

Tendencias en el alumbrado de túneles de carretera



Trends in Road Tunnels Lighting

Juan Manuel Sanz Sacristán

*Jefe de la Sección de Instalaciones
del Transporte de Euroestudios S.L.;
Secretario del Comité de Túneles de la ATC*

Resumen

Se repasan los distintos parámetros y factores que afectan al alumbrado de los túneles, así como las importantes evoluciones tecnológicas y cambios que han experimentado y que las normas de aplicación no han recogido todavía.

Se plantean diversas reflexiones sobre el estado actual de la iluminación de los túneles, así como sobre las posibles mejoras y tendencias del mercado; y se analiza cuál puede ser el futuro para optimizar los niveles de iluminación, garantizando la seguridad de la circulación y minimizando los consumos de energía. Todo ello repercutirá en un menor coste de explotación y en la obtención de túneles más seguros y sostenibles.

PALABRAS CLAVES: iluminación, alumbrado, túnel, sostenibilidad, seguridad.

Abstract

Different parameters and factors affecting tunnel lighting, as well as significant technological developments and main changes, are reviewed. The rules have not yet integrated some of these factors.

Reflections on the current state of tunnel lighting as well as possible improvements and market trends are raised and discussed. This will allow in the future to optimize light levels, ensure traffic safety and minimize energy consumption. All this will entail lower operating costs and ensure more secure and sustainable tunnels.

KEY WORDS: Illumination, lighting, tunnel, sustainability, safety.

1. Introducción

En los últimos años, marcados por la crisis económica, se ha ido reduciendo el alumbrado de los túneles sin que ello haya supuesto un incremento de la siniestralidad apreciable. Además, existen distintas normativas de aplicación para establecer los niveles de alumbrado necesarios en un túnel, estableciendo cada una de ellas valores diferentes en función de diversos parámetros que el proyectista tiene libertad para escoger (incluso alguna normativa presenta métodos distintos para establecer el nivel de alumbrado de un túnel). Si a todo esto unimos los resultados de las estadísticas que indican que en los túneles en España la accidentalidad, expresada tanto en número de accidentes como de víctimas por vehículo y kilómetro recorrido, es mucho menor que en las carreteras a cielo abierto de similares características, y los importantes avances tecnológicos que se están produciendo en el equipamiento de los túneles, podemos concluir que es necesario un análisis en profundidad que permita la optimización del alumbrado de los túneles, teniendo en cuenta todos los factores que confluyen sobre él (niveles de iluminación en bocas e interior, curvas de transición desde el exterior al interior, sistemas de regulación, tecnología y disposición de luminarias, sistemas de regulación,...).

Todo lo anterior invita a la reflexión y revisión de los distintos aspectos que intervienen en la iluminación de los túneles, analizando los diversos factores directamente implicados y tratando de vislumbrar el futuro próximo en esta materia. Además, conviene revisar o poner en duda algunos de las premisas que se emplean en el diseño de la iluminación de los túneles y que se consideran "verdades absolutas", las cuales pueden haber quedado desfasadas con los avances tecnológicos y con el paso del tiempo.

2. Factores y parámetros que influyen en la iluminación de un túnel

Las normas establecen que el diseño del alumbrado de un túnel debe realizarse de forma que el conductor perciba un adecuado nivel lumínico de los distintos objetos y partes situados en el interior del túnel, acorde con su velocidad de circulación, condiciones del tráfico, configuración del túnel y niveles lumínicos exteriores. Por tanto, podemos separar por un lado los factores que afectan al nivel de iluminación que debe tener un túnel, de aquellos parámetros que influyen sobre la cantidad de luz que llega hasta el conductor.

Entre los factores primeros, que establecen el nivel de iluminación necesario en un túnel, podemos destacar las condiciones lumínicas en la entrada y salida, la velocidad

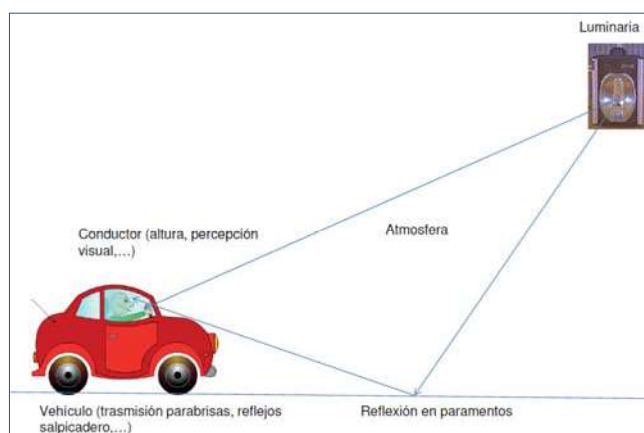


Figura 1. Parámetros que influyen en el nivel de iluminación percibido por un conductor

de circulación, el tanto por ciento de vehículos pesados, si el tráfico es unidireccional o bidireccional, la distancia de seguridad a la que se debe percibir un obstáculo para el que el conductor pueda frenar su vehículo, y cualquier otra circunstancia que pueda entrañar un riesgo adicional a la circulación (como puede ser la presencia de peatones o ciclistas). Entre los parámetros que influyen en el nivel percibido por un conductor se encuentran la geometría del túnel, las luminarias instaladas, el material y estado del pavimento y de los hastiales, la atmosfera del túnel, el vehículo y el conductor.

Los niveles de iluminación percibidos desde el puesto del conductor de un determinado punto se denominan luminancia; su unidad de medida es la candela por metro cuadrado (Cd/m^2), y se corresponden con la cantidad de luz reflejada por una superficie en una determinada dirección. Este concepto difiere de la iluminación (cuya unidad es el lux) o cantidad de luz que llega a un determinado objeto. Todas las normas de iluminación de túneles establecen los niveles necesarios en luminancias.

En la siguiente figura se ilustran los distintos parámetros que influyen en los niveles de iluminación percibidos por un conductor (luminancia).

3. Evolución de los parámetros que influyen en la luminancia de un túnel

Los distintos parámetros que influyen en la iluminación de un túnel han sufrido importantes evoluciones y cambios, sin que las normas de aplicación se hayan adaptado a la misma velocidad. Repasemos las principales variaciones que han experimentado estos parámetros en los últimos años.

3.1 Luminarias

Las luminarias han experimentado importantes desarrollos en los últimos años, produciéndose un continuo in-

cremento en los lúmenes emitidos por cada vatio eléctrico consumido, aunque todavía lejos de los límites teóricos de 683 lm/W. Además se dispone de gran variedad de luminarias que permiten optimizar, mediante el empleo de programas de cálculo tridimensionales, la transmisión de la luz a las zonas de interés del túnel (calzada y paramentos hasta 2 metros de altura).

En la siguiente tabla se recogen valores orientativos relativos a las distintas tecnologías empleadas actualmente en la fabricación de luminarias para la iluminación de túneles:

Tabla 1. Valores orientativos de las luminarias empleadas actualmente en túneles		
Tecnología	Lúmenes / vatio	Vida útil media
Vapor sodio alta presión (VSAP)	70-150 lm/W	20 000 horas
Halogenuros metálicos	36-120 lm/W	14 000 horas
Fluorescente	70-95 lm/W	10 000 horas
Led	80-120 lm/W	80 000 horas

Asimismo se han mejorado los medios y tareas de mantenimiento de los túneles que permiten mantener una elevada eficiencia y disponibilidad de la instalación a lo largo del tiempo.

3.2 Paramentos

Se ha avanzado mucho en el empleo de acabados de los hastiales claros y reflectantes, que maximicen el rebote de la luz recibida hacia la calzada, así como en la práctica cada vez más habitual de su limpieza periódica; pero todavía queda mucho por avanzar en la posibilidad de emplear pavimentos claros y con gran reflexión que maximicen los niveles de iluminación percibidos por el conductor. Sería de gran interés analizar las posibilidades de emplear pavimentos de hormigón coloreados o pavimentos de asfalto de colores claros, aunque para ello habrá que resolver la forma de disponer la señalización horizontal para que el conductor la perciba claramente y de manera homogénea al del resto de la carretera.

En la siguiente tabla se recogen valores orientativos relativos a la reflexión lumínica de diversas superficies:

Tabla 2. Valores orientativos de reflexión de distintas superficies	
Superficie	Reflexión
Asfalto oscuro	7 %
Hormigón gris	30 %
Nieve	85 %

3.3 Vehículos

Posiblemente los vehículos sean uno de los elementos industriales que más han avanzado en los últimos años. No sólo se han producido grandes avances en el diseño de los distintos elementos y en la fiabilidad de los mismos, sino que además se han ido implementando múltiples equipamientos de ayuda a la conducción y de seguridad de los ocupantes. Los aspectos más destacados en relación con la iluminación de un túnel serían: perfecta transmisión de la luz a través de los parabrisas, diseño de salpicaderos que disminuyen reflejos y efectos molestos, regulación de la posición del conductor, mejora de los faros de los vehículos y reducción de la distancia de frenado. Aspectos que se van implantando en los vehículos y que en el futuro permitirán una mayor seguridad en la circulación de los túneles son: comunicación con la carretera y con el resto de vehículos y diversas ayudas a la conducción (ABS, ESP, recordatorio al conductor de señalización, aviso de cambio de carril involuntario, detección de vehículo en ángulo muerto, ajuste de la velocidad y de la distancia de seguridad, frenado automático ante obstáculos,...).

En la siguiente figura se puede visualizar gráficamente la gran evolución que hay sufrido los turismos en los últimos años, dentro de una misma marca.



Figura 2. Arriba coche del año en España 1985, abajo coche del año en Europa 2014

No parece necesario recurrir a las fichas técnicas de ambos vehículos para comprender que su conducción a 100 km/h conlleva distintas sensaciones y niveles de seguridad muy diferentes. Es de destacar que en este último modelo la OCU (Organización de Consumidores y Usuarios) ha medido una distancia de frenado de 100 a 0 km/h de algo menos de 36 metros [1].

3.4 Atmósfera, equipamiento, mantenimiento y explotación de los túneles

Hay que destacar que la atmósfera actual de los túneles es mucho más limpia que años atrás, debido principalmente a los siguientes motivos: las emisiones de los vehículos se han ido reduciendo de manera progresiva, los túneles suelen estar dotados de adecuada ventilación, es más frecuente la limpieza de los túneles y es habitual el empleo de sensores de calidad ambiental para actuar adecuadamente en caso de que la visibilidad en el túnel se reduzca.

Aunque no es un factor que influya directamente en la iluminación de un túnel, sí se deben destacar los grandes avances que se han producido en el equipamiento y en los sistemas de control y comunicaciones de los túneles, que posibilitan la monitorización y control continuo de las condiciones de circulación y que inciden directamente en la seguridad. Actualmente es habitual y sencillo que se realice una medición continua de las condiciones de iluminación en las proximidades del túnel, que permiten ajustar en todo momento los niveles de iluminación del túnel a las condiciones de circulación y de iluminación exterior, así como monitorizar el interior del túnel y detectar automáticamente obstáculos o condiciones de circulación o de visibilidad anómalas y señalar y avisar a los conductores de dichas circunstancias para que adecuen su conducción a las mismas. En este sentido cabe destacar, salvando las distancias, los túneles ferroviarios que en condiciones normales de circulación permanecen apagados, y en los que el maquinista tiene la seguridad de que no hay ningún obstáculo en su interior. En un túnel moderno con un adecuado sistema de control, el conductor tiene la seguridad de que si hubiera alguna circunstancia especial u obstáculo en su interior se le indicaría y señalaría con antelación mediante los semáforos, paneles de mensaje variable, radio,...

En la siguiente figura se pueden percibir las condiciones de circulación al inicio de la explotación del túnel 1 de Guadarrama y del recientemente inaugurado túnel 3 del mismo tramo.

Es de destacar el importante salto cualitativo que ha supuesto en la seguridad de los túneles la Directiva Europea 2004/54 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de la red transeuropea de carreteras

[2] y sus correspondientes trasposiciones realizadas por las distintas administraciones con competencias en túneles de carreteras. Además, a raíz de los importantes incendios de finales de los 90 (principalmente Mont Blanc, Fréjus y Tauern), la Sociedad está más sensibilizada con el riesgo que implica un incendio en un túnel, dedicando mayores medios al equipamiento, mantenimiento y explotación de los túneles y respetando más estrictamente las normas de circulación en ellos mismos.

Estos cambios han incidido en el incremento de equipamiento de los túneles, en la mejora de los parámetros de diseño empleados en su construcción, en la realización de inspecciones periódicas, en la existencia de la figura del responsable de seguridad que vela por el adecuado funcionamiento, organización y seguridad de la circulación por el túnel, en el análisis y registro de los incidentes previos, en la realización de análisis de riesgos,...



Figura 3. Arriba antigua circulación bidireccional por el túnel 1 de Guadarrama, abajo túnel 3 de Guadarrama inaugurado en 2007

Actualmente es habitual la limpieza periódica de las luminarias y de los hastiales del túnel, se mide regularmente el coeficiente de rozamiento transversal del pavimento, y se limpia y repara con mayor frecuencia, etc.: factores todos ellos que repercuten positivamente en los niveles de iluminación percibidos por los conductores.

3.5 Conductores

Al haber aumentado la esperanza de vida de la población, la edad media de los conductores se ha visto incrementada en los últimos años. Según datos de la DGT (Dirección General de Tráfico) de 2013, más de 3,5 millones de conductores tienen más de 65 años, lo que representa el 13,6 % del total [3]. Este incremento de edad podría conllevar la necesidad de incrementar los niveles de iluminación o los niveles de contraste y a revisar la curva de adaptación entre los niveles elevados de las bocas de entrada y los niveles interiores.

Otro cambio importante, es el incremento de las mujeres conductoras y que, según un estudio reciente del RACC (Real Automóvil Club de Cataluña), ha pasado de un 29,4 % de mujeres conductoras en el año 1990 a un 41 % en el 2014 [4]. Según este mismo estudio las mujeres tienen menores tasas de siniestralidad que los hombres.

También sería necesario revisar la altura de conducción y que las normas fijan en 1,1 m de altura respecto al pavimento y que puede variar según se trate de un utilitario, deportivo, todo terreno, furgoneta o camión.

4. Cambios de importancia en los factores que influyen en los niveles de iluminación de un túnel

Según las distintas normativas de aplicación, los principales factores que influyen en los niveles de iluminación necesarios en el interior del túnel (tanto para la zona umbral, como para la zona interior) son los siguientes:

- Distancia de seguridad – velocidad de diseño.
- Intensidad de circulación de vehículos y del porcentaje de vehículos pesados.
- Túnel con tráfico unidireccional o bidireccional.
- Disposición de alumbrado simétrico o a contraflujo en el sentido del tráfico.
- Niveles de luminancia percibidos por el conductor a la entrada del túnel y que varía en función de la ubicación y orientación del túnel, velocidad de circulación, reflectancia del entorno, condiciones climatológicas,...
- Otros factores como son el adecuado guiado visual de los conductores en el túnel y el nivel de comodidad que se quiera dotar a la conducción, así como la posible presencia de ciclistas o peatones.

Un factor determinante en los niveles de iluminación que hay que aplicar en un túnel es el de la distancia de seguridad a la que se debe percibir un obstáculo para que el conductor pueda detener el vehículo con seguridad antes de llegar a él. Este factor depende del vehículo, la velocidad, el pavimento, la pendiente,... A pesar de las mejoras en los vehículos para reducir esta distancia (frenos, neumáticos, ABS,...) y en los pavimentos (tanto en su ejecución, como en su mantenimiento) se siguen empleando, tal y como se puede ver en la siguiente figura, las mismas distancias que en 1964 y que en la mayor parte de los túneles se encuentra actualmente en unos 175 m. [5].

La mejora en los vehículos y en el pavimento de los túneles debe permitir una reducción de esta distancia, lo que conllevaría una disminución de los refuerzos de alumbrado en las bocas de entrada. Se debería además analizar cómo modificar este valor en función del mantenimiento, equipamiento y explotación del túnel, ya que en muchos casos el posible obstáculo será detectado automáticamente por el centro de control y avisado a los conductores mediante los paneles de mensaje variable y de reducción de la velocidad.

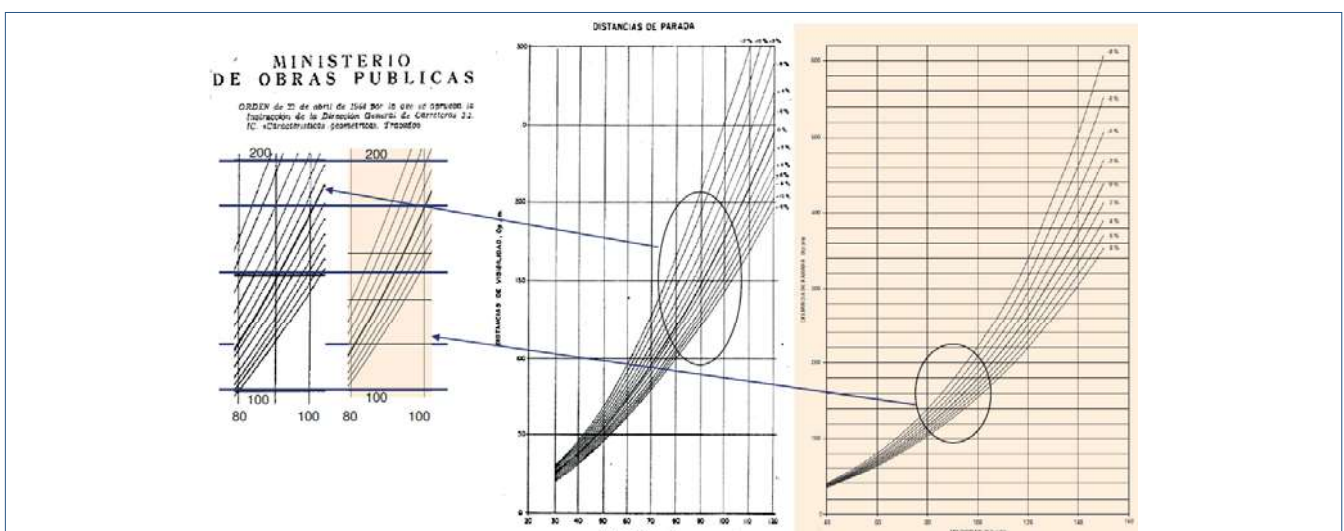


Figura 4. Coincidencia entre la curva de frenado recogida en la Instrucción de Trazado de 1964 y la de 2001

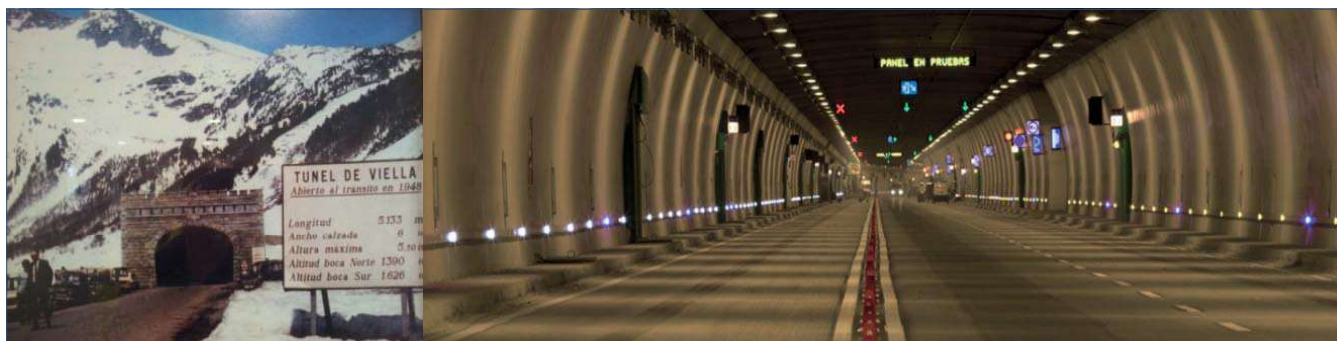


Figura 5. Foto histórica del antiguo túnel de Viella y actual túnel de Viella

Hay que destacar que el código de circulación establece como valores normales de distancia de seguridad entre vehículos o para señalar un obstáculo en la calzada distancias comprendidas entre 100 y 150 m; y que el alumbrado de cruce de un vehículo apenas alcanza los 100 m de distancia. [6]

5. Análisis de la normativa de referencia

Las normativas de referencia en el alumbrado de túneles que se han aplicado hasta ahora son normas redactadas a finales de los años 90 y que mantienen intactos muchos de los parámetros, tablas y factores de cálculo desarrollados en los años 60 y 70.

En febrero de 2015 la Dirección General de Carreteras ha aprobado las Recomendaciones para la iluminación de túneles [7], introduciendo grandes mejoras y avances, pero manteniendo gran parte de los procesos de cálculo y niveles fijados por las normas precedentes, a las que remite en distintos apartados.

Revisemos la fecha de redacción y la bibliografía a la que se remiten las normas de referencia que se siguen empleando actualmente en el alumbrado de los túneles.

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

Tal y Como indica en su prólogo e introducción, la CIE 88-2004 [8] es una revisión de algunos apartados de la versión de 1990 “cuyos principios básicos sobre los que se fundó la CIE 88-1990 son aún completamente válidos para la presente revisión”. Si se comparan las distintas versiones desde su inicio (1973), se puede observar que algunas de las gráficas y tablas de diseño empleadas apenas han variado de unas versiones a otras. La norma sigue citando como norma de referencia a la CIE 61-1984 “Iluminación a la entrada de los túneles: Una panorámica de los fundamentos para determinar la luminancia en la zona de umbral”.

5.2 UNE-CR 14390IN Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de túneles. [9]

Aunque este documento está fechado en septiembre de 2007, en su portada indica que “este informe es la ver-

sión oficial, en español, del Informe CR 14380:2003” y un poco más adelante indica que “este informe ha sido preparado por el CEN/TC 169 y ha sido aprobado por CEN el 10 de noviembre de 2001”. Si se revisa la bibliografía de este informe se observa que la mayor parte corresponde a los años 80 y 90, siendo la más moderna de 1997.

5.3 Cambios de importancia que las normas todavía no han tenido en cuenta

Tal y Como se ha comentado en los apartados anteriores, los principios básicos que se siguen aplicando en el diseño de la iluminación de los túneles de carretera se mantienen prácticamente invariables desde los años 90 y en algunos casos desde los años 60. Es por tanto evidente que muchos de los avances tecnológicos y de los cambios en este campo que se han producido no se están teniendo en consideración. En consecuencia, sería necesario estudiar detalladamente cuales de los principios siguen siendo válidos y cuales pueden optimizarse a las condiciones de diseño y explotación actuales.

A modo de resumen de lo expuesto anteriormente, los cambios que estas normas no tienen en cuenta son los siguientes:

- Mejoras en los vehículos.
- Cambios en la población conductora y en la altura del conductor.
- Mejoras en los túneles: en concreto no se considera el gran cambio que supuso en 2004 la Directiva Europea.
- Herramientas actuales de diseño de túneles.
- Avances tecnológicos en el equipamiento y control de los túneles, destacando la gran evolución de las luminarias y de los sistemas de regulación.
- Medios y procedimientos actuales de explotación y conservación.

5.4 “Verdades absolutas” que es necesario revisar

Observando todos los cambios que se han producido en los últimos años y que se han esbozado en los apartados anteriores, se plantea la necesidad de revisión de muchas de los aspectos que se emplean en el diseño del alumbrado de los túneles como si fueran verdades abso-

lutas, y que es posible sea necesario modificar para optimizar el alumbrado de los túneles, sin que ello afecte a su seguridad:

- Curva de adaptación empleada en la transición desde el umbral al interior del túnel. Debido a los importantes cambios en los vehículos y en la edad media de los conductores se debería analizar si la curva sigue siendo válida o se debe modificar.
- Revisión de los niveles de iluminación interior y de la zona umbral y de los factores de clasificación de un túnel. En general, hay estudios que analizan la accidentabilidad de una vía en función de que esté iluminada o no; pero no se dispone de estudios recientes en que analicen la influencia del nivel de iluminación. Se puede observar cómo muchos coches modernos no encienden automáticamente las luces hasta muy entrado en el túnel, y que en muchos túneles se están empleando niveles de iluminación interior de 2 a 4 veces el máximo dispuesto en una autopista a cielo abierto. Todo ello unido a la baja accidentalidad en los túneles parece aconsejar una reducción en los niveles dispuestos en el diseño del alumbrado.

Otro aspecto que se debe revisar es el de disponer el mismo nivel de iluminación de la calzada en los arcones, aceras y paramentos hasta 2 metros de altura. Entendiendo que es necesario poder percibir los posibles obstáculos o personas que se encuentren en esta zona, no parece necesario un nivel tan alto de iluminación.

5.5 Recomendaciones para la actualización de las normativas

Conviene desatacar algunos aspectos fijados por la norma y que analizados para cada caso podrían implicar un importante ahorro energético en muchos casos, sin afectar a la seguridad:

- Diferenciación entre la distancia de seguridad que se debe emplear en el diseño de una carretera y la distancia a la que un objeto debe estar suficientemente iluminado para su visualización por los conductores, además del ajuste de estas distancias a las condiciones actuales de circulación por los túneles.
- En el interior del túnel, la distancia de seguridad debería calcularse habitualmente con suelo seco.
- En la entrada de un túnel con paneles de mensaje variable y con posibilidad de modificar la velocidad máxima de circulación, se podría contemplar la distancia de seguridad con suelo seco y reducir la velocidad en caso de lluvia.
- Posibilidad de reducir los niveles de iluminación al emplear iluminación blanca con buena reproducción cromática, de manera similar a la reducción permitida para alumbrado a contraflujo.

- En túneles muy largos, permitir que se siga reduciendo la iluminación interior hasta los valores dispuestos para la noche, de manera similar a otras normas internacionales.
- Dependencia de los niveles de iluminación directamente de la velocidad máxima de circulación y no de la distancia de seguridad que sólo debería afectar a la longitud de la zona umbral.
- Otros factores indicados en los puntos anteriores, como son contemplar las posibilidades de reducción de los niveles de iluminación o de la distancia de seguridad al disponer de un centro de control y de un buen estado del pavimento,...

6. Estado actual de la iluminación e innovaciones recientes

Los cambios normativos y la sensibilización de la Sociedad con los riesgos implícitos en un túnel, han supuesto un mayor esmero a la hora de diseñar la geometría y el equipamiento de los túneles, así como una mayor dotación y mejores procedimientos para su mantenimiento y explotación. Todo esto ha venido acompañado de importantes avances tecnológicos en los distintos campos implicados (comunicaciones, vigilancia mediante CCTV, sistemas de detección automática de incendios y de incidentes, sensorización del túnel, iluminación, sistemas de control,...).

En el sistema de iluminación de un túnel los avances tecnológicos han sido importantes, no sólo con la aparición de los leds blancos, sino que todas las lámparas han mejorado su rendimiento (lúmenes / vatio) y duración. Además, se dispone de múltiples luminarias que permiten elegir la óptima para cada túnel y de adecuadas características (estanqueidad, durabilidad, resistencia,...). También han mejorado de manera importante las posibilidades de regulación de los niveles de iluminación.

Algunas mejoras que ya se están implantando actualmente en los túneles son:



Figura 6. Iluminación de refuerzo de un túnel de carretera

- Empleo de leds con un elevado rendimiento y duración.
- Empleo de luz blanca con gran reproducción cromática y confort visual.
- Regulación continua de los niveles de iluminación en el umbral y en el interior. Esta regulación es sencilla en algunos tipos de luminarias (por ejemplo en los leds), pero actualmente también se puede realizar con VSAP (entre el 40 % y el 100 %) y con los fluorescentes.
- Ajuste exacto de los niveles de iluminación en la zona de transición a la curva experimental de adaptación, sin necesidad de realizar escalones, que siempre impliquen un exceso de iluminación en esas zonas.
- Ajuste de los niveles interiores del túnel a las condiciones exteriores y de circulación de vehículos en cada momento, con la posibilidad de apagado en intervalos largos de ausencia de circulación.
- Reducción del nivel de iluminación exterior en las bocas de entrada y salida, mediante la disposición de elementos atenuadores de la luz exterior.
- Empleo de paramentos claros o reflectantes en el interior del túnel.
- Ajuste automático de la luz emitida por cada luminaria en función de su degradación, y regulación periódica externa para ajustarse al factor de mantenimiento real de la instalación.

La implantación de luminarias de leds es ya una realidad viable en los túneles y en muchos casos supone una gran mejora respecto a otras tecnologías; pero se ha limitado generalmente su aplicación a la mera sustitución de las luminarias actuales, empleando las mismas técnicas y disposición. Todavía no se ha aprovechado el gran potencial que tienen los leds y que principalmente radican en su característica de luz dirigida y que debería permitir el aprovechamiento de la mayor parte de la luz para iluminar los puntos requeridos y con el ángulo necesario. Tal y como se describe en los siguientes puntos, todavía está pendiente la revolución del alumbrado de los túneles aprovechando todo el potencial implícito en los leds.

7. Futuro de la iluminación de túneles

7.1 Tendencias actuales

Analizando el pasado y presente de la iluminación se observa que la tendencia es hacia el empleo de luminarias cada vez más eficientes y de mayor vida útil (reducen el coste de mantenimiento, aunque no eliminan la necesidad de limpieza de las luminarias) y con posibilidades de regulación continua desde el apagado total hasta los máximos niveles necesarios, que posibilita el ajuste en cada momento al nivel de iluminación necesario en el túnel. Además las mejoras en los sistemas de control de los túneles posibilitan conocer en todo momento el estado de todos los factores que afectan a la iluminación, y permitirán en el futuro rea-

lizar el cálculo y aplicar en tiempo real el nivel necesario en cada punto del túnel (variándolo en función del valor de la intensidad y velocidad de circulación, porcentaje de vehículos pesados, estado del pavimento,...).

Todavía necesitamos realizar los cálculos de iluminación con diversos proyectores hasta encontrar aquel que sea mejor para la geometría del túnel y que realmente corresponde al que menos luz proyecta hacia zonas no deseadas (techo, hastiales, zonas ya demasiado iluminadas por el resto de proyectores). Los avances tecnológicos nos van posibilitando el disponer de luminarias que proyectan la luz sólo hacia las zonas deseadas, pudiendo incluso diseñar y fabricar la luminaria idónea y particular de cada túnel. Estos avances nos permitirán en el futuro establecer uniformidades de iluminación en la calzada con valores próximos a 1, frente a los normalmente exigidos por las normas de 0,4 de uniformidad global y de 0,6 de uniformidad longitudinal.

7.2 Posible evolución futura

Pero intentemos adivinar los avances y cambios drásticos que nos depara el futuro, la posible revolución en el alumbrado de los túneles al aprovechar todo el potencial de los leds. Realmente, en el alumbrado de un túnel nos interesa el valor de las candelas por metro cuadrado que llegan desde el pavimento al conductor, empleando actualmente luminarias dispuestas en la parte superior del túnel, de cuya luz sólo una porción alcanza el pavimento, reflejándose en todas las direcciones o siendo absorbida por el pavimento, y obteniendo finalmente sólo una pequeña fracción de la luz original en dirección al conductor. Analizando estos aspectos podemos observar que las posibles mejoras se encaminarán hacia:

- Empleo de luminarias de gran eficiencia y que sitúen toda la luz emitida en la calzada.
- Posibilidad de dirigir toda la luz emitida en la dirección contraria al tráfico, ya que esta condición incrementa la reflexión en dirección al conductor. Actualmente esta actuación está muy limitada por el posible deslumbramiento del conductor; pero con la direccionalidad de los leds se podría solventar esta problemática.
- Posibilidad de emplear pavimentos claros y de alta reflectancia, como un espejo o un material claro brillante.
- ¿Y si la luminaria no la dispusiéramos en la parte alta, sino que pudiéramos disponerla en la parte baja del túnel?. Con esta actuación reduciríamos las pérdidas de rendimiento por distancia, que inevitablemente se producen al chocar la luz con partículas de la atmósfera; pero sobre todo nos permitiría situar la luminaria en el punto idóneo de reflexión hacia el conductor.
- Y realmente el paso drástico y definitivo sería que la luz estuviera dentro o detrás del pavimento, apuntando directamente hacia el conductor. Esto realmente

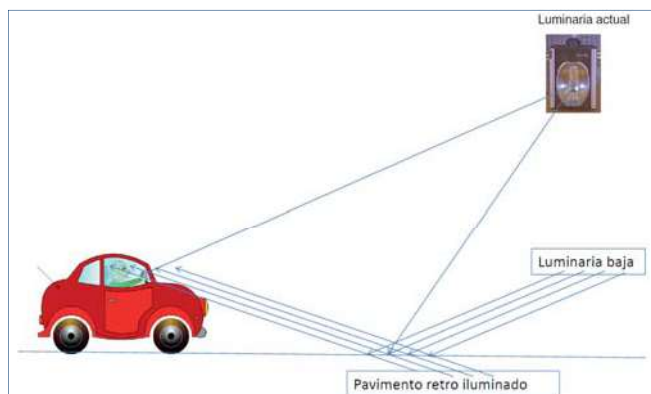


Figura 7. Posible tendencia en la disposición y distribución de las luminarias

requiere que la luminaria sea el pavimento o que el pavimento sea translúcido y la luminaria se coloque debajo. En esta circunstancia, el pavimento emitiría la luz directamente hacia el conductor, de una manera uniforme (para evitar el deslumbramiento se debe asegurar una uniformidad de niveles en el campo de visión del conductor, sin una disposición de zonas claras y otras oscuras) e incluso permitiría la variación de la señalización horizontal para adaptarla a las distintas condiciones de la vía. En esta configuración los obstáculos se percibirían oscuros sobre el fondo claro, aunque previsiblemente habría que mantener cierto alumbrado ambiente del túnel para facilitar las tareas de mantenimiento y para otras circunstancias.

- Todos estos pasos tienden a emplear una luminaria continua y no puntual, con lo que la uniformidad se aproxima a 1. Una tecnología ya desarrollada y que en el futuro podría aplicarse a los túneles son las pantallas oled y cuyas (siglas son las inglesas de diodo orgánico de emisión de luz), aunque todavía no presentan rendimientos tan elevados como los leds.

A continuación se puede observar la posible tendencia del alumbrado futuro, siendo el tiempo el que dilucidará la evolución final:

Para ayudar en la asimilación de esta posible evolución drástica en el alumbrado de un túnel, se recogen a conti-

nuación tres imágenes de un vehículo a escala en el que la iluminación se realiza empleando las técnicas actuales (alumbrado simétrico y a contraflujo) y la posibilidad futura de emplear pavimento retroiluminado o iluminación insertada en el pavimento.

7.3 Evaluación de las posibles mejoras

Es de destacar el bajo rendimiento que tienen los sistemas actuales de iluminación de un túnel, y el gran campo de investigación para alcanzar rendimientos similares a las de otras instalaciones en los que es normal alcanzar valores del 80 – 90 %.

Analicemos un túnel actual de dos carriles (ancho normal del túnel de 10,5 m) con una iluminación interior de 2 Cd/m². Para ello suele ser habitual la disposición de luminarias de VSAP de 150 W a intervalos de unos 20 metros en ambos hastiales, con disposición al tresbolillo. Por lo que tenemos un consumo de 1,428 57 W/m².

El valor ideal teórico para iluminar cada m² de este túnel con niveles de luminancia de 2 Cd/m², empleando luminarias ideales que emitan 683 lm/W, es de 0,002 928 W/m².

Por tanto el rendimiento actual es del orden del 0,2 %, siendo evidentes las enormes posibilidades de mejora que existen y que con toda seguridad veremos en los próximos años.

Como puede observarse, las posibilidades de mejora en la fabricación de luminarias es sólo de unas cuatro veces; pero las de aprovechamiento de la luz emitida es de 100 veces (téngase en cuenta que la reflectancia del pavimento asfáltico es del orden del 7 %, que normalmente sólo la mitad de la luz va en dirección contraria al tráfico y por tanto no tiene un ángulo de reflexión predominante, que gran parte de la luz se dirige fuera del área de interés,...). Por tanto, es este apartado donde el mayor campo de mejora y donde el alumbrado led tendrá un gran desarrollo si se aprovechan sus cualidades de luz concentrada, lo que permitirá realizar la distribución y orientación óptima de cada rayo de luz sin provocar deslumbramientos y

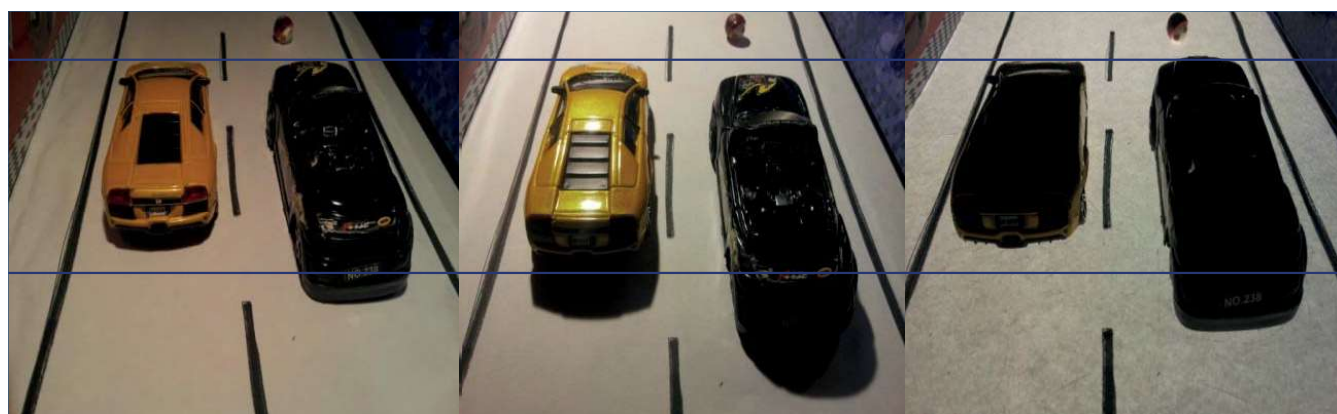


Figura 8. De izquierda a derecha: alumbrado simétrico, a contraflujo y pavimento retroiluminado

abriéndose otro gran campo de avance en desarrollo de pavimentos con alta reflectancia o translúcidos.

8. Conclusiones

El alumbrado de los túneles de carretera está en continua evolución y mejora, sin que las normas de aplicación hayan recogido todos estos avances, por lo que es conveniente realizar una completa revisión de los niveles fijados en las mismas.

Las posibilidades de mejora en este campo son enormes, estando todavía pendiente de que se produzcan importantes avances en las lámparas dispuestas (permitiría incrementar el rendimiento unas cuatro veces), en la implantación de pavimentos claros y con alta reflectancia (posibilidad de mejora de unas catorce veces), combinado con el diseño y construcción de las luminarias que permitan dirigir toda la luz emitida en la dirección óptima y de interés para los conductores (unas nueve veces).

Todas estas mejoras en el alumbrado permitirán obtener elevadas uniformidades y confort para los conductores, que a su vez posibilitarán reducir los niveles de iluminación necesarios para garantizar la seguridad de la circulación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Artículo "Primera impresión. El nuevo 308 llega como Coche del Año en Europa". 24 de marzo de 2014, publicado por la Organización de Consumidores y Usuarios en su página web www.ocu.org
- [2] Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004 sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras. Diario Oficial de la Unión Europea 30 de abril de 2004.
- [3] Censo de Conductores 2013, publicado por la Dirección General de Tráfico en su página web www.dgt.es
- [4] Artículo "Feminizar la conducción, ¿por qué no?", publicado en la página web del RACC www.racc.es
- [5] Norma 3.1-IC. Instrucción de Carreteras. Trazado. 2ª Edición de abril de 2003. Ministerio de Fomento.
- [6] Código de Tráfico y Seguridad Vial. Texto Consolidado publicado en la página web del Boletín Oficial del Estado www.boe.es
- [7] Orden circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles. Tomo II Recomendaciones para la iluminación de túneles. Dirección General de Carreteras. 2015
- [8] CIE 88:2004 2ª edición. Informe Técnico. Guía para el alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores. Comisión Internacional de Iluminación (CIE). ISBN 3 901 906 31 2
- [9] Informe UNE UNE-CR 14380 IN Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de túneles. Septiembre de 2007.



NOTA DEL COMITÉ DE REDACCIÓN DE RUTAS

Se consideran de gran interés las reflexiones y observaciones del autor en relación con la incorporación de nuevas soluciones y tecnologías al alumbrado de los túneles viarios, aspecto de suma importancia para la seguridad de la circulación. La experiencia profesional que aporta y las líneas de mejora que plantea deberían ser consideradas por todos los que intervienen en estos temas, tanto en la revisión y actualización de la normativa como en la adecuación de los diseños de estas instalaciones.

El Comité de Redacción de RUTAS desea aportar una reflexión complementaria, en el sentido de contemplar la ampliación del estudio y la adecuación de la normativa a los elementos del trazado en planta en túneles, especialmente a partir de una cierta longitud de los mismos, de forma que puedan evitarse los molestos y peligrosos deslumbramientos que se producen donde se ve el portal de salida a una gran distancia desde el interior del túnel. Es un problema que se puede evitar con un trazado que disponga, en el tramo final del túnel según el sentido de la marcha, una alineación curva de radio adecuado a las condiciones requeridas de visibilidad de parada. Algunas normas ya recogen adecuadamente esta exigencia.