
Francisco Cavaller Galí
C. & G. Carandini, S.A.

Resumen

Este artículo trata sobre el análisis de las necesidades de iluminación de los túneles de carretera y vías urbanas en base a las diferentes normativas que son de aplicación dentro del marco legal español, y el contraste de las propuestas de estas normativas con las sensaciones visuales provocadas por las iluminaciones existentes en seis túneles en funcionamiento.

El contraste entre las normativas y los túneles existentes ha sido realizado mediante un trabajo técnico y experimental, que se completa con mediciones luminotécnicas, cálculos, datos fotográficos y vídeos. A partir de ello, tomando como condición indispensable la garantía de una conducción segura y el mínimo coste de las instalaciones, se determina qué criterio de los propuestos por las normativas se adapta mejor a las necesidades visuales del conductor. Finalmente se aplica el criterio propuesto en un túnel existente realizando una evaluación técnica y económica.

PALABRAS CLAVE: iluminación túneles, normativas, luminancia, mediciones luminotécnicas, cálculos luminotécnicos, seguridad vial, visibilidad.

Abstract

This article analyzes the lighting requirements in tunnels on rural and urban highways based on the different regulations applicable within the Spanish legal frame, and the contrast between these proposed regulations and the visual sensations caused by the actual illuminations in six tunnels in operation.

This has been achieved by a technical and experimental work, completed with luminotecnical measurements, calculations, photographic data and videos. From this, and guaranteeing safe driving and minimum cost of installations as an indispensable condition, it is determined which criteria of the regulations proposals are best adapted to the driver's visual requirements. Finally the proposed criteria are applied in an existing tunnel carrying out a technical and economic evaluation.

KEYWORDS: lighting tunnels, regulations, luminance, luminotecnical measurements, luminotecnical calculations, safety road, visibility.

1. Introducción

La confluencia de diferentes normativas en el marco legal español sobre el alumbrado de túneles y los diferentes criterios de diseño que en ellas aparecen dan lugar a la realización de este estudio. La definición de cuál de estas normativas es la que propone un diseño de iluminación más ajustado, teniendo en cuenta las necesidades reales de visibilidad en la conducción al aproximarse y atravesar el túnel, puede dar lugar a soluciones luminotécnicas dispares, todas ellas sujetas a normativa.

En algunos casos puede presentarse un diseño de alumbrado insuficiente de manera que la seguridad vial puede quedar afectada, o por el contrario puede presentarse un alumbrado excesivo que provoca un sobredimensionamiento de la instalación. Cabe destacar que en los túneles la seguridad del tráfico es una cuestión prioritaria, y que un túnel seguro es ante todo un túnel bien iluminado.

En definitiva, en este estudio se pretende escoger la propuesta más conveniente de manera que no se vean comprometidas la seguridad vial y la visibilidad del conductor. Asimismo, el estudio se propone alcanzar unos costes energéticos, económicos, medioambientales y cualitativos adecuados.

2. Motivos y necesidades de iluminación de los túneles

“Un túnel se ilumina para mantener las mismas condiciones de seguridad del tráfico que en la carretera de acceso al mismo”.

Los motivos por los que se ilumina un túnel están relacionados con la visibilidad del conductor, que depende de las capacidades visuales de éste, del entorno de la visión, de las condiciones atmosféricas, de las dimensiones del túnel, de la velocidad máxima de circulación y de la composición y densidad del tráfico.

Las necesidades de iluminación de un túnel variarán según si la conducción es diurna o nocturna. Durante el día, la adaptación del ojo humano desde unos niveles de luminancia altos en el exterior del túnel a unos niveles de luminancia bajos en el interior, en un período de tiempo corto debido



Figura 1. Interior túnel de carretera

al elevar la velocidad de aproximación del vehículo, requiere un adecuado diseño de la iluminación del interior del túnel. Por el contrario, el alumbrado durante la noche resulta menos complicado al no existir una diferenciación entre el alumbrado exterior e interior del túnel, independientemente de que se acceda al túnel desde una vía iluminada o sin iluminación.

En definitiva, el túnel debe proporcionar seguridad, guía visual, confort y confianza a los usuarios mediante una buena calidad de su alumbrado.

3. Visibilidad y seguridad

La visibilidad en la entrada y la salida del túnel está influenciada por la iluminación que percibe la retina y por las luminancias del entorno, denominadas luminancias de velo.

La presencia de bajas luminancias en el interior de la entrada del túnel, en contraste con las altas luminancias en el exterior del túnel, puede dar lugar al denominado efecto agujero negro, o efecto inducción, en el que no es posible apreciar el interior del túnel.

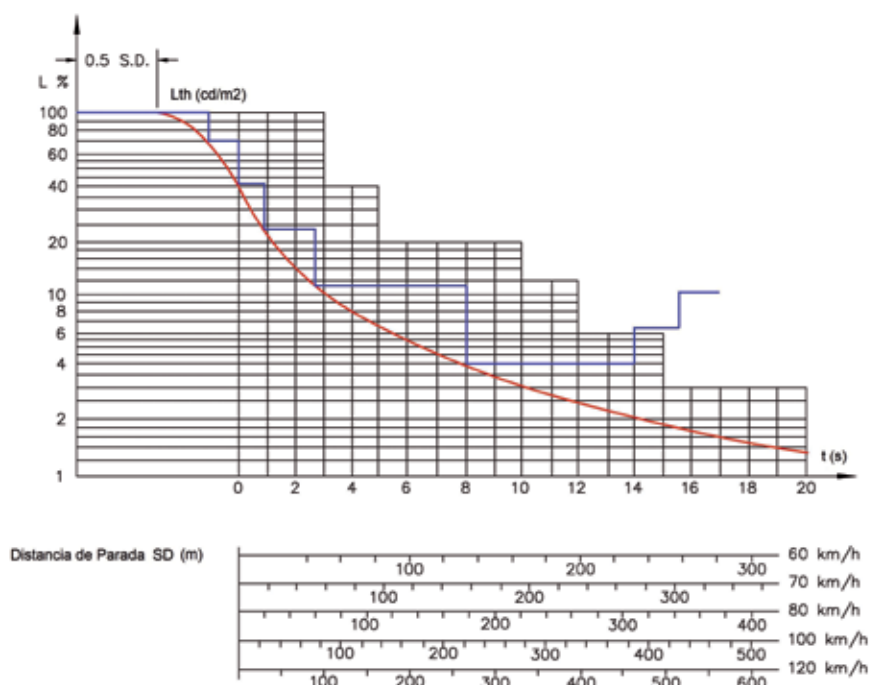


Figura 2. Curva de adaptación alumbrado diurno en túnel unidireccional a partir de la luminancia en la zona umbral L_{th}



Figura 3. Efecto inducción o agujero negro

Estasituaciónimpideelreconocimientode cualquierobstáculooretenciónocurridaen eltúnel,loquepodríaprovocarsobresaltos, reaccionesnosedesadaseinclusounacci- dente de gravedad.

Asimismo,tambiénsedaalefectode adaptación, que es el ajuste de la sensi- bilidaddelojo humanoauncambiodela distribucióndeluminanciasenelcampode visión.Estaadaptaciónseproducetantoen

elmomentoenqueseaccede altúnelcomomientrassetrans- curreporél,enamboscasosal irdecreciendoprogresivamente el valor de la luminancia.

Porsuparte,lailuminación enelinteriordeltúneldeberá evitar elevados deslumbra- mientosqueperjudiquenla ca- pacidadvisualdelconductor, asícomoellamadoefectoflic- keroparpadeo.Esteefectose presentaporelcambiobrusco yrepetitivodedistribuciónde luminanciasenelinteriordel túnel,provocadoporelbrillode las propias luminarias, de su reflejoenelcapódelvehículo

einclusolosbrillosexcesivosenla propia calzadafrutodeunadeficienteuniformidad.

Ademásdelalumbradodiurnoonotur- no,existenotrosalumbradosquegaranti- zanlaseguridadenlos casos más desfa- vorables,comosonlosdeemergencia.Entre éstossepuedendistinguirelalumbradode emergenciaporinterrupcióndelesuministro eléctricoyelalumbradodeemergenciade evacuaciónoescapeencasodeincendio.

4. Normativas contempladas de iluminación de túneles

Normativas específicas para la iluminación de túneles:

- Dirección General de Carreteras. (1999) Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Ministerio de Fomento, Madrid.
- Publicación CIE 88: 2004. Guía para el alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores.
- UNE-CR14380:2007 IN. Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de túneles.

Normativas con alguna referencia a la iluminación de túneles:

- Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.
- Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07.

5. Estudio comparativo de las diferentes normativas

Teniendo en cuenta las normas anteriores se realiza una tabla comparativa con los diferentes puntos clave de aplicación de las mismas. En algunos puntos específicos se contemplan otras normativas relacionadas además de las que se han mencionado.

En la tabla 1, se ha dado énfasis en color verde a aquellos puntos clave en los que no hay diferencias entre las normas y en rojo aquellas donde sí existen.

Apartir de las tablas comparativas se lleva a cabo un análisis de los puntos conflictivos donde existen diferencias importantes entre las normativas.

6. Trabajo experimental de túneles existentes seleccionados

Los puntos clave de las normativas se diferencian y afectan en gran manera a la seguridad de conducción y a los costes

Tabla 1. Puntos clave	
Aspectos de las normativas de túneles	Diferencias entre normas
Definición del problema	NO
Definición de la calidad de alumbrado de un túnel	NO
Criterio de iluminación	NO
Distinción entre túneles cortos y largos	SI
Clasificación de túneles según el alumbrado necesario durante el día	SI
Distancia de seguridad o distancia parada	SI
Punto de referencia. (Observador)	SI
Necesidad de alumbrado diurno	SI
Necesidad de alumbrado nocturno	SI
Iluminación de túneles largos	SI
Iluminación de túneles cortos	SI
Iluminación en las paredes	SI
Uniformidad de la luminancia	NO
Variación de la luz natural	NO
Sistemas de alumbrado	NO
Alumbrado exterior al acceso y la salida del túnel	NO
Alumbrado de emergencia	SI
Control del alumbrado	NO
Limitación del deslumbramiento	NO
Restricción del efecto parpadeo o flicker	NO
Mantenimiento	SI

Tabla 2. Detalle de una parte de la tabla comparativa de puntos clave				
	Dirección Gral. de carreteras (1999). Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Ministerio de Fomento. Madrid	Publicación CIE 88.2004. Guía para el alumbrado de túneles de carreteras y pasos inferiores	UNE-CR-1430:2007 IN AENOR.-Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de túneles	Diferencias entre normas
Definición de la calidad de alumbrado de un túnel	Nivel de luminancia de la calzada	Nivel de luminancia de la calzada	Niveles de luminancia de la superficie de la carretera o calzada	NO
	Nivel de luminancia de las paredes	Nivel de luminancia media de las paredes	Nivel de luminancia de las paredes	
	Uniformidad de distribución de luminancia en calzada y paredes	Uniformidad y distribución de la luminancia de la superficie de calzada y de las paredes	Uniformidad de distribución de luminancia en la carretera y paredes	
	Limitación de deslumbramiento	Limitación de deslumbramiento producido por las fuentes de luz	Control de deslumbramiento inducido	
	Control del efecto flicker o parpadeo	Limitación del efecto flicker o parpadeo	Modo de evitar las frecuencias críticas de parpadeo o flicker	
		Nivel de visibilidad de posibles obstáculos Guía visual		
Criterio de iluminación	Criterio de luminancias en calzadas y paredes	Criterio de luminancias en calzadas y paredes	Criterio de luminancias en calzadas y paredes	NO
Distinción entre túneles cortos y largos	Túneles cortos	Túneles cortos	Túneles cortos	SI
	Túneles largos	Túneles geoméricamente largos Túneles ópticamente largos	Túneles largos	

de la instalación son los que se refieren principalmente al alumbrado en la zona umbral. Este alumbrado varía en función de la luminancia en la zona de acceso (luminancia que percibe el ojo del conductor mientras está accediendo al túnel a una distancia al portal del mismo igual a la distancia de parada) y es la luminancia en calzada

del primer tramo cubierto desde la entrada del túnel. De la luminancia en la zona umbral dependen porcentualmente el resto de niveles de iluminación del refuerzo de alumbrado diurno. Además la iluminación que corresponde a la franja diurna supone entre el 75% y el 90% del consumo energético total del alumbrado del túnel.

Con el fin de determinar este alumbrado según las diferentes normativas y su idoneidad para la visibilidad del conductor, se han seleccionado seis túneles existentes en función de sus diferentes características geográficas y de tráfico, y se ha llevado a cabo el trabajo experimental.

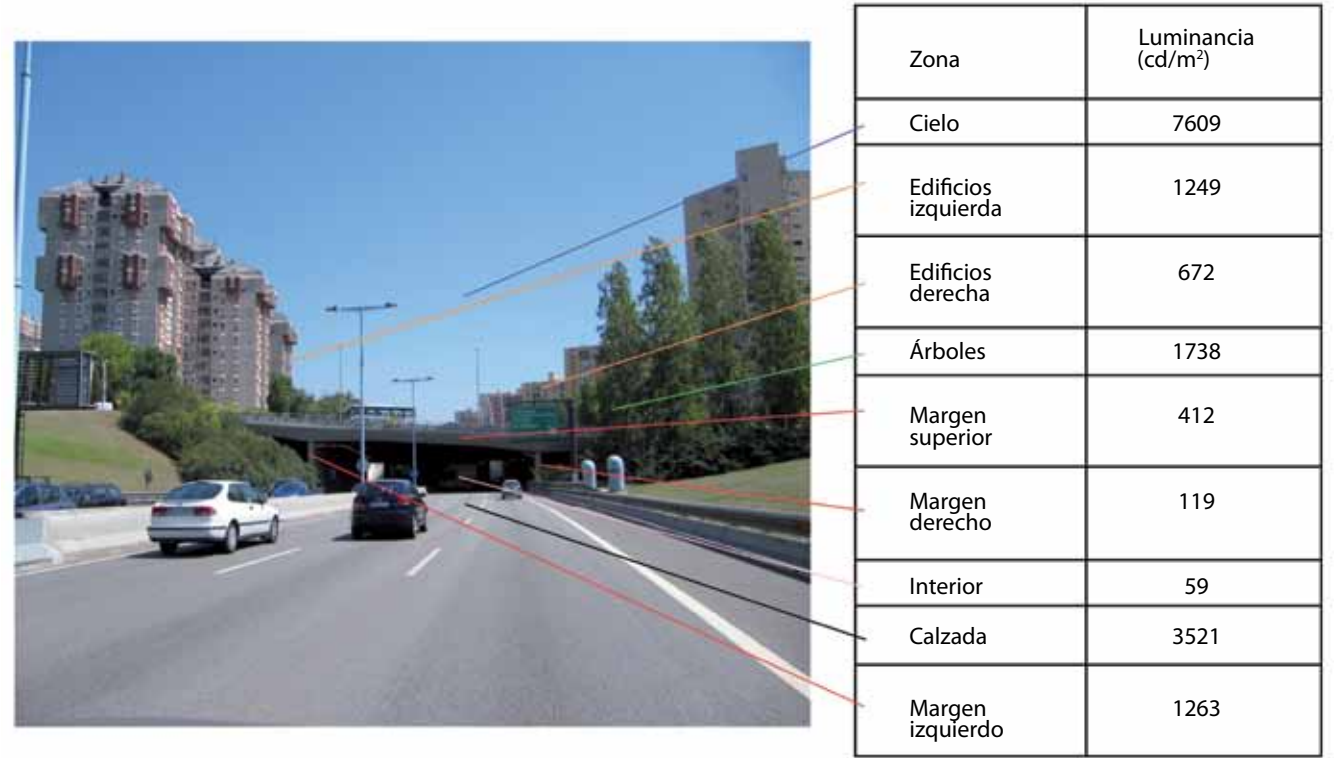


Figura 4. Mediciones luminotécnicas en la zona de acceso de la boca entrada Norte del Túnel E

23



Figura 5. Mediciones luminotécnicas en la zona umbral de la boca de entrada Norte del túnel E



Figura 6. Luminancias en las zonas umbral y de acceso

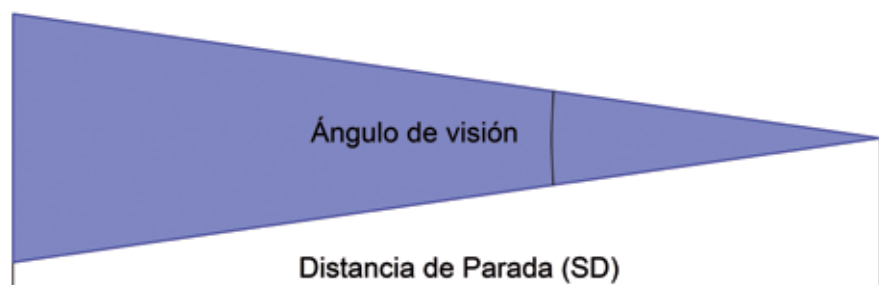


Figura 7. Perfil cono de visión

6.1. Selección de túneles

La luminancia en zona de acceso variará en función del lugar, orientación y entorno donde se encuentre el túnel. Por este motivo, el estudio se ha realizado para seis túneles unidireccionales para distintas orientaciones y entorno considerando seis grandes casos posibles.

- Túneles en zonas llanas y descubiertas:

Túnel A: Orientaciones Norte – Sur / Sur – Norte.

Túnel B: Orientaciones Este – Oeste / Oeste – Este.

- Túneles en zonas edificadas:

Túnel C: Orientaciones Norte – Sur / Sur – Norte.

Túnel D: Orientaciones Este – Oeste / Oeste – Este.

- Túneles en zonas montañosas:

Túnel E: Orientaciones Norte – Sur / Sur – Norte.

Túnel F: Orientaciones Este – Oeste / Oeste – Este.

6.2. Mediciones y metodología

En cada uno de los túneles seleccionados se han realizado las mediciones de luminancia en el entorno de la boca de entrada de los túneles y de la zona umbral tanto en la calzada (L_{th}) como en las paredes del túnel (L_{pared}).

Las mediciones obtenidas (figura 4 de la página anterior y 5) se realizaron mediante un luminómetro endiámetro de verano y en el horario en el que los niveles de luminancia exterior son más elevados, y se presentan con regularidad. En estas circunstancias el umbral del túnel es completo y corresponde al nivel de encendido diurno o soleado.

6.3. Determinación de la luminancia en la zona umbral en los túneles seleccionados según las normativas

En este apartado se determinan los métodos de cálculo de la luminancia en la zona umbral propuestos en las tres normativas contempladas para la iluminación de túneles en el marco legal español.

En todos ellos se calcula primeramente la lu-

minancia en la zona de acceso y después mediante diferentes clasificaciones, tablas, factores o expresiones se obtiene la luminancia en la zona umbral (L_{th}).

La luminancia en la zona de acceso, dependiendo del método aplicado tendrá diferente nomenclatura: L_{20} , L_m , L_v , L_{adap} . En globalará la luminancia exterior percibida en el campo de visión principal del conductor, representado por un círculo como en el que se observa en la fotografía (figura 6). Este círculo marcado en color rojo representa la base de un cono que variará según el ángulo de visión considerado y la posición del observador.

El ángulo de visión variará en función del método aplicado y la posición del observador se situará a la distancia de parada (SD) de la boca del túnel.

Para poder distinguir cada método con claridad, se clasificarán en función de la metodología aplicada para la determinación de esta luminancia de la zona umbral, L_{th} , en función de la luminancia de la zona de acceso, como se observa en la siguiente tabla 3.

Los métodos B, C, D y G, marcados en la tabla en color verde, son los que finalmente se aplicarán y el resto, marcados en color rojo, no podrán ser aplicados por los siguientes motivos:

- Los métodos A, E y F no se considerarán ya que se aparten de valores teóricos aproximados y en este estudio se disponen de mediciones luminotécnicas obtenidas para cada túnel.
- Los métodos H y I tampoco se tomarán en consideración al ser necesarios demasiados datos experimentales para ser obtenidos e incorporados en la fase de proyecto de iluminación de un túnel. En concreto el método I también recomienda un cálculo con valores aproximados, pero no se contemplará ya que se disponen de mediciones luminotécnicas. Considerando los motivos anteriormente descritos, finalmente se aplicarán cuatro métodos que servirán para calcular las diferentes luminancias en la zona umbral:
 - Método B: Método L_{20} método exacto. Norma: Dirección General de Carreteras. (1999). Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Ministerio de Fomento, Madrid.
 - Método C: Método de contraste percibido. Norma: Publicación CIE 88:2004.

Norma	Cálculo L_{th}	Método
Dirección General de Carreteras. (1999)	$L_{th} = L_{20}$ aproximada + clasificación de túnel	A
Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Ministerio de Fomento, Madrid.	$L_{th} = L_{20}$ medida + clasificación de túnel	B
Publicación CIE 88: 2004. Guía para el alumbrado de túneles de carreteras y pasos inferiores	$L_{th} = L_m$ + gráfico Holladay-Stiles	C
	$L_{th} = L_{20}$ medida + factor k (función velocidad)	D
UNE - CR - 14380: 2007 IN. Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de túneles	$L_{th} = L_{20}$ aproximada + factor k (función velocidad)	E
	$L_{th} = L_{20}$ medida + factor k (función velocidad)	D
	$L_{th} = L_{20}$ aproximada + ponderación de tráfico	F
	$L_{th} = L_{20}$ medida + ponderación de tráfico	G
	$L_{th} = L_v$ + contrastes	H
	$L_{th} = L_{adap}$ + algoritmo informático	I



Figura 8. Cono visión 20° a escala de la boca de entrada Este del túnel de B

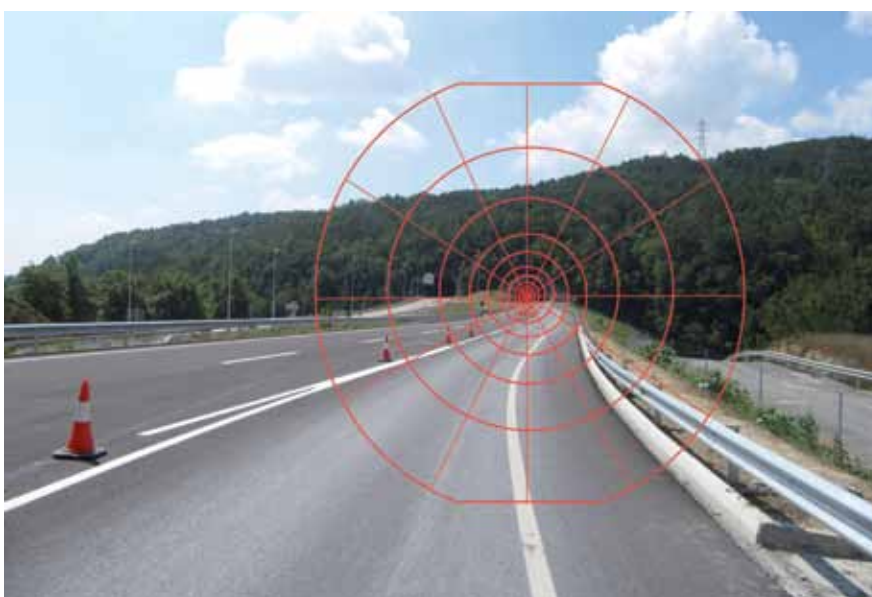


Figura 9. Fotografía con diagrama Holliday - Stiles a escala de la boca de entrada Norte del túnel E

Tabla 4. Resultados cálculos luminancia de acceso y luminancia en la zona umbral

Túnel	Bocas de entrada	Método	Resultados cálculos luminancias en zona de acceso		Resultados determinación luminancia zona umbral Lth (cd/m²)
			L20 (métodos B,D y G)	Lm (método C)	
A	Norte	B	3073	487	123
		C			339
		D			184
		G			154
	Sur	B	1903	415	76
		C			299
		D			114
		G			95
B	Este	B	2098	422	84
		C			294
		D			126
		G			105
	Oeste	B	2256	470	68
		C			334
		D			113
		G			90
C	Norte	B	1918	418	48
		C			291
		D			96
		G			77
	Sur	B	2726	425	68
		C			296
		D			136
		G			109
D	Este	B	1852	419	56
		C			283
		D			93
		G			74
	Oeste	B	2136	409	64
		C			285
		D			107
		G			85
E	Norte	B	2439	463	110
		C			323
		D			195
		G			123
	Sur	B	2224	444	89
		C			309
		D			178
		G			111
F	Este	B	2564	447	103
		C			287
		D			154
		G			128
	Oeste	B	2736	490	109
		C			342
		D			164
		G			137

Guíaparaelalumbradodetúnelesde carreteras y pasos inferiores.

- MétodoD:MétodoL₂₀.Normas:PublicaciónCIE88:2004.Guíaparaelalumbradodetúnelesdecarreterasy pasos inferiores./UNE-CR-14380:2007IN. Aplicacionesdeiluminación.Alumbrado de túneles.
- MétodoG:MétodoL₂₀ponderadocon eltráfico:métodoexacto.Norma:UNE -CR-14380:2007IN.Aplicacionesde iluminación.Alumbrado de túneles. Encadabocadeentrada decadauno delostúnelesseleccionadossehandesarrollado los cálculos para cada método.

6.4. Análisis de visibilidad en la zona de entrada de los túneles seleccionados

Para llevar a cabo el análisis de visibilidad se valoran las sensaciones de visibilidad que se han obtenido apartir de pruebas de conducción en las instalaciones existentes de los túneles seleccionados. Estetrabajoexperimental se completa con la toma de imágenes fotográficas y vídeos de los seis túneles para la presentación de los datos y conclusiones.

Estas pruebas se han realizado en un vehículo tipo turismo, circulando a la velocidad máxima permitida en la carretera de acceso al túnel, en un día soleado y empleando conductores y ocupantes del vehículo de edad joven y edad adulta, entre 25 y 60 años.

En función de la sensación de visibilidad obtenida por los diferentes conductores utilizados en el estudio se ha distinguido entre condición de iluminación excesiva, iluminación suficiente, iluminación ligeramente insuficiente e iluminación deficiente (tabla 5).

- Iluminación excesiva se entiende como aquella que los conductores aprecian la iluminación de maneras sobredimensionada y que en comparación con otros túneles podría ser reducida significativamente.
- Iluminación suficiente sería aquella en la que la percepción es buena y que no necesita ser aumentada.
- Iluminación ligeramente insuficiente es aquella en la que la percepción no es del todo satisfactoria pero que al acercarse más al portal del túnel se hace suficiente.

te, pero siempre a una distancia inferior a la de parada.

- Iluminación deficiente es aquella en la que la visibilidad interior del túnel sólo se presenta al haber accedido al mismo, y es considerada peligrosa para la conducción porque se pierde visibilidad durante todo el período de tiempo que en el que se recorre la distancia de parada desde el exterior al portal del túnel.

6.5. Selección del método de cálculo de la luminancia en la zona umbral

Los resultados de los cálculos de la luminancia necesaria en la zona umbral (L_{th}) según los diferentes métodos, así como la luminancia medida en la zona umbral ($L_{th}/medida$) de cada uno de los túneles estudiados, se han evaluado respecto a la visibilidad del conductor observada en la entrada de cada uno de ellos. Se ha dado mayor puntuación al que cumple de manera más adecuada con las necesidades reales de iluminación del túnel (véase tabla 6 de la página siguiente).

Para determinar cuál es el método más adecuado se han sumado las puntuaciones asignadas a cada método para cada boca de entrada. Los resultados son los que se reflejan en la tabla 7.

Tabla 5. Clasificación de la iluminación existente en las bocas de entrada de los túneles según las sensaciones de visibilidad

Túnel	Bocas de entrada	Visibilidad conductor en instalación existente
A	Norte	Iluminación ligeramente insuficiente
	Sur	Iluminación ligeramente insuficiente
B	Este	Iluminación ligeramente insuficiente
	Oeste	Iluminación suficiente
C	Norte	Iluminación suficiente
	Sur	Iluminación ligeramente insuficiente
D	Este	Iluminación excesiva
	Oeste	Iluminación excesiva
E	Norte	Iluminación suficiente
	Sur	Iluminación ligeramente insuficiente
F	Este	Iluminación deficiente
	Oeste	Iluminación deficiente

Tabla 7. Resultados puntuaciones métodos para cada boca de entrada

Método	Suma puntuaciones $L_{th} - L_{th}/medida - Visibilidad$
B	25
C	19
D	35
G	41

Los métodos D y G son los que obtienen mayores puntuaciones y, portanto, deben ser considerados de aplicación preferente. Ambos métodos se aproximan suficientemente a las necesidades de iluminación de estos túneles, garantizando una suficiente

visibilidad y la adopción de un diseño de iluminación que producirá un coste ajustado de la instalación y un consumo energético adecuado.

No obstante, revisando las tablas anteriores, es el método D el que siempre propone niveles de iluminación superiores al método G en la zona umbral, y portanto mayor potencia instalada. De esta manera se puede afirmar que el método G, que es el método de L20 ponderado con el tráfico recomendado en la UNE-CR143801N:2007, es el más adecuado para el cálculo de la luminancia en la zona umbral. Además resulta ser el que mejor puntuación ha obtenido.

7. Criterio propuesto para la iluminación de túneles

Teniendo en cuenta la información y documentación teórica y experimental recogida en este estudio, se ha desarrollado una propuesta armonizada para la iluminación de un túnel.

En los puntos en los que las normativas analizadas coinciden no presentan grandes diferencias, se toma un criterio unificado; y si las normativas presentan disparidad, se escogen las propuestas que se han determinado en el anterior análisis técnico de casos reales (véase tabla 8).

En cuanto a la determinación de la aplicación de una norma u otra en cada uno de los puntos anteriores donde existían diferencias se hacen las siguientes consideraciones:

- Se considera que la distinción entre túneles debe ser entre túneles largos, túneles ópticamente largos y túneles



Figura 10. Captura vídeo durante prueba visibilidad túnel B.

Tabla 6. Tabla de puntuaciones de los métodos de cálculo de la luminancia en la zona umbral de las bocas de entrada de los túneles								
Túnel	Bocas de entrada	Método	Resultados cálculos luminancias en zona de acceso		Resultados determinación luminancia zona umbral L_{th}	Resultados mediciones luminotécnicas luminancia zona umbral L_{th} /medida (cd/m²)	Visibilidad conductor en instalación existente	Puntuación L_{th} - L_{th} /medida-Visibilidad
			L_{20} (métodos B,D y G)	L_m (método C)				
A	Norte	B	3073	487	123	80	Iluminación ligeramente insuficiente	4
		C			339			1
		D			184			2
		G			154			3
	Sur	B	1903	415	76	80	Iluminación ligeramente insuficiente	1
		C			299			2
		D			114			3
		G			95			4
B	Este	B	2098	422	84	80	Iluminación ligeramente insuficiente	2
		C			294			1
		D			126			3
		G			105			4
	Oeste	B	2256	470	68	50	Iluminación suficiente	4
		C			334			1
		D			113			2
		G			90			3
C	Norte	B	1918	418	48	80	Iluminación suficiente	1
		C			291			2
		D			96			4
		G			77			3
	Sur	B	2726	425	68	100	Iluminación ligeramente insuficiente	1
		C			296			2
		D			136			4
		G			109			3
D	Este	B	1852	419	56	160	Iluminación excesiva	2
		C			283			1
		D			93			3
		G			74			4
	Oeste	B	2136	409	64	120	Iluminación excesiva	4
		C			285			1
		D			107			2
		G			85			3
E	Norte	B	2439	463	110	180	Iluminación suficiente	1
		C			323			3
		D			195			4
		G			123			2
	Sur	B	2224	444	89	80	Iluminación ligeramente insuficiente	3
		C			309			1
		D			178			2
		G			111			4
F	Este	B	2564	447	103	75	Iluminación deficiente	1
		C			287			2
		D			154			3
		G			128			4
	Oeste	B	2736	490	109	75	Iluminación deficiente	1
		C			342			2
		D			164			3
		G			137			4

- cortos como se establece en la norma CIE 88: 2004.
- Se establece que la clasificación de túneles más adecuada según el alumbrado diurno no es necesario (sin alumbrado diurno o 50% del nivel normal en zona umbral, o nivel de alumbrado normal en zona umbral) es la que propone la Publicación CIE 88: 2004. No obstante se proponen valores concretos para distinguir entre tráfico denso y tráfico ligero, y también valores orientativos y ejemplos para poder clasificar la reflectancia de las paredes. En definitiva, la clasificación es orientativa, cada caso es particular.
 - El método $L_{20 \text{ ponderado}}$ con el tráfico no define valores de k (porcentaje de luminancia en la zona de acceso propuesta para la zona umbral) para los túneles de tráfico bajo cuando el tipo de tráfico es motorizado. Por tanto, para estos túneles se establece el mismo valor de k que el correspondiente a túneles de tráfico bajo y mixto.
 - En este estudio se comprueba que el cálculo de la distancia de parada o distancia de seguridad se realiza de la misma manera en todas las normativas de iluminación de túneles. Asimismo se consideran apropiadas las propuestas de estas normativas sobre el valor del tiempo de reacción y los coeficientes de fricción según los diagramas. Sin embargo, para mayor precisión se incorporan valores numéricos en tablas para los coeficientes de rozamiento en pavimento húmedo.
 - Para el alumbrado nocturno se considera que la luminancia media debería ser un 50% superior al nivel de iluminación recomendado para la carretera de acceso al túnel, aun en el caso de que esta no estuviera iluminada.
 - La luminancia en la zona interior se determinará de acuerdo con los criterios del método $L_{20 \text{ ponderado}}$ con el tráfico de la UNE-CR 14380: 2007 IN.
 - La variación de la iluminación interior del túnel se realizará en función de la variación de la luz natural por cambios meteorológicos; se ha señalado de manera orientativa el número mínimo de reducciones de alumbrado que se deberían alcanzar y los niveles de

Tabla 8. Propuesta de criterio

	Propuesta de criterio	
Definición del problema	Diferencia entre la conducción diurna y nocturna, visibilidad interior y exterior y seguridad.	
Definición de la calidad de alumbrado de un túnel	Luminancias, uniformidades, deslumbramiento, efecto flicker o parpadeo y guía visual.	
Criterio de iluminación	Criterio de luminancias.	
Distinción entre túneles cortos y largos	Túneles cortos, túneles geoméricamente largos y túneles ópticamente largos. CIE 88: 2004.	
Clasificación de túneles según el alumbrado necesario durante el día	Diagrama según CIE 88: 2004 con nuevos valores orientativos de reflectancia en las paredes y densidad de tráfico.	
Distancia de seguridad o distancia parada. (DS / SD)	Expresión según CIE 88: 2004 / UNE - CR 14380: 2007 IN con nueva tabla de coeficientes de rozamiento.	
Punto de referencia. (Observador)	Método $L_{20 \text{ ponderado}}$ con el tráfico. UNE - CR 14380: 2007 IN	
Necesidad de alumbrado diurno	Diagrama según CIE 88: 2004.	
Necesidad de alumbrado nocturno	50% superior a la luminancia de la carretera de acceso al túnel. UNE - EN - 13201: 2005 y el RD 1890/2008.	
Iluminación de túneles largos	Método $L_{20 \text{ ponderado}}$ con el tráfico. UNE - CR 14380: 2007 IN. Se toman nuevos valores de k ($L_{th} = k \cdot L_{20}$) para túneles de tráfico bajo y tipo de tráfico motorizado.	
Iluminación de túneles cortos	Sin alumbrado diurno o 50% del nivel de alumbrado normal en la zona umbral. CIE 88: 2004.	
Iluminación en las paredes	60% luminancia en calzada. Hasta 2 m de altura	
Uniformidad de la luminancia	$U_{med} = 0,40$; $U_{long} = 0,60$.	
Variación de la luz natural	Soleado, nublado, crepuscular, nocturno y nocturno reducido.	
Sistemas de alumbrado	Simétrico, contraflujo y luz natural.	
Alumbrado exterior al acceso y la salida del túnel	Longitud = 2 · SD; $L_{carretera} = 1/3 L_{túnel}$	
Alumbrado de emergencia	Alumbrado emergencia por interrupción suministro eléctrico	$E_m = 10 \text{ lux}$ $E_{mín} = 2 \text{ lux}$
	Alumbrado de guía emergencia en caso de incendio	$E_m = 5 \text{ lux}$ $E_{mín} = 1 \text{ lux}$
Control del alumbrado	Luminancímetro sobre la boca del túnel.	
Limitación del deslumbramiento	<15%	
Restricción del efecto parpadeo o flicker	Cambios periódicos de la luminancia	
Mantenimiento	Factor de mantenimiento calzada: FM = 0,70. Cálculo del factor según RD 1890/2008.	
	Factor de mantenimiento paredes: FM = 0,70 · 0,70 = 0,49	
	La limpieza paredes y luminarias	
	El ciclo de recambio de las lámparas	



Zona	Luminancia (cd/m ²)
Cielo	6610
Edificios izquierda	1134
Edificios derecha	672
Árboles	1738
Margen superior	412
Margen derecho	119
Interior	59
Calzada	3521
Margen izquierdo	1263

Figura 11. Mediciones luminotécnicas y cono visión 20° a escala en boca entrada Oeste del túnel D

iluminación correspondientes, aun no existiendo propuesta alguna concreta en las normas contempladas.

- Se ha determinado el nivel de luminancia media más adecuada de las paredes según la superficie de la calzada de la zona del túnel en cuestión, coincidiendo con la propuesta de la CIE 88:2004, y que equivale al 60% de la luminancia en la calzada.
- En el alumbrado de emergencia por interrupción del suministro eléctrico se han tomado las recomendaciones realizadas en las normas CIE 88:2004 y UNE-CR 14380: 2007 IN, ya que son coincidentes.

Como consecuencia de la consulta de diferentes normativas de emergencia de evacuación en caso de incendio se ha determinado un valor medio y un valor mínimo, tomando como referencia las normas UNE-EN-1838:1999, Real Decreto 635/2006, ITC-BT-28 del REBT y NBE - CPI /96.

Las recomendaciones sobre el mantenimiento de la instalación de alumbrado en las normativas no muestran grandes diferencias, de manera que se toma un criterio unificado de todas ellas. Sin embargo, no se especifica el cálculo del factor de mantenimiento, el cual se ha considerado que deberá realizarse de acuerdo con el Real Decreto 1890/2008.

8. Propuestas de mejora de la iluminación de un túnel seleccionado

El objetivo de este apartado es poner en práctica el criterio propuesto, evaluar los costes y comparar los resultados obtenidos con la instalación actual. Para ello se ha escogido uno de los túneles analizados, el túnel D, donde el alumbrado resultó excesivo según la percepción de los conductores. Se hace constar que actualmente este túnel no está en funcionamiento con su alumbrado al 100%, ya que el propietario de la instalación ha constatado que su alumbrado es excesivo dadas las actuales condiciones de circulación y tráfico.

8.1. Características del túnel seleccionado

- Longitud = 350 m.
- Velocidad máxima del tráfico = 50 km/h.
- Sección tipo: Calzada de 9,6 m y arcén derecho de anchura variable.
- Pavimento asfáltico R3 Q0 = 0,07.
- Altura en eje = 6 m.
- IMD (Intensidad Media Diaria) = 84000 veh/día = 5250 veh/h por carril.
- Vehículos pesados: <15%.
- Tráfico unidireccional.
- Sistema de alumbrado simétrico.

- Número de tubos: 2.
- Número de carriles por tubo: 2.
- Trazado: curvo
- Orientación Este - Oeste.
- Distancia de parada: SD = 37,81 m

8.2. Definición de parámetros luminotécnicos

8.2.1. Luminancia en la zona de acceso

La luminancia en la zona de acceso se calcula tomando mediciones in situ de las luminancias de las distintas zonas en el campo de visión sacando la media ponderada para un ángulo de 20° en el plano de la zona de acceso.

Finalmente, se podrá calcular la luminancia en la zona de acceso teniendo en cuenta los porcentajes de cada zona según el círculo en rojo marcado en la fotografía (figura 11) para cada boca de entrada.

- Boca de entrada Este: $L_{20} = 1852 \text{ cd/m}^2$
- Boca de entrada Oeste: $L_{20} = 2136 \text{ cd/m}^2$

8.2.2. Determinación de la clase de túnel

Apartir de los datos de tráfico se obtiene la clase de túnel:

8.2.3. Determinación de la luminancia del tramo umbral

La luminancia en la zona umbral se ha obtenido como el porcentaje de la luminancia en la zona de acceso definido por el factor k ($L_{th} = k \times L_{20}$). El factor k será el

Tabla 9. Densidad de tráfico		
Densidad del tráfico	Tráfico unidireccional (Vehículos/hora-carril)	Tráfico bidireccional (Vehículos/hora-carril)
Alta	> 1500	> 400
Media	500 – 1500	100 – 400
Baja	< 500	< 100

resultado de entrar en la siguiente tabla con la clase de túnel obtenida (2) y la velocidad de diseño del túnel (50 km/h correspondiente a una distancia de parada de 60 m) para cada sistema de alumbrado. En realidad, el cálculo de la distancia de parada resulta un valor inferior a 38 m, pero el valor mínimo considerado en esta tabla es 60 m.

El factor resultante será el siguiente: $k = 40 \%$

Finalmente se obtienen las luminancias en la zona umbral:

Boca Este: $L_{th} = k \times L_{20} = 0,04 \cdot 1852 = 74 \text{ cd/m}^2$.

Boca Oeste: $L_{th} = k \times L_{20} = 0,04 \cdot 2136 = 85 \text{ cd/m}^2$.

8.2.4. Determinación de la luminancia de los tramos de adaptación y su longitud

El tramo de Entrada o Umbral tendrá una longitud con nivel constante de luminancia equivalente a la Distancia de Parada, 60 m. A partir de este tramo Umbral el nivel de luminancia irá decreciendo hasta la zona interior central del túnel mediante varios tramos, cuya longitud y nivel de luminancia estarán interrelacionados y dependientes de la curva de adaptación.

Para esta clase de túnel 2, se establece que el nivel de luminancia media en el tramo Interior Central debe ser al menos de 2 cd/m^2 . Por otra parte, el alumbrado nocturno se establece en 3 cd/m^2 , valor superior al que tienen las vías exteriores en las que se accede al mismo.

8.3. Costes y comparación con la instalación existente

Los costes de la propuesta se evaluarán en función del coste de instalación aproximado

Tabla 11. Valores recomendados $k = L_{th}/L_{20}$ para diferentes valores de SD y clases de túnel			
Distancia de parada SD (m)	60	100	160
Clase de túnel			
3	0,05	0,06	0,10
2	0,04	0,05	0,07
1	0,03	0,04	0,05

Tabla 10. Clases de alumbrado de túneles					
Intensidad del tráfico	Alta		Media		Baja
Tipo de tráfico	Mixto	Motorizado	Mixto	Motorizado	-----
Clase de túnel	3	2	2	1	1

do y del coste energético del consumo de energía eléctrica de la instalación. Este coste energético supondrá a su vez el coste económico del consumo de energía eléctrica y el coste medio ambiental por las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera al generar esta energía.

9. Aplicación de la tecnología LED y la telegestión al alumbrado de túneles

Las propuestas de mejora para conseguir un ahorro energético no deben estar fundamentadas únicamente en el desarrollo de luminarias y lámparas más eficaces, sino también en las nuevas tecnologías.

Las lámparas de vapor de sodio de alta presión suelen ser las utilizadas en este tipo de instalaciones para el alumbrado general, aunque también las lámparas fluorescentes. Estas últimas también suelen utilizarse en el alumbrado para evacuación en caso de incendio. La sustitución de las lámparas convencionales por módulos de LEDs (diodos emisores de luz), que consumen menos energía y tienen una mayor vida útil, es una buena propuesta de mejora. Sin embargo, la tecnología LED presenta algunos inconvenientes como el impacto térmico, la aficción de la humedad, la sensibilidad a tensiones y descargas eléctricas y la eleva-

da en inversión inicial. Todos estos parámetros hacen que para la iluminación de túneles, la tecnología LED sea viable tan sólo si no se requieren altos niveles de iluminación ni elevadas alturas de instalación.

La viabilidad de la tecnología LED en el alumbrado general será apropiada para túneles que poseen bajas velocidades y donde la instalación de los proyectores es baja como pueden ser los túneles urbanos o algunos de alta montaña. Sin embargo, estas opciones serían válidas cuando se pretende iluminar el túnel completamente con LEDs, pero también existe la combinación entre luminarias con tecnología LED y lámparas convencionales. El alumbrado nocturno de un túnel no requiere elevados niveles de iluminación y además permanece encendido las 24 horas del día; esta situación hace ideal una propuesta con luminarias de LEDs para este alumbrado teniendo en cuenta la elevada vida útil de esta tecnología. Asimismo, el refuerzo del alumbrado diurno se realizaría con lámparas de vapor de sodio de alta presión por los elevados niveles de iluminación requeridos.

Otro elemento de mejora que sería una muy buena aplicación en el alumbrado de las instalaciones de un túnel es la telegestión. Esta tecnología permite reducir consumos innecesarios mediante una gestión remota, de manera que regula los sistemas de encendido y apagado de las luminarias,

Tabla 12. Costes y comparación con la instalación actual			
Costes	Instalación actual	Propuesta	Ahorros de potencia, energéticos y económicos y beneficios ambientales
Potencia	183 640 W	84 990 W	98 650 W
Costes energéticos	500 089 kW-h/año	232 731 kW-h/año	267 358 kW-h/año
Costes económicos	Coste consumo energía eléctrica (0,09 €/kW-h)	45 008 €/año	20 946 €/año
	Costes instalación (632 €/ud)	419 648 €	343 808 €
Costes Medio Ambientales	Emisiones CO ₂ (0,233 kg/kW-h)	117 t/año	54 t/año
	Emisiones SO ₂ (0,383 g/kW-h)	192 kg/año	89 kg/año
	Emisiones NOx (0,313 g/kW-h)	157 kg/año	3 kg/año



Figura 12. Luminaria de tecnología led para túneles

controlar los horarios de los mismos y regula el flujo luminoso en función de la ocupación y actividad desarrollada en cada momento.

La combinación de la tecnología led con la telegestión podría incluso garantizar el encendido instantáneo al paso de los vehículos y la regulación del flujo luminoso según la luminosidad exterior y los requerimientos visuales del conductor dándole lugar a notables ahorros energéticos.

10. Conclusiones

En este estudio de las diferentes normativas aplicables al alumbrado de túneles y de su contraste en situaciones reales, se concluye que no hay una normativa que sea idónea para todos los casos y que cada una propone soluciones luminotécnicas dispares. En consecuencia, la aplicación de todas ellas en cada caso nos aporta una mejor solución para el proyecto de alumbrado.

Se ha constatado que las normativas difieren en sus métodos para la determinación de los parámetros mediante los cuales se diseña el alumbrado necesario en un túnel. Alguno de estos parámetros, como la determinación de la luminancia de la zona de acceso o su equivalencia en la Zona Umbral del túnel, L_{th} , o incluso la clasificación de un túnel en base a su visibilidad, hacen que la propuesta luminotécnica pueda presentar un diseño excesivo o insuficiente.

Apartir del trabajo experimental en seis túneles, entre los métodos de cálculo de la luminancia necesaria en zona umbral propuestos en las normas, se determina que el método más idóneo es el método L_{20} ponderado con el tráfico de la norma UNE-CR 14380: 2007 IN.

En cada apartado de todas las normas

se ha podido extraer una propuesta armonizada que es la que mejor se adapta a cualquier circunstancia de proyecto de alumbrado de un túnel.

Por último, cabe destacar que en la instalación del túnel analizado, después de tomar las consideraciones descritas para el nuevo diseño de su alumbrado, se ha constatado que la diferenciación de diseño aporta importantes ahorros energéticos, económicos y medioambientales.

11. Bibliografía

Dirección General de Carreteras. (1999). Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles. Ministerio de Fomento, Madrid.

Publicación CIE 88:2004. Guía para el alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores.

UNE-CR 14380:2007 IN. Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de túneles.

UNE-EN 1838: 1999. Iluminación. Alumbrado de emergencia.

UNE-EN 60598-1: 2001. Luminarias. Parte 1: Requisitos generales y ensayos.

UNE-EN 50102 CORR: 2002. Grados de protección proporcionados por las envolventes de materiales eléctricos contra los impactos mecánicos externos (código IK).

UNE-EN 60662: 1996. Lámparas de vapor de sodio de alta presión.

EN 61167: 1995. Specification for metal halide lamps.

Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.

Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en ins-

talaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07.

Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.

Orden, de 27 de diciembre de 1999, del Ministerio de Fomento, por la que se aprueba la Norma 3.1-ICTrazado, de la Instrucción de Carreteras.

Norma Básica de Edificación NBE – CPI/96 – Condiciones de protección contra incendios de edificios.

Circular 3/05 de la Dirección General de Carreteras de la Generalitat de Catalunya sobre les especificacions tècniques per l'equipament de túnels d'obres de carretera.

Fanlo Montes, J. M. Estudio de las necesidades de iluminación de un túnel, análisis de la normativa y su contraste en situaciones reales. (2010) Proyecto Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Terrassa. Universidad Politécnica de Cataluña.

Ramírez Vázquez, J.; Buigas Sans, C.; Munilla Morales, I. (1990) Luminotecnia. Enciclopedia CEAC de la Electricidad. Ediciones CEAC, S. A., Barcelona.

Sañé Badals, J. (2005) Apuntes Cursos de Luminotecnia.

García Fernández, J.; Boix Aragonès, O. (2004). Luminotecnia. Iluminación de interiores y exteriores. [En línea]. Disponible en: <http://edison.upc.edu/curs/llum>.

San Martín Páramo, R. (2003). Manual de Luminotecnia. OSRAM

Ramírez Vázquez, José; Buigas Sans, C.; Munilla Morales, I. (1990) Luminotecnia. Enciclopedia CEAC de la Electricidad. Ediciones CEAC, S. A., Barcelona.

Cavaller Galí, F. (2009). Alumbrado del Túnel de Lesseps en Barcelona. Revista Luces Comité Español de Iluminación.

UPC (1988) - Apuntes Cursos de Luminotecnia de Postgrado.

Keitz, h.a.e. (1974) Cálculos y medidas luminotécnicas. Editorial Paraninfo.

C. & G. Carandini, S.A. Proyecto de alumbrado del Túnel de Pont Plà en Andorra. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. [En línea]. Disponible en: <http://www.marm.es/>

Observatorio de Electricidad de Adena WWF. [En línea]. Disponible en: <http://www.wwf.es/> ❖