

ILUMINACIÓN DE TÚNELES

13.1	Generalidades	233
13.2	Iluminación de túneles largos	242
13.3	Iluminación de túneles cortos y pasos inferiores	251
13.4	Alumbrado de emergencia	254
13.5	Mantenimiento	255
13.6	Control de encendidos	255
13.7	Alumbrado noche (zona exterior túnel)	255
13.8	Diseño del alumbrado de túneles	255
13.9	Guiado visual	257

13.1. Generalidades

La conducción de vehículos a través de los túneles durante las horas diurnas plantea una problemática totalmente diferente a la conducción al aire libre por la noche, que se concreta fundamentalmente en las diferentes existentes entre los elevados niveles de luminancia exteriores y los bajos niveles de luminancia en el interior de los túneles.

El problema visual fundamental en un túnel es el de la adaptación del ojo humano desde las elevadas luminancias exteriores durante el día, a las bajas luminancias (prácticamente nulas) que existen en el interior de un túnel, teniendo en cuenta además que, en una determinada distribución de luminancias, no puede verse un obstáculo si su luminancia es muy inferior a la de dicha distribución. Todo lo cual da lugar al denominado "efecto agujero negro" que impide, durante el día, que los conductores vean el interior del túnel cuando se encuentran a una cierta distancia de la boca del mismo.

Todo ello considerando que en la mayoría de los túneles, la luz natural diurna solamente penetra, en función de la orientación de los mismos, una distancia del orden de una a tres veces su mayor dimensión transversal. Más allá de dicha distancia las condiciones luminosas existentes son insuficientes para asegurar la visibilidad de eventuales obstáculos, o para el adecuado guiado de los conductores.

Desde el punto de vista luminotécnico en los túneles se diferencian las siguientes zonas: de acceso, de entrada constituida por las zonas de umbral y de transición, del interior y, finalmente, de salida (véase Fig. 4). Por razones económicas, no es posible restablecer en la zona de entrada de los túneles condiciones de iluminación idénticas a las existentes durante el día en el exterior (zona de acceso), que puedan alcanzar valores de hasta 100.000 lux.

En la zona de umbral situada justo a la entrada del túnel, con una longitud aproximadamente igual a la distancia de seguridad, el alumbrado durante el día debe dimensionarse de forma que asegure una visión suficiente de eventuales obstáculos sobre la calzada, aunque se produzca una primera reducción brusca de los niveles de iluminación existentes en el exterior (zona de acceso), pero que resulta aceptable. En la segunda parte de la zona de umbral se disminuyen progresivamente los niveles de iluminación.

En la zona inmediata siguiente o zona de transición, de longitud variable en función de la velocidad de circulación, la instalación de alumbrado debe concebirse para paliar el efecto de adaptación (paso súbito de un nivel de iluminación muy elevado a un nivel bastante bajo) continuando con la disminución paulatina de los niveles de iluminación hasta haber completado el progreso de adaptación del ojo al llegar a la zona del interior, donde se instala un alumbrado con un nivel constante de iluminación.

En la zona de salida, con una longitud aproximadamente igual a la distancia de seguridad, debe reforzarse de forma asimismo progresiva el alumbrado elevando los niveles de iluminación, de manera que se facilite a los conductores la adaptación a las condiciones luminosas exteriores. En los túneles bidireccionales el alumbrado en la zona de salida será idéntico al de la zona de entrada.

13.1.1. Problemática visual en los túneles

La problemática visual en los túneles comprende los efectos de inducción y adaptación, así como la influencia de las luminancias de velo. Todo lo cual exige tener en cuenta la distancia de seguridad en función de la velocidad del tráfico del túnel.

13.1.1.1. Efecto de inducción

La sensibilidad del ojo humano es función de la distribución de luminancias en el campo de visión, y sobre la misma influyen dos fenómenos denominados de inducción y de adaptación.

Respecto a la inducción es el efecto producido por la influencia de las partes contiguas de la retina a aquella en la que se forma la imagen del objeto que se está visualizando. Si los ojos del conductor se encuentran en un estado de adaptación a una determinada distribución de luminancias, únicamente puede ver aquellos objetos cuya luminancia sea próxima a la citada distribución.

Debido a la adaptación de los ojos del conductor que se aproxima a un túnel a las altas luminancias exteriores diurnas, cuando éste observa la boca o entrada del mismo, la parte de la retina que recibe la imagen del exterior ejerce sobre la otra parte que recibe la imagen de la boca del túnel un efecto de inducción, de forma que la entrada del túnel aparece como un "agujero negro" en el que no se ve ni un solo detalle. El efecto de inducción de lugar a que, en una determinada distribución de luminancias (iluminación natural diurna de la carretera), no pueda verse un objeto si su luminancia es muy inferior a la de dicha distribución (iluminación prácticamente nula de la entrada del túnel), por mucho tiempo que se contemple dicho objeto.

13.1.1.2. Efecto de adaptación

Es el que permite el ajuste de la sensibilidad del ojo humano a un cambio en la distribución de luminancias en el campo de visión. El tiempo que tarda en producirse la adaptación de la sensibilidad del ojo humano al cambio en la distribución de luminancias, se denomina tiempo de adaptación.

La adaptación de la sensibilidad del ojo a los cambios rápidos de la distribución de luminancias en el campo visión no es instantánea, por lo que durante un determinado tiempo la capacidad de visión disminuye, llegando a producirse una ceguera momentánea en el caso de un cambio brusco de la distribución de luminancias. Es decir, en algunos supuestos como en el caso de la entrada de túneles, el problema puede ser grave y dar origen a que no pueda realizarse la función visual.

13.1.1.3. Influencia de las luminancias de velo

La luz parásita presente sobre el ojo de los conductores (luminancia de velo foveal o de Fry), el estado de la atmósfera (luminancia atmosférica) y los reflejos del parabrisas del vehículo (luminancia del parabrisas), se combinan para formar un velo luminoso que reduce la visibilidad de los obstáculos a la entrada de los túneles.

La razón principal de la iluminación de un túnel es asegurar en todo momento la visibilidad de los obstáculos, lo que exige percibir una diferencia entre la luminancia del obstáculo y la luminancia de fondo o de la calzada y paredes del túnel.

Por definición, el contraste se expresa de la forma siguiente:

$$C = \frac{L_0 - L_f}{L_f}$$

donde:

L_0 = Luminancia del obstáculo.

L_f = Luminancia de fondo.

El contraste C puede ser positivo o negativo:

Si $L_0 > L_f$ $C > 0$ Contraste positivo (obstáculo más claro que el fondo)

Si $L_0 < L_f$ $C < 0$ Contraste negativo (obstáculo más oscuro que el fondo)

En el caso de túneles se deben diferenciar dos tipos de contraste: el denominado intrínseco o físico C_{int} medido junto al obstáculo y el contraste de retina C_R medido desde el ojo del conductor del vehículo.

En la Fig. 1 puede comprobarse que el contraste intrínseco C_{int} se mide junto al obstáculo en (1), mientras que el contraste de retina C_R se evalúa desde el ojo del observador en (4), interponiéndose entre ambos contrastes un conjunto de luminancias de velo denominadas atmosférica L_{atm} , de parabrisas L_{pb} y foveal o de Fry L_v , que dan origen en el ojo del conductor a un deslumbramiento de velo que perturba la visión.

Las capas de aire de la atmósfera conteniendo partículas iluminadas por la luz solar dan lugar a la luminancia atmosférica L_{atm} debido a la refracción de la luz en dichas capas de aire de la atmósfera. Depende de las condiciones atmosféricas y de la posición del sol.

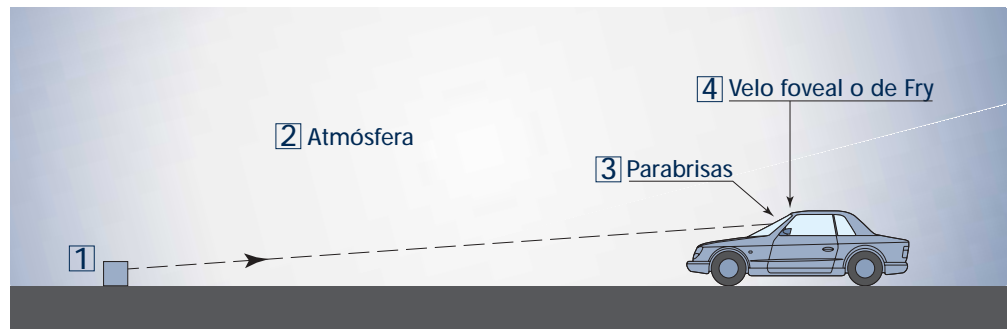
La luminancia del parabrisas L_{pb} se produce como consecuencia de la existencia en los vehículos del parabrisas, que provoca efectos de difracción o reflexión según la posición del Sol en el campo visual y el estado, curvatura e inclinación del propio parabrisas.

La luminancia de velo foveal o de Fry L_v está causada por la perturbación en la visión que induce una luminancia ajena a la tarea visual a realizar, y que dificulta la percepción de las imágenes de dicha tarea visual, debido al velo luminoso producido en el ojo del conductor a causa de la difracción de la luz en el humor acuoso del globo ocular. Las luminancias de velo atmosférica, de parabrisas y foveal o de Fry que, tal como se representa en la Fig. 1, se interponen entre el obstáculo y el conductor, reducen el contraste intrínseco C_{in} del obstáculo ($C_R < C_{in}$) sin cambiar el signo del contraste, disminuyendo la visibilidad de los obstáculos a la entrada de los túneles.

Dicha reducción del contraste intrínseco podría ocasionar que no se llegara a asegurar la visibilidad de los obstáculos a la entrada de los túneles, sobre todo en el caso de luminancias de velo fuertes, que podrían obligar a duplicar los valores de luminancia a alcanzar en la zona de umbral del túnel mediante el alumbrado artificial, con la finalidad de

paliar la reducción del citado contraste y, consecuentemente, la disminución de la visibilidad de los obstáculos por parte del conductor. Por todo ello, el efecto producido por las luminancias de velo se tiene en cuenta a la hora de establecer los niveles de iluminación de la entrada de los túneles.

Las luminancias o velos parásitos que caracterizan los efectos del entorno del túnel, del parabrisas y de la atmósfera y que perturban la visión del conductor, son variables según la región y zona donde se encuentra el túnel, así como su orientación, la estación del año, climatología, la hora de la jornada, etc.



$$C_{int.} = \frac{L_o - L_f}{L_f}$$

$$C_R = \frac{L_{OR} - L_{IR}}{L_{IR}}$$

Velos parásitos atmosféricos L_{atm} de parabrisas L_{pb} y de velo foveal o de Fry L_v

Figura 1

13.1.1.4. Distancia de seguridad

Se define distancia de seguridad (DS) como la distancia necesaria para que el conductor de un vehículo que circula a determinada velocidad, pueda detenerse antes de alcanzar a un obstáculo situado en la calzada. Dicha distancia consta de dos sumandos: el recorrido del vehículo desde el instante en que el conductor divisa el obstáculo hasta que aplica los frenos, y la distancia de frenado propiamente dicha.

La distancia de seguridad puede ser calculada de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$DS = RT \cdot \frac{V_0}{3'6} + \frac{1}{3'6^2 \cdot g} \cdot \int \frac{v}{f_1(v) + h} dv$$

donde:

- DS = Distancia de seguridad (m.).
- V_0 = Velocidad de diseño (Km/h.).
- RT = Tiempo de percepción-reacción (s).
- $f_1(v)$ = Coeficiente de fricción (longitudinal) dependiente de v.
- g = Aceleración de la gravedad (9'81 m/s²).
- h = Inclinación o gradiente de la carretera (%).

Aplicando la fórmula obtenemos los siguientes ejemplos de distancia de parada "SD" en carreteras planas para retardos de 3,5 a 5 m/s²:

Velocidad de diseño (Km/h)	Ret	120	100	80	70	60	50
DS (carretera húmeda) m.	3,5	230	160	105	90	70	50
DS (carretera seca) m.	5	150	110	75	65	55	40

Tabla 1

Cuando se aproxima un vehículo a un túnel los efectos de inducción, adaptación y la influencia de las luminancias de velo están íntimamente relacionadas con la distancia a la que el conductor del vehículo se encuentra de la boca de dicho túnel, en la denominada zona de acceso con una longitud aproximadamente igual a la distancia de seguridad (DS, Fig. 4).

Cuanto mayor es la velocidad de un vehículo, mayor resulta la distancia de seguridad (DS) y por ello deben tenerse en cuenta algunas consideraciones:

- La percepción de un obstáculo es proporcional a la inversa del cuadrado de la distancia de seguridad (DS^{-2}), suponiendo que el contraste es constante.
- La luminancia de velo atmosférico L_{atm} es proporcional a la distancia de seguridad (DS). La transmisión atmosférica es $T_{atm} = 10^{-k \cdot DS}$.
- La velocidad de adaptación visual está relacionada con la velocidad de aproximación del vehículo.

Para un conductor en la zona de acceso, cuanto mayor es la velocidad de su vehículo más larga es la distancia desde la boca del túnel hacia el interior en la que el conductor tiene que ver dentro del túnel, lo que supone mayor longitud de la zona umbral a iluminar.

Asimismo, a mayores distancias un obstáculo situado en el interior del túnel subtende un ángulo más pequeño en el ojo del conductor y, por tanto, es menos visible. Además, la capa de aire entre el conductor situado en la zona de acceso y la entrada del túnel es mayor, lo que significa mayor luminancia atmosférica L_{atm} , reducción del contraste intrínseco C_{int} y, consecuentemente, disminución de la visibilidad de los obstáculos. Todo ello exige mayores niveles de iluminación en la zona de umbral del túnel.

En resumen, a mayores velocidades corresponden distancias de seguridad (DS) más largas, lo que entraña mayor longitud de la zona umbral del túnel a dotar de alumbrado, así como más elevados niveles de iluminación en dicha zona y, por tanto, por ambas causas superiores costes económicos.

13.1.2. Sistemas de alumbrado

Los sistemas de alumbrado de túneles pueden dividirse en dos familias: simétrico y asimétrico que a su vez comprende el sistema de alumbrado de flujo contrario al sentido de circulación de vehículos, también denominado a "contraflujo" y el sistema de alumbrado a favor de flujo que carece de utilidad práctica y, por tanto, no se considera.

El alumbrado de los túneles se caracteriza por el parámetro de calidad de contraste P, también conocido como coeficiente de revelado de contraste q_c cuya expresión es la siguiente:

$$P = q_c = \frac{L}{E_v}$$

donde:

L = Luminancia de la calzada en cd/m^2 .

E_v = Iluminancia vertical del obstáculo en lux a nivel de la calzada en la dirección de la circulación de vehículos, es decir, iluminancia media sobre una superficie vertical perpendicular al eje del túnel y, orientada hacia la entrada.

13.1.2.1. Sistema de alumbrado simétrico

El sistema de alumbrado simétrico es un sistema en el que las luminarias tienen una distribución de la intensidad luminosa que es simétrica en relación al plano C $90^\circ/270^\circ$, es decir, a un plano perpendicular al eje del túnel, tal y como se representa en la Fig. 2.

Los contrastes de los obstáculos pueden ser negativos o positivos, dependiendo de las propiedades de reflexión de la superficie de los mismos. No obstante, con este sistema se pretende asegurar una visión en contraste positivo, es decir, que los obstáculos se destaquen claros sobre el fondo oscuro de la calzada y paredes del túnel.

El sistema de alumbrado simétrico se utiliza en todos los casos en la zona del interior de los túneles con luminarias dotadas de lámparas fluorescentes convencionales y compactas, de vapor de sodio a alta y baja presión o de descarga por inducción, pudiéndose utilizar la implantación de dicho sistema en la zona de entrada de aquellos túneles que tengan establecida una limitación de la velocidad de aproximación de los vehículos baja.

Este sistema permite una buena visibilidad de los obstáculos y ausencia de deslumbramiento, siendo aconsejable fotométricamente que el pavimento de la calzada y las paredes del túnel sean superficies difusoras (factor especular S_1 pequeño) y claras (coeficiente de luminancia medio Q_0 alto). Por tanto, el pavimento conviene que sea de la Clase R1, R2 ó C1, según recomendaciones de la C.I.E., con alto grado de claridad o luminosidad (Q_0 lo más elevado posible).

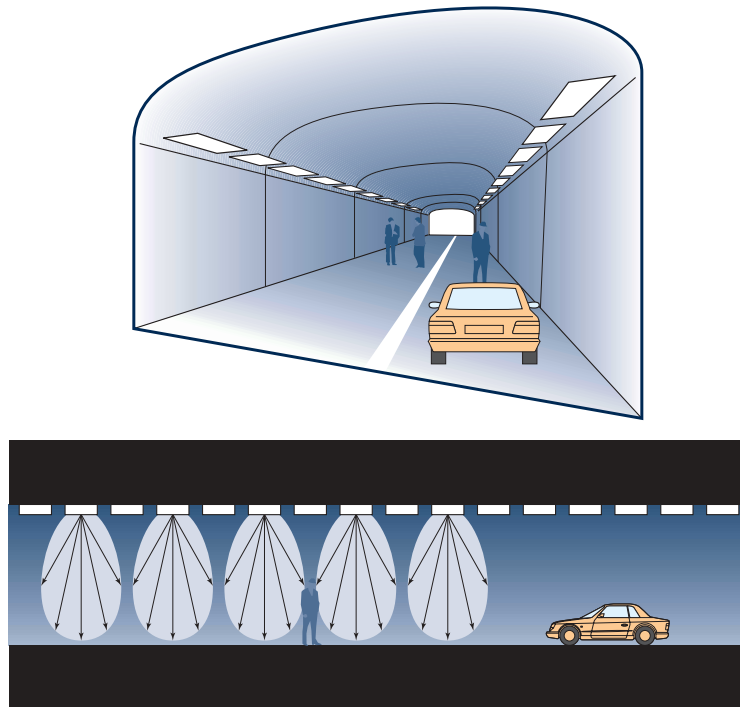


Figura 2

El dimensionamiento del alumbrado de los túneles, mediante sistema simétrico en la zona de entrada, conduce a niveles de iluminación difíciles de conseguir para velocidades de aproximación de los vehículos superiores a 90 Km/h con luminancias de velo débiles o medias en la zona de acceso, o mayores de 70 Km/h con luminancias de velo fuertes. Cuando se pretenda alcanzar niveles superiores a 200 cd/m², muy complicados de lograr en la práctica con el sistema simétrico, resulta necesario en dichos casos buscar otras alternativas, bien de limitación en la velocidad de los vehículos o de implantación del sistema de alumbrado a contraflujo en la zona de entrada.

13.1.2.2. Sistema de alumbrado a contraflujo

El sistema de alumbrado a contraflujo es un sistema en el que las luminarias tienen una distribución de la intensidad luminosa asimétrica, que está dirigida contra el sentido de la circulación del tráfico de vehículos, tal y como se representa en la Fig. 3.

Este sistema de alumbrado favorece la visión de obstáculos por contraste negativo, es decir, que los obstáculos se destaquen oscuros sobre el fondo claro de la calzada y paredes del túnel, debido a que la iluminación vertical en los planos en que están mirando a los conductores que se aproximan es baja. Esta visión en contraste negativo se logra reduciendo la luminancia del obstáculo (L_0), limitando sensiblemente la iluminación vertical del mismo (E_v), y aumentando la luminancia de la calzada.

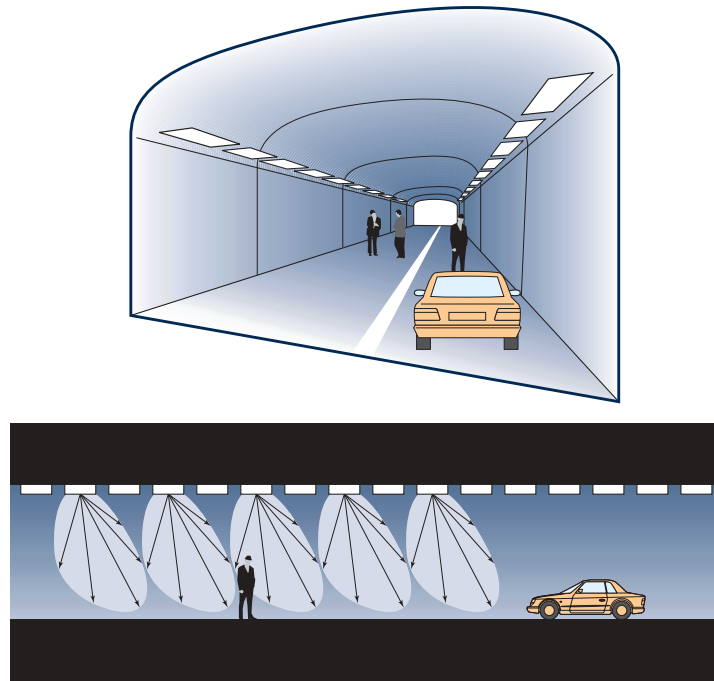


Figura 3

El sistema de alumbrado a contraflujo únicamente se utiliza en la zona de entrada de los túneles. Se recomienda en esta zona cuya limitación de la velocidad de los vehículos es elevada, es decir, a partir aproximadamente de 90 Km/h, dadas las ventajas económicas que en dichos casos representa. Las luminarias se instalan necesariamente encima de los carriles de tráfico y están equipadas normalmente con lámparas de vapor de sodio a alta presión. Debe destacarse que el alumbrado a contraflujo no se implanta en la zona interior de los túneles.

Por la propia concepción de este sistema, debe evitarse su utilización en túneles de doble sentido de circulación (bidireccionales), dado que en dicho caso, lo que sería contraflujo para un sentido de circulación determinado, resultaría a favor de flujo para el sentido contrario, con lo que se modificarían las condiciones de visión de los conductores.

El sistema de alumbrado a contraflujo crea habitualmente mayor contraste entre el obstáculo y el fondo, pero puede producir un cierto aumento del efecto "agujero negro" reduciendo el confort visual del conductor. Asimismo, este sistema a contraflujo puede no ser apropiado en la entrada de túneles con penetración muy alta de luz diurna, y resulta menos efectivo cuando las intensidades de tráfico sean muy elevadas o se prevea en el tráfico un elevado porcentaje de vehículos pesados.

En este sistema de alumbrado, que proporciona una buena visibilidad de los obstáculos, debe limitarse el deslumbramiento controlando la intensidad luminosa emitida por las luminarias, siendo aconsejable fotométricamente la utilización de pavimento especular (factor especular S_1 elevado) y claro, es decir, con coeficiente de luminancia medio Q_0 alto, pavimentos clase R3, R4 ó C2, según recomendaciones de la C.I.E., con alto grado de claridad o luminosidad (Q_0 lo más elevado posible). Además debe limitarse en las paredes del túnel, al menos hasta el nivel de 1 m., una elevada luminancia, con el fin de reducir la iluminancia vertical de los obstáculos (E_v).

13.1.2.3. Coeficiente de revelado de contraste

El sistema de alumbrado adoptado bien simétrico o a contraflujo se caracteriza por unos determinados coeficientes de revelado de contraste q_c , cuyos valores se incluyen en la Tabla 2.

COEFICIENTE DE REVELADO DE CONTRASTE

Sistemas de alumbrado	Coefficiente de revelado de contraste $q_c = L/E_v$
Simétrico co	$\leq 0,2$
Contraflujo	$\geq 0,6$

Nota: Los sistemas de alumbrado cuyos valores del coeficiente del revelado del contraste está comprendido entre 0,2 y 0,6 no han sido considerados

Tabla 2

El valor del coeficiente de revelado de contraste $q_c = L/E_v$ está estrechamente ligado a las características intrínsecas del sistema de alumbrado del túnel, a la implantación de las luminarias y a las características reflexivas del pavimento, así como a la contribución fotométrica de las paredes del túnel.

Estos valores de la Tabla 2 caracterizan el sistema de alumbrado de los túneles únicamente en mediciones nocturnas, esto es, sin influencia de la luz diurna, que altera los valores del coeficiente de revelado de contraste q_c . En mediciones durante el día en la zona de entrada de los túneles y para el sistema de alumbrado simétrico, q_c alcanza cifras superiores a 0,2, mientras que en el sistema a contraflujo los valores de q_c son inferiores a 0,6. Debido precisamente a esta variación del coeficiente de revelado de contraste $q_c = L/E_v$ en medición diurna respecto a medición nocturna, el contraste cambia de signo pasando de contrastes negativos a positivos y viceversa, dando lugar a situaciones de no visibilidad de obstáculos.

13.1.2.4. Sistema de iluminación natural con luz diurna

Además de los sistemas de alumbrado artificial y a contraflujo, existe otra alternativa para la iluminación de la entrada de los túneles mediante la adecuada utilización de la luz diurna apantallada proporcionada por paralúmenes o pantallas. Este tipo de iluminación natural debe satisfacer los mismos niveles luminosos que los del alumbrado artificial, siendo los valores del factor k (coeficiente por el que se debe multiplicar la luminancia de la zona de acceso del túnel L_{20} , para obtener la luminancia de la zona de umbral de túnel L_{th} , es decir, $L_{th} = k \cdot L_{20}$), idénticas a las del sistema de alumbrado simétrico. Asimismo, el coeficiente de revelado de contraste q_c se determinará en la iluminación natural del mismo modo que para el alumbrado artificial, incluyéndose también en el cálculo la contribución de la luz interreflejada.

13.1.3. Clasificación de túneles

El parámetro que permite una clasificación de los túneles es el de sus condiciones geométricas y, en particular, su longitud. Las exigencias de alumbrado para túneles largos y cortos difieren de acuerdo con el grado en el que el conductor de un vehículo que se aproxima puede ver a través del túnel. La capacidad de ver a través del túnel depende fundamentalmente de la longitud del mismo, pero también de otros parámetros de diseño (anchura, altura, curvaturas horizontal y vertical, etc.).

13.1.3.1. Clasificación de túneles largos

En lo referente al alumbrado, los túneles largos se clasifican en función de la intensidad, la velocidad y composición del tráfico, el guiado visual y la comodidad en la conducción.

13.1.3.1.1. Factores de ponderación en función de la intensidad de tráfico

Existe cierta relación, pero no lineal, entre la intensidad del tráfico y el riesgo de accidentes que puede ser contrarrestado, al menos en parte, aumentando el nivel de iluminación del túnel.

El segundo factor a tener en cuenta es que las velocidades elevadas requieren mejor visibilidad y, por ello fundamentalmente, se precisa un nivel de luminancia mayor en la calzada.

Tan pronto como se haya decidido dotar de alumbrado un túnel, la velocidad tiene una importancia considerable, debido a su influencia en los requerimientos de la visibilidad. Cuanto mayor es la velocidad, más larga será la distancia de seguridad (DS), lo que obliga a mayores luminancias en la

zona de umbral del túnel.

Considerando que cuando se va a iluminar un túnel, la intensidad de tráfico se define como intensidad horaria, es decir, número de vehículos que circulan por un carril de una vía de tráfico en una hora, los factores de ponderación en función de la intensidad de tráfico se detallan en la Tabla 3.

FACTORES DE PONDERACIÓN EN FUNCIÓN DE LA INTENSIDAD DE TRÁFICO

INTENSIDAD DE TRÁFICO (Vehículos/hora por carril)		FACTOR DE PONDERACIÓN
Unidireccional	Bidireccional	
< 60	< 30	0
60-100	30-60	1
100-180	60-100	2
180-350	100-180	3
350-650	180-350	4
650-1200	35-650	5
> 1200	650-1200	6
	> 1200	7

Tabla 3

13.1.3.1.2. Factores de ponderación en función de la composición del tráfico

El grado de dificultad de la tarea de conducir un vehículo en una carretera está influido generalmente, tal como se ha indicado, por la velocidad e intensidad de tráfico y, asimismo, por la composición del tráfico y por el trazado de la carretera y su entorno.

La composición del tráfico también influye en el diseño del alumbrado de los túneles en varios aspectos:

- Porcentaje de camiones.
- Presencia/ausencia de motocicletas y/o ciclistas.
- Presencia/ausencia de limitación para permitir el tránsito de mercancías peligrosas.

El diseño de alumbrado en los túneles ha de ser adaptado a las circunstancias anteriores, requiriéndose mayores niveles luminosos o mejor alumbrado de las paredes o la calzada, cuando las condiciones son más difíciles o más peligrosas.

Los factores de ponderación en función de la composición del tráfico son los siguientes:

FACTORES DE PONDERACIÓN EN FUNCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL TRÁFICO

COMPOSICIÓN DEL TRÁFICO	FACTOR DE PONDERACIÓN
Tráfico motorizado	0
Tráfico motorizado (porcentaje de camiones > 15%)	1
Tráfico mixto	2

Tabla 4

13.1.3.1.3. Factores de ponderación en función del guiado visual

El conductor de un vehículo debe poseer la información adecuada al circular por el interior del túnel. Esto puede conseguirse dividiendo la superficie longitudinal del túnel en varias superficies de contraste, como por ejemplo utilizando una pared clara y un techo oscuro. El guiado visual es de especial importancia:

- Cuando se aproxima el usuario al túnel.

- Especialmente si la cota de la entrada del túnel es baja.

Los factores de ponderación en función del guiado visual son los siguientes:

FACTORES DE PONDERACIÓN EN FUNCIÓN DEL GUIADO VISUAL

GUIADO VISUAL	FACTOR DE PONDERACIÓN
Guiado visual bueno	0
Guiado visual pobre	2

Tabla 5

El guiado visual proporcionado por el alumbrado del túnel debe permitir incrementar la visibilidad de la calzada y de la señalización vertical y horizontal, especialmente esta última, instalando asimismo balizamiento (captafaros, hitos, etc.) tanto en la calzada como en las paredes del túnel al objeto de mejorar el guiado visual.

En este sentido a la hora de establecer los factores de ponderación en función del guiado visual (Tabla 5), se tendrá en cuenta la instalación adicional de dispositivos retrorreflectantes en las paredes y en la superficie de la calzada, especialmente para los túneles que corresponden a las clases de alumbrado 5, 6 y 7 (Tabla 7).

13.1.3.1.4. Factores de ponderación en función de la comodidad en la conducción

La comodidad en la conducción de vehículos en los túneles debe tenerse en cuenta en el alumbrado de los mismos, entendiéndose como tal la facilidad y mínimo esfuerzo que deben realizar los usuarios en la conducción de vehículos, debido a la completa información recibida y a la carencia de complejidad en el campo visual.

Los factores de ponderación en función de la comodidad en la conducción de vehículos son los siguientes:

FACTORES DE PONDERACIÓN EN FUNCIÓN DE LA COMODIDAD EN LA CONDUCCIÓN

COMODIDAD EN LA CONDUCCIÓN	FACTOR DE PONDERACIÓN
Se requiere una baja comodidad	0
Se requiere una comodidad media	2
Se requiere una comodidad elevada	4

Tabla 6

13.1.3.2. Clases de alumbrado para túneles largos

Una vez establecidos los factores de ponderación en función de la intensidad y composición del tráfico (Tablas 3 y 4), así como los correspondientes factores en función del guiado visual y de la comodidad en la conducción de vehículos (Tablas 5 y 6), se definen las clases de alumbrado para túneles largos:

CLASES DE ALUMBRADO PARA TÚNELES LARGOS

SUMA DE FACTORES DE PONDERACIÓN	FACTOR DE PONDERACIÓN
0-3	1
4-5	2
6-7	3
8-9	4
10-11	5
12-13	6
14-15	7

Tabla 7

13.2. Iluminación de túneles largos

Las principales características fotométricas necesarias para establecer la calidad del alumbrado de un túnel son las siguientes:

- Nivel de luminancia de la calzada.
- Nivel de luminancia de las paredes, en particular hasta una altura de 2 m.
- Uniformidad de distribución de luminancia en calzada y paredes.
- Limitación del deslumbramiento.
- Control del efecto Flicker.

En la Fig. 4 se ha representado una sección longitudinal de un túnel largo unidireccional interurbano, detallando las longitudes y niveles de luminancia de las diferentes zonas del mismo. La nomenclatura y correspondiente definición de dichos niveles luminotécnicos se concreta a continuación:

- L_{20} = Luminancia en la zona de acceso.
- L_{th} = Luminancia en la zona umbral.
- L_{tr} = Luminancia en la zona de transición.
- L_n = Luminancia en la zona del interior.
- L_{ex} = Luminancia en la zona de salida.

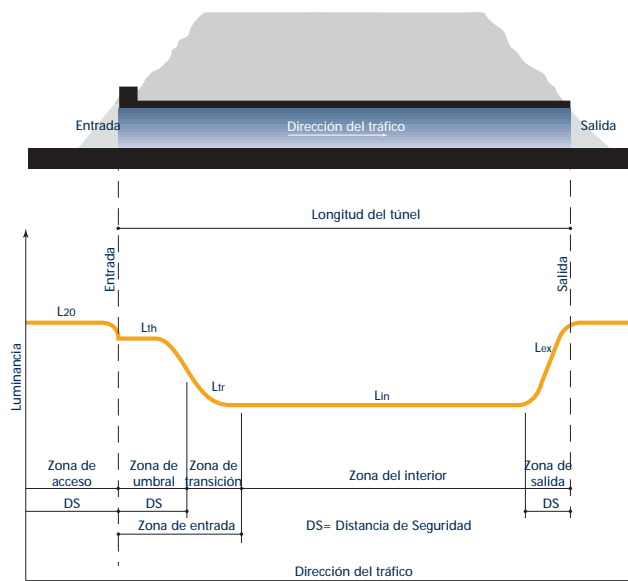


Figura 4

13.2.1. Luminancia en la zona de acceso

La zona de acceso es la parte de la carretera a cielo abierto, situada inmediatamente anterior a la entrada o portal del túnel, que cubre la distancia a la que un conductor que se aproxima debe ser capaz de ver en el interior del túnel. La longitud de la zona de acceso es igual a la distancia de seguridad (DS), tal y como se ha indicado en la Fig. 4.

El valor de luminancia necesario al comienzo de la zona de umbral tiene que basarse en el valor de la luminancia en la zona de acceso L_{20} a una separación delante del túnel igual a la distancia de seguridad (DS). Bajo idénticas condiciones de luz diurnas, los túneles con distintas zonas de aproximación y alrededores (distinta orografía, entorno, etc.) tendrán valores considerablemente diferentes de luminancia en la zona de acceso L_{20} .

Para diseñar y proyectar la instalación de alumbrado de un túnel se necesita conocer el valor máximo de L_{20} que tiene lugar con una frecuencia suficiente durante todo el año, a una separación delante del túnel igual a la distancia de seguridad (DS). Como en la mayoría de los casos este valor L_{20} depende de las condiciones estacionales y del tiempo meteorológico, se utilizan dos métodos empíricos simplificados para la evaluación de L_{20} . A continuación exponemos dos métodos para calcular la luminancia en la zona de acceso.

Método de aproximación

Como su propio nombre indica este método da solamente una indicación aproximada, y únicamente debe utilizarse cuando no exista información suficientemente detallada acerca de los alrededores inmediatos de la boca de entrada del túnel. Este método consiste en la elección de la luminancia de la zona de acceso mediante la Tabla 8 expresada en Kcd/m^2 ($10^3 cd/m^2$).

TABLA A
LUMINANCIA MEDIA DE LA ZONA DE ACCESO L_{20} (Kcd/m^2)

TIPOS DE VÍAS	PORCENTAJE DE CIELO (%) EN LOS CAMPOS DE VISIÓN CÓNICOS A 20°															
	35%				25%				10%				0%			
	NORMAL		NIEVE		NORMAL		NIEVE		NORMAL		NIEVE		NORMAL		NIEVE	
	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A
Situación de brillo en el campo de visión	(1)		(1)		(1)		(1)		(2)		(3)		(2)		(3)	
Distancia de seguridad 60 m	(4)		(4)		4	5	4	5	2,5	3,5	3	3,5	1,5	3	1,5	4
Distancia de seguridad 100 a 160 m	4	6	4	6	4	6	4	6	3	4,5	3	5	2,5	5	2,5	5

Siendo:

- 1) Efecto dependiente fundamentalmente de la orientación del túnel:
«B»: Bajo; En el hemisferio norte: «entrada sur».
«A»: Alto; En el hemisferio norte: «entrada norte».
Para entradas este y oeste deben elegirse valores intermedios entre bajo y alto.
- 2) Efecto dependiente fundamentalmente del brillo de los alrededores:
«B»: Bajo; Reflectancias de los alrededores bajas.
«A»: Alto; Reflectancias de los alrededores altas.
- 3) Efecto dependiente fundamentalmente de la orientación del túnel:
«B»: Bajo; En el hemisferio norte: «entrada norte».
«A»: Alto; En el hemisferio norte: «entrada sur».
Para entradas este y oeste deben elegirse valores intermedios entre bajo y alto.
- 4) Para una distancia de parada de 60 m no se encuentran en la práctica porcentajes de cielo del 35%.

Notas: La «entrada norte» significa la entrada para conductores de vehículos viajando hacia el sur. La «entrada sur» expresa la entrada para conductores de vehículos viajando hacia el norte.

Tabla 8

Método exacto

La luminancia de la zona de acceso L_{20} es la luminancia media contenida en un campo cónico de visión que subtende un ángulo del 20%, con el vértice en la posición del ojo del conductor, situado a una distancia anterior al túnel igual a la distancia de parada, y orientado el cono hacia el portal de túnel sobre un punto situado a una altura de 1/4 de la boca del túnel.

La determinación de la luminancia de la zona de acceso L_{20} tiene una gran trascendencia, ya que es la que predetermina el nivel a obtener mediante el alumbrado en la zona umbral. Dicha luminancia de la zona de acceso depende de las condiciones atmosféricas del lugar donde está situado el túnel. El cálculo de la luminancia de la zona de acceso L_{20} se obtiene a partir de un croquis de los alrededores de la zona del túnel y se utiliza la fórmula siguiente:

$$L_{20} = a * L_c + b * L_R + c * L_E + d * L_{th}$$

en donde:

- a = % de cielo.
- L_c = Luminancia de cielo.
- b = % de carretera.
- L_R = Luminancia de carretera.
- c = % de entorno.
- L_E = Luminancia del entorno.
- d = % de boca de túnel.
- L_{th} = Luminancia de zona de umbral.

con: $a + b + c + d = 1$

En la fórmula la incógnita a determinar es el valor de la luminancia de la zona de umbral (L_{th}). Cuando nos encontramos con distancias de paradas superiores a 100 m. el tanto por ciento de boca de entra de túnel es bajo (< al 10%) y como L_{th} tiene también un valor bajo respecto a los otros valores de luminancia se puede despreciar la contribución de L_{th} .

Para una distancia de parada de 60 m., la norma establece:

$$L_{20} = (a * L_c + b * L_R + c * L_E) / (1 / K)$$

como K nunca excede de 0,1 tenemos:

$$L_{20} = a * L_c + b * L_R + c * L_E$$

siendo $a + b + c < 1$.

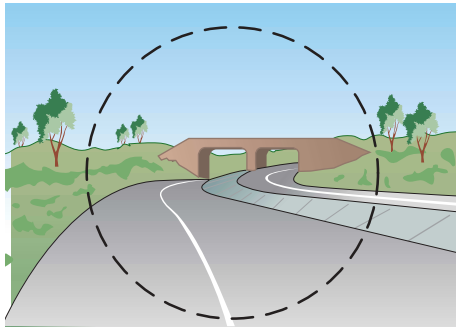
Si no se dispone de los datos para conocer exactamente el valor de "a, b, c y d" utilizamos los definidos en los siguientes esquemas.

Si no disponemos de valores de entornos o alrededores utilizamos los siguientes:

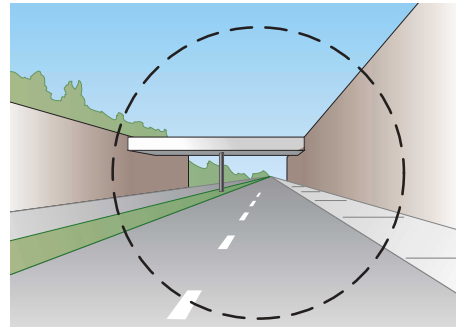
Sentido de conducción	Cielo (L_c) Kcd/m ²	Carretera (L_R) Kcd/m ²	Entorno (L_E)		Kcd/m ²	
			Rocas	Edificios	Nieve	Hierba
N	8	3	3	8	15 (M, H)	2
E - O	12	4	2	6	10 (M) 15 (H)	2
S	16	5	1	4	5 (M) 15 (H)	2

Tabla 9

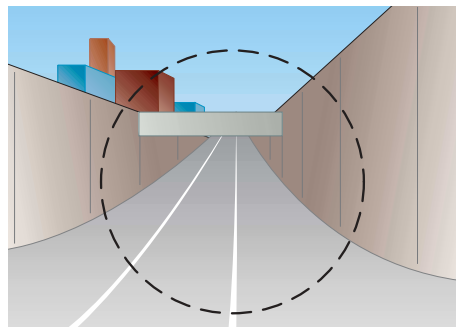
De esta tabla obtenemos el valor de "L" y para realizar la definición del % de cielo que contribuye al valor L_{20} en la instalación objeto estudio, utilizamos la Fig. 5.



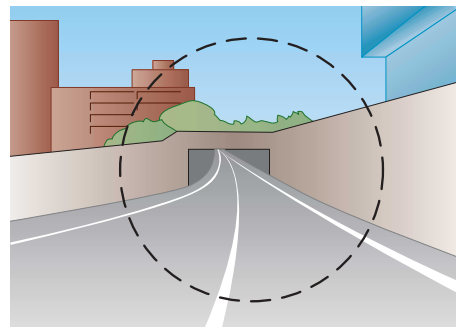
Distancia de seguridad 160 m. Cielo 35%



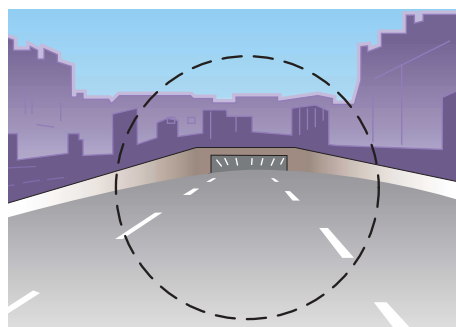
Distancia de seguridad 100 m. Cielo 27%



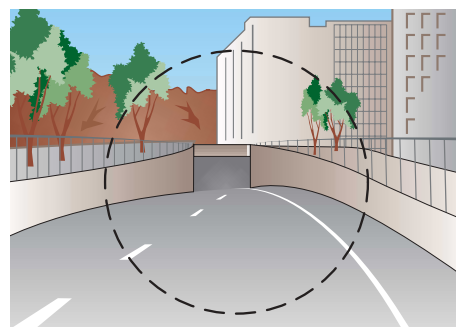
Distancia de seguridad 60 m. Cielo 14%



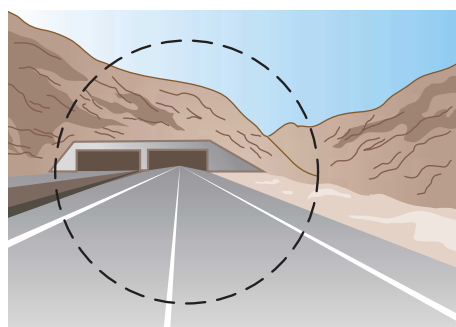
Distancia de seguridad 100 m. Cielo 18%



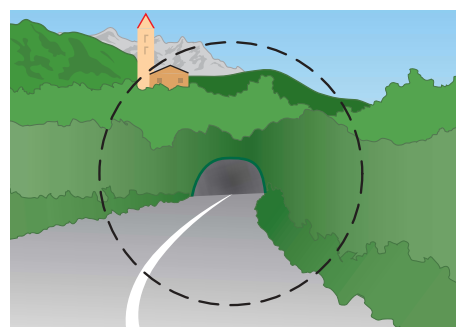
Distancia de seguridad 160 m. Cielo 14%



Distancia de seguridad 100 m. Cielo 3%



Distancia de seguridad 100 m. Cielo 18%



Distancia de seguridad 100 m. Cielo 4%

Figura 5

13.2.2. Iluminación en la zona de entrada

Tal y como se representa en la Fig. 4, la entrada del túnel consta de dos tramos consecutivos: la zona de umbral, que es

la más próxima a la boca del mismo y la zona de transición.

13.2.2.1. Niveles de iluminación en la zona de umbral

La zona de umbral es la primera parte del túnel ubicada directamente después del portal, comenzando, por tanto, en la boca del mismo.

El nivel de luminancia L_{th} (luminancia media en servicio de la superficie de la calzada con mantenimiento de la instalación), que debe ser proporcionado por el alumbrado durante el día al comienzo de la zona de umbral, es un porcentaje de la luminancia de la zona de acceso L_{20} , de forma que se verifica:

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

El factor k se establece en la Tabla 10 teniendo en cuenta el sistema de alumbrado adoptado (contraflujo o simétrico), la distancia de seguridad (DS) y la clase de alumbrado definido en la Tabla 7 en función de los factores de ponderación (intensidad y composición del tráfico, guiado visual y confort en la conducción de vehículos).

VALORES DE $k \cdot 10^3$ PARA LA ZONA DE UMBRAL

SISTEMA DE ALUMBRADO	CONTRAFLUJO			SIMÉTRICO		
	Distancia de Seguridad (DS)			Distancia de Seguridad (DS)		
Clase de alumbrado	60 m	100 m	160 m	60 m	100 m	160 m
1	10	15	30	15	20	35
2	15	20	40	20	25	40
3	20	30	45	25	35	45
4	25	35	50	30	40	50
5	30	40	55	35	50	65
6	35	45	60	40	55	80
7	40	50	70	50	60	100

Notas: Para distancias de seguridad o de parada (DS) comprendidas entre las señaladas (60-100 y 160 m), los valores del factor (k) se obtienen por interpolación lineal entre las cifras establecidas en la tabla. Los valores del factor (k) para el sistema de alumbrado a contraflujo se han determinado para garantizar, en la mayor parte de las circunstancias, un grado de seguridad y comodidad la menos comparable al logrado con el sistema de alumbrado simétrico.

Las distancias de seguridad o de para de 60, 100 y 160 m equivalen respectivamente a velocidades de diseño del túnel de 60, 80 y 100 km/h.

Tabla 10

13.2.2.2. Longitud de la zona de umbral

La longitud de la zona de umbral debe ser como mínimo igual a la distancia de seguridad (DS). En la primera mitad de dicha distancia (DS), la luminancia en la calzada será igual a L_{th} , es decir, el valor al comienzo de la zona de umbral.

A partir de la mitad de la distancia de seguridad (DS), la luminancia de la calzada puede disminuir gradual y linealmente hasta un valor, al final de la zona de umbral, igual a $0,4 \cdot L_{th}$ (Fig. 6). La reducción gradual en la segunda mitad de la zona de umbral puede realizarse de forma escalonada, de manera que la relación entre escalones no exceda de la relación 3:1 y la luminancia no caiga por debajo de los valores correspondientes a la disminución gradual lineal.

13.2.2.3. Luminancia de las paredes

La luminancia media de las paredes en la zona de umbral, hasta una altura de 2 m., debe ser similar a la luminancia media de la superficie de la calzada.

13.2.2.4. Luminancia y longitud de la zona de transición

La zona de transición es la parte del túnel que sigue a la zona de umbral, tal y como se indica en la Fig. 4. Por tanto, comienza al final de la zona de umbral y termina al inicio de la zona del interior.

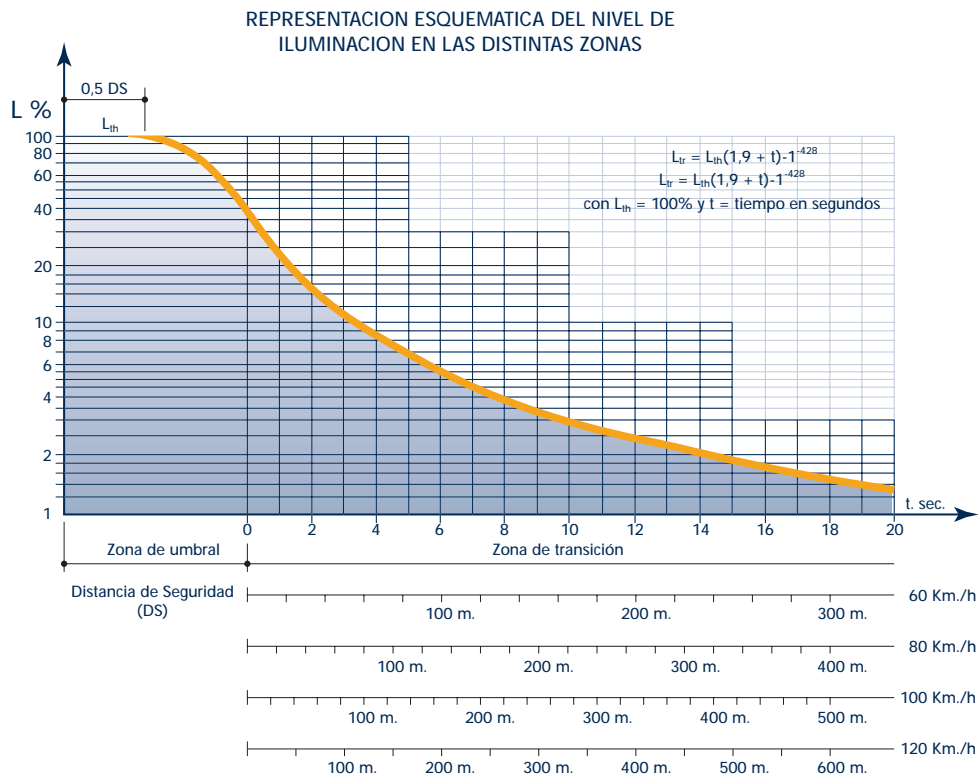


Figura 6

De conformidad con la Fig. 6, la longitud de la zona de transición es la distancia que debe recorrer un vehículo para pasar, adoptándose visualmente, desde el nivel de luminancia del final de la zona de umbral, hasta el valor de la luminancia en el comienzo de la zona del interior. En consecuencia, para cada velocidad del vehículo la reducción permisible de la luminancia en la zona de transición L_{tr} , es función de la distancia recorrida en la mencionada zona. La luminancia media en servicio de la calzada con mantenimiento de la instalación de la zona de transición L_r disminuye gradualmente, desde la luminancia de la zona de umbral hasta la luminancia de la zona del interior. En cualquier posición en la zona de transición, la luminancia de la superficie de la calzada debe ser igual o exceder a la luminancia establecida en la Fig. 6.

La curva de la Fig. 6 es el resultado de numerosas pruebas experimentales en función de la adaptación del ojo desde altos niveles de luminancia a valores muy bajos que han dado lugar a una aproximación matemática que responde a la siguiente expresión:

$$L_r = L_{th} \cdot (1,9 + t)^{-1,428}$$

siendo: $t =$ tiempo en segundos.

En la práctica, el descenso de la luminancia en la zona de transición puede llevarse a cabo mediante una serie de escalones que deben ser menores que la relación 3:1 y la luminancia no puede alcanzar valores inferiores a los de la curva de la Fig. 6, alcanzándose el final de la zona de transición cuando su luminancia es igual a tres veces el nivel de la zona del interior del túnel.

Se deberá cumplir además que la luminancia media de las paredes del túnel hasta una altura de 2 m., en cualquier posición específica de la zona de transición, no debe ser menor que la luminancia media de la calzada en dicho lugar.

13.2.3. Iluminación de la zona del interior

La zona del interior es la parte del túnel que sigue directamente a la zona de transición. Su longitud viene dada por la distancia existente entre el final de la zona de transición y el comienzo de la zona de salida. Los niveles de la luminancia L_{in} de la zona del interior del túnel, que son constantes a lo largo de dicha zona, puesto que ha finalizado la adaptación del ojo desde los altos valores luminosos del exterior, se establecen en la Tabla 11 en función de la distancia de seguridad (DS) y de la clase de alumbrado definido en la Tabla 7.

Hasta una altura de 2 m., las paredes del túnel deben tener una luminancia media similar a la luminancia media en servicio de la calzada con mantenimiento de la instalación L_{in} .

El nivel de luminancia en la zona del interior del túnel debe permitir alcanzar los siguientes objetivos:

- Visibilidad de cualquier obstáculo eventual sobre la calzada a una distancia como mínimo igual a la distancia de seguridad, teniendo en cuenta la opacidad de la atmósfera del túnel debido a los gases de escape de los vehículos.
- Guiado sin ambigüedades de los vehículos.
- Buena calidad del ambiente luminoso, cuyo efecto psicológico es importante sobre todo en los túneles muy largos.

Se debe señalar que los niveles de la zona del interior se consiguen en toda la longitud del túnel, igualmente en las denominadas zonas de refuerzo del alumbrado (zona de entrada y, en su caso, de salida), donde a esta iluminación se le denomina alumbrado base.

LUMINANCIAS EN cd/m^2 EN LA ZONA DEL INTERIOR

SISTEMA DE ALUMBRADO	DISTANCIA DE SEGURIDAD (DS)		
	60 m	100 m	160 m
1	0,5	2	3
2	1	2	4
3	2	3	5
4	2	3	6
5	2	4	6
6	3	5	8
7	3	6	10

Tabla 11

13.2.4. Iluminación de la zona de salida

La zona de salida es la parte del túnel en la que, durante el día, la visión del conductor está influida predominantemente por la elevada luminancia exterior del túnel. La zona de salida comienza al final de la zona del interior y termina en la boca de salida del túnel.

En la zona de salida del túnel debe establecerse un nivel de luminancia L_{ex} en la calzada, para iluminar directamente los vehículos, de forma que los más pequeños resulten visibles en la zona de salida del túnel, dado que sin reforzamiento del alumbrado por encima de los niveles de la zona del interior L_{in} , permanecerían ocultos detrás de los vehículos grandes, debido al deslumbramiento originado por la luz diurna de salida del túnel.

Asimismo, dicha luminancia media en servicio de la calzada con mantenimiento de la instalación L_{ex} de la zona de salida del túnel, posibilita a los conductores de los vehículos que están saliendo del mismo tener suficiente visión, a través de los espejos retrovisores, de la parte posterior o trasera del vehículo, particularmente cuando la distancia entre vehículos sea corta (intensidad de tráfico elevada).

Todo ello, aún teniendo en cuenta que pasar de una luminancia interior L_{in} débil a una luminancia en el exterior del túnel elevada, la adopción del ojo del conductor es muy rápida y en general no plantea problemas para el usuario.

Sin embargo, en los túneles largos unidireccionales cuya clase de alumbrado sea 6 y 7, de acuerdo con lo dispuesto en la Tabla 7, la luminancia en la zona de salida L_{ex} deberá aumentar linealmente a lo largo de una longitud como mínimo igual a

la distancia de seguridad (DS), a partir de la luminancia de la zona del interior, a un nivel 5 veces superior al de la zona del interior ($L_{ex} = 5 \cdot L_{in}$) a una distancia de 20 m., antes de llegar a la boca o portal de salida del túnel. El aumento lineal de la luminancia podrá realizarse escalonadamente de forma que la relación entre escalones no exceda de la relación 3:1 en una longitud, como mínimo, igual a la distancia de seguridad (DS).

En los casos de túneles unidireccionales cuyas clases de alumbrado sean 1 a 5 ambas inclusive, la zona de salida tendrá la misma luminancia que la zona del interior del túnel ($L_{ex} = L_{in}$), no requiriéndose alumbrado adicional sobre el previsto en la zona del interior. No obstante, con independencia de la clase de alumbrado que corresponda al túnel, en ciertos casos particulares de túneles unidireccionales, donde existan serios riesgos de molestia y deslumbramiento a la salida, debido por ejemplo a la orientación del túnel o a las incomodidades ocasionadas por la salida y ocaso del Sol, deberá reforzarse el alumbrado de la zona de salida del túnel en las condiciones establecidas para los de clase de alumbrado 6 y 7.

13.2.5. Uniformidad de la luminancia de la calzada

En los túneles, la calzada y las paredes actúan como delimitadores o guías visuales para el tráfico de vehículos, de ahí que deba alcanzarse una buena uniformidad en la calzada y en las paredes de los túneles hasta una altura de 2 m.

En la Tabla 12 se establecen los valores mínimos en servicio con mantenimiento de la instalación de la uniformidad global y longitudinal de luminancias en las calzadas de los túneles, en todas sus zonas, es decir, en la longitud total de los mismos y la anchura completa de la calzada, en función de la clase de alumbrado.

UNIFORMIDADES DE LUMINANCIA DE LA SUPERFICIE DE LA CALZADA

CLASE DE ALUMBRADO	UNIFORMIDADES	
	Global U_0	Longitudinal U_1
1-2-3	0,3	0,5
4-5-6-7	0,4	0,6

Tabla 12

13.2.6. Limitación del deslumbramiento

Dado que el deslumbramiento reduce la visibilidad, es muy importante minimizarlo en el alumbrado de túneles. El deslumbramiento perturbador, definido como el incremento de umbral de contraste (TI) necesario para ver un obstáculo cuando hay deslumbramiento, se especifica mediante las siguientes expresiones:

$$TI = 65 \cdot \frac{L_v}{(L_m)^{0,8}} \quad \text{en \% para } 0'05 [L_m [5 \quad \text{cd/m}^2$$

$$TI = 95 \cdot \frac{L_v}{(L_m)^{1,05}} \quad \text{en \% para } L_m > 5 \quad \text{cd/m}^2$$

donde:

TI = Incremento de umbral correspondiente al deslumbramiento perturbador.

L_v = Luminancia de velo total en cd/m^2 .

L_m = Luminancia media de la calzada en cd/m^2 .

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

13.2.7. Control del efecto Flicker

La sensación de parpadeo o efecto Flicker es la impresión molesta e incómoda producida por las variaciones periódicas de la luminancia en el campo de visión. Tales sensaciones se experimentan cuando se conduce un vehículo a través de cambios periódicos espaciales de luminancia, como los producidos por las luminarias instaladas en las paredes o techos de los túneles cuando existe una separación inadecuada entre las mismas, con una elevada velocidad de cambio en la distribución de la

intensidad luminosa.

La incomodidad visual experimentada por el conductor debida al parpadeo o efecto Flicker depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- Número de cambios de la luminancia por segundo (frecuencia de parpadeo o Flicker).
- Duración total del efecto Flicker.
- Velocidad de cambio de claro a oscuro, en un solo ciclo.
- Relación de pico-luz a valle-oscuridad, dentro de cada periodo (profundidad de modulación de luminancia).

La influencia de los tres primeros puntos, dependen de la velocidad del vehículo y de la separación entre luminarias; el último punto depende también de las características fotométricas (distribución de la intensidad luminosa) e interdistancia entre luminarias.

Cuando la distancia entre los extremos de las luminarias adyacentes es inferior a la longitud de una sola luminaria, el tercer punto relativo a la velocidad de cambio de claro a oscuro queda minimizado, y el parpadeo o efecto Flicker percibido resulta despreciable, debido a que la implantación de la instalación de alumbrado puede asimilarse a una línea continua.

Para calcular la frecuencia de parpadeo o Flicker en una zona del túnel, se divide la velocidad del tráfico en metros/segundo por la separación entre luminarias en metros.

Ejemplo:

$$v = 60 \text{ Km/h.} = 16'6 \text{ m/s.}$$

$$\text{Separación entre luminarias} = 4 \text{ m.}$$

$$\text{Frecuencia de parpadeo o Flicker} = 16'6 / 4 \approx 4'2 \text{ Hz.}$$

Deben evitarse frecuencias de parpadeo o Flicker (variación de la luminancia), comprendidas entre 2'5 Hz. y 15 Hz. a la velocidad de circulación durante más de 20 segundos, dado que el efecto de parpadeo puede despreciarse para frecuencias por debajo de 2'5 Hz. y por encima de 15 Hz.

13.2.8. Alumbrado nocturno

Si el túnel se encuentra en un tramo de carretera iluminado, el alumbrado nocturno del túnel debe ser al menos igual al de la carretera de acceso, recomendándose de 1'5 a 2 veces los valores del tramo exterior, en lo que respecta al nivel de luminancia de la superficie de la calzada. Las uniformidades de luminancia por la noche deberán satisfacer las mismas exigencias que en el caso del alumbrado diurno, ajustándose, por tanto, a los valores mínimos establecidos en la Tabla 12. Todo lo anterior será igualmente de aplicación para túneles de 100 m. de longitud que no estén iluminados durante el día.

En el caso de túneles que se encuentran situados en una sección de carretera que no está iluminada, además de instalar alumbrado en el túnel de acuerdo con lo establecido en el párrafo anterior, la vía posterior a la salida del túnel debe iluminarse en una longitud igual a 2 veces la distancia de seguridad (DS) y como mínimo en un recorrido de 200 m., con una luminancia media superior a 1/3 de la luminancia de la calzada en la zona de salida del túnel.

El alumbrado nocturno en los tramos de parálumenes o pantallas para luz diurna en la zona de entrada y/o salida del túnel, será igual al de la zona del interior del túnel. En el supuesto de que por razones de seguridad se instale y funcione un sistema de vigilancia del tráfico de vehículos mediante cámaras de televisión, el nivel nocturno mínimo será de 1 cd/m².

Para el alumbrado nocturno general de todas las zonas del túnel, el valor mínimo en servicio con mantenimiento de la instalación de la luminancia media de la calzada será establecido en la Tabla 13.

LUMINANCIAS EN cd/m² DEL ALUMBRADO NOCTURNO

CLASE DE ALUMBRADO	LUMINANCIA MEDIA cd/m ²
1-2	0,5
3-4-5-6-7	1

Tabla 13

13.3. Iluminación de túneles cortos y pasos inferiores

Los túneles cortos y los pasos inferiores presentan la disyuntiva de dotarlos o no de alumbrado diurno. Una vez resuelto el dilema en el sentido de requerir dicha instalación, debe decidirse el tipo de alumbrado diurno a implantar, bien limiyado, completo o de las mismas características que los túneles largos.

El factor crítico para establecer alumbrado diurno viene determinado por la certeza o no de que, los conductores de los vehículos que se aproximan al túnel y se encuentran a una distancia igual a la de seguridad (DS), vean los vehículos y, en su caso, los peatones que atraviesan el mismo.

Asimismo, la exigencia de alumbrado artificial diurno está relacionada con el grado en el que la salida del túnel corto o paso inferior es visible para un conductor situado enfrente de la entrada, a la distancia de seguridad (DS), es decir, la visión a través de túnel que depende de los siguientes factores:

- Longitud del túnel.
- Existencia de curvas en su interior.
- Presencia de pendientes o rampas en el túnel.

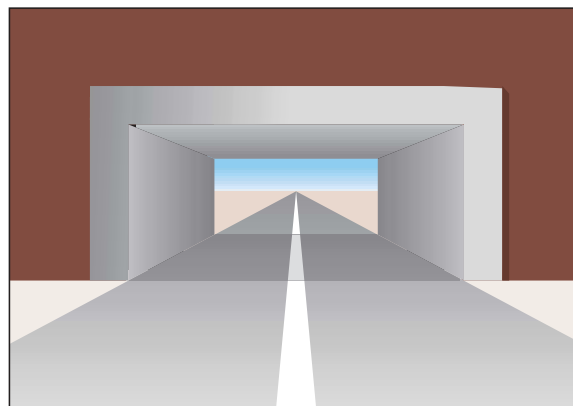


Figura 7. Vista de un túnel corto con un marco o fondo oscuro.

Los pasos inferiores y túneles cortos menores de 25 metros de longitud, normalmente no requieren la instalación de alumbrado diurno. Cuando la longitud del túnel corto es algo superior a 25 metros, el fondo oscuro constituido por las paredes y techo del túnel, así como por la propia calzada, puede ocultar la visión de los vehículos y, en su caso, de los peatones que lo atraviesan (véase Fig. 7), lo que impide su percepción. En este caso debe instalarse alumbrado diurno en el túnel o paso inferior.

13.3.1. Diagramas guía para túneles cortos

Con la finalidad de proporcionar una guía que permita ayudar en la decisión de instalar o no alumbrado diurno en los túneles cortos y pasos inferiores, así como en su caso, optar por el tipo de alumbrado diurno a implantar, se establece una clasificación de cuatro tipos de túneles cortos para cada uno de los cuales se detalla un diagrama guía.

Túneles cortos tipo A – Tabla 14.

Túneles situados en entornos urbanos o periurbanos en vías de tráfico (excluidas autopistas y autovías), frecuentemente dotadas de alumbrado público y cuya velocidad de circulación está limitada entre 40 y 60 Km/h.

Longitud (m)	< 25	25 a 75		75 a 125		> 125
¿Salida visible?	–	SI	NO	SI	NO	–
Alumbrado requerido	No se requiere alumbrado diurno		Alumbrado diurno limitado		Alumbrado de túnel largo	

Alumbrado diurno de túneles tipo A, urbanos o periurbanos cortos (excluidas autopistas y autovías), con velocidad de circulación limitada entre 40 v 60 km/h.

Tabla 14

Túneles cortos tipo B – Tabla 15.

Túneles interurbanos bidireccionales, considerando un volumen de tráfico denso cuando la intensidad media diaria de los vehículos que circulan es superior a 5.000 (IMD > 5.000).

Longitud (m)	0 a 80	81 a 120				121 a 150		> 150
¿Salida visible?	–	SI		NO		SI	NO	–
Velocidad ≤ 80 Km/h	–	SI	NO	SI	NO	–	–	–
Volúmen de tráfico	–	–	Ligero Denso	–	Ligero Denso	–	–	–
Alumbrado requerido	No se requiere alumbrado diurno		Alumbrado diurno limitado		Alumbrado diurno completo		Alumbrado de túnel largo	

Alumbrado diurno de túneles tipo B, urbanos bidireccionales cortos (volumen de tráfico denso cuando IMD > 5.000).

Tabla 15

Túneles cortos tipo C – Tabla 16.

Túneles interurbanos unidireccionales (autopistas y autovías), estimando un volumen de tráfico denso cuando la intensidad media diaria de los vehículos que circulan es superior a 10.000 (IMD > 10.000).

Longitud (m)	0 a 100	100 a 150				151 a 200		> 200
¿Salida visible?	–	SI		NO		SI	NO	–
Velocidad ≤ 80 Km/h	–	SI	NO	SI	NO	–	–	–
Volúmen de tráfico	–	–	Ligero Denso	–	Ligero Denso	–	–	–
Alumbrado requerido	No se requiere alumbrado diurno		Alumbrado diurno limitado		Alumbrado diurno completo		Alumbrado de túnel largo	

Alumbrado diurno de túneles tipo C, urbanos unidireccionales cortos de autopistas y autovías (volumen de tráfico denso cuando IMD > 10.000).

Tabla 16

Túneles cortos tipo D – Tabla 17.

Túneles interurbanos con tráfico de baja velocidad (límite de velocidad considerablemente menor de 80 Km/h.), y un volumen de tráfico notablemente inferior a una intensidad media diaria de 5.000 vehículos (IMD < 5.000).

Longitud (m)	0 a 100	101 a 150		151 a 200		> 200
¿Salida visible?	–	SI	NO	SI	NO	–
Alumbrado requerido	No se requiere alumbrado diurno		Alumbrado diurno limitado		Alumbrado diurno completo	Alumbrado de túnel largo

Alumbrado diurno de túneles tipo D, interurbanos cortos con tráfico de baja velocidad (menor de 80 Km/h) y volumen de tráfico inferior a 5.000 vehículos (IMD < 5.000).

Tabla 17

Para cada tipo de túnel corto en los diagramas guía y en su parte izquierda, se hacen constar las cuatro cuestiones siguientes: longitud, visibilidad de la salida, velocidad y volumen de tráfico.

- Longitud (m): Se establecen para cada diagrama guía cuatro órdenes de longitudes de túneles cortos o pasos inferiores, expresadas en metros.
- ¿Salida visible?: En cada diagrama guía se considera, cuando el conductor del vehículo que se acerca al túnel y se encuentra, como mínimo, a una distancia igual a la de seguridad (DS) antes de la entrada del mismo, si es o no visible la salida del túnel o paso inferior.
- Velocidad [80 Km/h: En los diagramas guía 2 y 3, correspondientes a los túneles tipo B y C, se contempla si la velocidad de diseño del túnel o paso inferior es mayor o menor que 80 Km/h. La velocidad de diseño es muy importante en relación a la distancia de seguridad (DS), así como respecto al riesgo de accidentes y a la gravedad de los mismos.
- Volumen de tráfico: Se tiene en cuenta en los diagramas guía 2 y 3 el volumen de tráfico, que puede clasificarse en ligero y denso.

En el diagrama 2 correspondiente a túneles cortos tipo B (interurbanos bidireccionales), se valora que el volumen de tráfico es denso cuando la intensidad media diaria de los vehículos que circulan es superior a 5.000 (IMD > 5.000).

En el diagrama 3, que hace referencia a túneles cortos tipo C (interurbanos unidireccionales de autopistas y autovías), se estima que el volumen de tráfico es denso cuando la intensidad media diaria de los vehículos que circulan es superior a 10.000 (IMD > 10.000).

Se establecen 4 diagramas que constituyen una guía que tiene un carácter orientativo, y proporciona una ayuda para decidir si el túnel corto o paso inferior necesita o no dotarse de alumbrado diurno, y si lo precisa, se detalla que tipo de alumbrado debe adoptarse.

Si, por ejemplo, se presenta el caso de un túnel corto de 120 metros de longitud, situado en una carretera interurbana con tráfico de baja velocidad ($v < 60$ Km/h.) y con una intensidad media diaria IMD < 3.000, y se necesita decidir si debe dotarse o no de alumbrado diurno y, en el caso de requerirlo se precisa determinar el tipo de alumbrado a instalar, la forma de operar es la siguiente:

Siguiendo el diagrama guía nº 4, se sitúa el túnel dentro del intervalo de longitudes que le corresponden, es decir, entre 101 y 150 metros.

Se contesta la segunda cuestión ¿salida visible?. En caso afirmativo, de acuerdo con el diagrama 4, no se requiere alumbrado diurno. Si la respuesta es negativa, debido a la existencia de curvas o pendientes en el interior del túnel, se instala alumbrado diurno limitado.

En el supuesto del mismo túnel corto pero con una longitud de 170 metros, de conformidad con el diagrama 4, las dos únicas alternativas en el caso de que la salida del túnel sea o no visible, son respectivamente la instalación de alumbrado diurno limitado o diurno completo.

Los diagramas constituyen una guía práctica que, en cada caso concreto, deberá ser adaptada al tipo de carretera teniendo en cuenta:

- La configuración real del túnel y de su carretera de acceso y salida.
- El volumen y la composición de tráfico bien motorizado o mixto que incluye vehículos pesados y ligeros, ciclistas, peatones, etc.

Además de considerar a título orientativo los diagramas guía, para el diseño, funcionamiento y mantenimiento del alumbrado de túneles cortos y pasos inferiores, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones técnicas y económicas:

- Efectuar un análisis cuidadoso del riesgo de accidentes y de la seguridad en relación a la iluminación (calidad y cantidad).
- Estudiar la señalización conveniente frente a la entrada del túnel, especialmente en lo relativo a la velocidad límite, encendido de los faros de los vehículos, etc.

- Realizar un examen meticuloso de los costes de instalación y explotación anual del alumbrado, incluidos los costes de funcionamiento, mantenimiento y trabajos de reparación en relación a la seguridad y comodidad proporcionada por dicha instalación (binomio coste/beneficio).

13.3.2. Tipos de alumbrado en túneles cortos

Tal y como se ha establecido en los cuatro diagramas guía, además de alumbrado de noche, las situaciones que se pueden presentar para el alumbrado diurno en túneles cortos son las siguientes:

- Sin exigencia de alumbrado.
- Alumbrado diurno limitado.
- Alumbrado diurno completo.

13.3.2.1. Sin exigencia de alumbrado diurno

Cuando las exigencias de alumbrado para túneles cortos no son importantes y, por tanto, no se requiere alumbrado diurno.

13.3.2.2. Alumbrado diurno limitado

Se denomina así dado que está en funcionamiento solamente durante una parte del tiempo, es decir, únicamente se encuentra en servicio el alumbrado diurno durante periodos en los que la penetración de la luz solar diurna no proporciona un fondo de luminancia suficientemente elevada, para permitir que actúe el efecto silueta. Tales condiciones pueden plantearse después del crepúsculo, antes del amanecer y en días nublados.

En el alumbrado diurno limitado, la luminancia media en servicio de la calzada con mantenimiento de la instalación será 3 veces la luminancia de la zona del interior del túnel ($3.L_{in}$), de acuerdo con lo establecido en la Tabla 11, ó de 15 cd/m^2 , debiéndose adoptar la mayor cifra de las dos.

Por la mañana, el alumbrado diurno limitado deberá encenderse media hora después de la salida del Sol y apagarse cuando la luminancia en la zona de acceso L_{20} sobrepase las 150 cd/m^2 ($L_{20} > 150 \text{ cd/m}^2$). Por la tarde, se encenderá cuando la luminancia en la zona de acceso L_{20} descienda por debajo de 150 cd/m^2 ($L_{20} < 150 \text{ cd/m}^2$) y se efectuará el apagado media hora antes de la puesta de Sol.

13.3.2.3. Alumbrado diurno completo

El alumbrado diurno completo es el que está en funcionamiento durante el periodo diurno total. Básicamente los túneles cortos que se asemejan a túneles largos deben ser iluminados como éstos últimos. En consecuencia, el alumbrado diurno completo será constante a lo largo de toda la longitud del túnel, con los niveles de luminancia requeridos en la zona de umbral de los túneles largos, deducidos del factor k establecido en la Tabla 10, de conformidad con la clase de alumbrado que le corresponda (Tabla 7).

13.3.2.4. Alumbrado de noche

Para túneles cortos o pasos inferiores, mayores de 25 m., en los que las carreteras de aproximación están iluminadas, se requiere la instalación de alumbrado nocturno. El nivel de luminancia media en servicio de la calzada con mantenimiento de la instalación será, al menos igual, pero no mayor de 2 veces la luminancia de la carretera de aproximación.

13.4. Alumbrado de emergencia

En este punto la norma establece que cuando el túnel sufra un fallo de alimentación de corriente se debe disponer de un sistema de alimentación de emergencia y un sistema de alumbrado de emergencia.

El alumbrado de emergencia debe cubrir la longitud total del túnel y el nivel de luminancia de ser al menos del 10% de la luminancia interior ó $0,2 \text{ cd/m}^2$ (se elige el mayor).

En los túneles de clase de iluminación de $3 \div 7$, se requiere un sistema de alumbrado para el guiado de emergencia contra incendio

(se precisa siempre que desde cualquier posición no es visible al menos una salida).

La situación de estas luminarias será en la pared a una altura de 0,50 m de la calzada y con una separación inferior a 50 m.

13.5. Mantenimiento

El factor de mantenimiento utilizado en los estudios de iluminación cubren normalmente la depreciación de luminaria (ensuciamiento) y lámpara (pérdida de flujo luminoso).

En el caso de los túneles que son instalaciones con un alto grado de polución atmosférica, es muy importante disponer de un programa de mantenimiento (limpieza de paredes y luminarias) que defina los ciclos de limpieza que permitan cumplir el factor establecido en el estudio.

La norma recomienda utilizar un factor de mantenimiento de 0,7 para definir el valor del nivel medio de luminancia de calzada y 0,5 para el de las paredes.

La reposición de lámparas se realizará cuando el nivel medio esté por debajo del establecido o la falta de uniformidad resulte inaceptable.

13.6. Control de encendidos

En este tipo de instalaciones es importante disponer de un sistema de control automático, teniendo en cuenta que los niveles de la zona umbral y transición están establecidos en función de la luminancia de la zona de acceso.

Cuando varían las condiciones externas (diurnas) es preciso modificar los niveles de estas zonas para mantener la calidad de los criterios de diseño utilizados en este estudio de iluminación.

13.7. Alumbrado noche (zona exterior túnel)

La zona de salida del túnel la calzada exterior debe estar iluminada en una longitud igual a dos veces la distancia de parada (no mayor a 200 m.), con un nivel medio superior a 1/3 de la zona de salida del túnel. En el túnel que nos ocupa para que el diseño sea un poco más conservativo, las zonas de acceso al túnel se extenderán de 200 a 250 m.

En la instalación que nos ocupa se instalan en la zona de acceso luminarias con lámpara de 250W sodio alta presión tubular, en postes de 12 m. de altura en disposición unilateral a una interdistancia entre luminarias de 30 m.

Cuando en las zonas de entrada o salida del túnel existan pantallas solares el nivel de iluminación será igual al de la zona interior del túnel.

13.8. Diseño del alumbrado de túneles

Respecto a las tablas guía para túneles cortos especificados en el apartado 13.3., de este capítulo, constituyen solamente una guía que deberá ser adaptada al tipo concreto de túnel y carretera de acceso y salida.

Los pasos inferiores bajo carreteras o ferrocarriles, menores de 25 m. de longitud, constituyen los tramos mínimos de carretera cubierta que se presentan habitualmente. Dada la pequeña longitud, normalmente no es necesaria la instalación de alumbrado durante el día. Al objeto de facilitar la entrada de la luz solar diurna en el interior del túnel corto o paso inferior, resulta conveniente llevar a cabo, cuando sea posible, las siguientes medidas:

- Construir la boca del túnel más elevada.
- Revestimiento de color blanco (recubrimiento especular) en las paredes del túnel.
- Instalar claraboyas en el techo del túnel.

TÚNELES CORTOS

TIPOS DE TÚNELES	TIPO A DIAGRAMA-1	TIPO B DIAGRAMA-2	TIPO C DIAGRAMA-3	TIPO D DIAGRAMA-4
Longitud	< 25 25 a 75 75 a 125 > 125	< 80 80 a 120 120 a 150 > 150	< 100 100 a 150 150 a 200 > 200	< 100 100 a 150 150 a 200 > 200
¿Salida visible?	SI	SI	SI	SI
	NO	NO	NO	NO
Velocidad < 80 km/h		SI	SI	
		NO	NO	
Volúmen tráfico		LIGERO	LIGERO	
		DENSO	DENSO	

* En los túneles tipo B el volúmen de tráfico es denso cuando IMD > 5.000.

** En los túneles tipo C el volúmen de tráfico es denso cuando IMD > 10.000.

Tabla 18

Si está previsto alumbrado en la carretera, éste se implantará de forma que se asegure una penetración adecuada de la iluminación dentro del túnel corto o paso inferior.

El contenido de los diagramas guía para túneles cortos y pasos inferiores detallados en el apartado 13.3. se resumen en la tabla anterior.

Es importante una elevada reflectancia de paredes para aumentar el brillo del fondo contra el que los objetos pueden ser vistos. En los túneles cortos, donde la salida no es visible desde la distancia de seguridad (DS) enfrente de la entrada del túnel, la reflectancia de paredes es particularmente importante, debido a que una reflectancia de pared elevada asegurará que una gran proporción del alumbrado diurno que penetra por la boca de salida, se refleje hacia los conductores. Las paredes con una reflectancia difusa, en servicio, de más del 40%, son denominadas como ELEVADA y las paredes de menos de del 40% de reflectancia, son denominadas como BAJA (debe tenerse en cuenta el factor de depreciación o mantenimiento).

En cualquier túnel, las paredes deben estar cubiertas por un revestimiento blanco de hasta 2 m. de altura, con una superficie lisa y una reflectancia especular elevada en servicio o mantenida. La parte inferior hasta 0'50 m. y las aceras laterales, pueden ser ennegrecidas o pintadas de color negro, fundamentalmente cuando el revestimiento de la calzada es claro o blanco, debido a las necesidades de conducción de los vehículos con un buen contraste mantenido, a fin de mejorar la percepción total. Cuando la reflectancia de las paredes se califica como BAJA, la longitud señalada en cada uno de los 4 diagramas guía debe ser reducida en un 20%.

El grado de penetración de luz diurna en la salida también es importante. Así, un túnel con una gran sección transversal, por ejemplo, de tres carriles o más de anchura, y una salida en terreno plano o con pendiente descendente y mirando al sur, admitirá un máximo de luz diurna y contribuirá considerablemente a la visibilidad en el túnel. Por otro lado, la penetración de la luz diurna puede ser pobre cuando el túnel sea de dos carriles o menos, en el caso de que la salida esté situada en un corte o se encuentre rodeada por edificios altos, así como cuando la carretera tenga pendiente ascendente desde la salida o en el supuesto de que la salida mire al norte. La importancia de la penetración de la luz diurna en la salida disminuye con la longitud del túnel. Cuando la penetración de la luz diurna es BUENA, la longitud indicada en cada uno de los 4 diagramas guía debe ser incrementada hasta en un 20%.

En lo que se refiere a la geometría del túnel y sus carreteras de acceso, el diseño del alumbrado del túnel debe seguir el recorrido más conservador en cada diagrama guía. Lo mismo debe hacerse:

- Cuando el túnel presenta en primer lugar una pendiente y luego una rampa (cambios en curvatura vertical).
- Cuando hay discontinuidades o singularidades geométricas.

En el caso de que el túnel presente una mala percepción total, el diseño del alumbrado debe seguir un trayecto conservador en cada uno de los 4 diagramas guía.

Es necesario un análisis específico, cuando el transporte de mercancías peligrosas sea frecuente. En este caso, el diseño del alumbrado

en el túnel debe llevarse a cabo optando por la trayectoria más conservadora en cada uno de los diagramas guía.

13.9. Guiado visual

Al circular por el interior del túnel el conductor de un vehículo debe poseer la información adecuada. Esto puede conseguirse dividiendo la superficie longitudinal del túnel en varias superficies de contraste, como por ejemplo dejando las paredes del túnel claras y el techo oscuro. El guiado visual resulta de especial importancia cuando se aproxima el usuario conduciendo el vehículo al túnel y, particularmente, si el nivel luminoso de la zona de entrada es bajo. En la Tabla 4 se han establecido los factores de ponderación para un guiado visual pobre o bueno.

13.9.1. Guiado visual para túneles largos

En los túneles de las clases de alumbrado 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (Tabla 7), con independencia de la señalización vertical, debe cuidarse especialmente una adecuada señalización horizontal.

En la valoración de los factores de ponderación en función del guiado visual (Tabla 5), se considerará la instalación adicional de dispositivos retrorreflectantes (balizamiento, captafaros, hitos, etc.) en las paredes del túnel y en la superficie de la calzada, especialmente en el caso de túneles que correspondan a las clases de alumbrado 5, 6 y 7 (Tabla 7).

13.9.1.1. Guiado visual en la zona de entrada para túneles. Clase de alumbrado 1

En la zona de entrada de los túneles clase de alumbrado 1 (Tabla 7), deben instalarse en los primeros 75 m., como mínimo 5 luminarias cuyas intensidades luminosas hacia el conductor se ajustarán a lo dispuesto en la Tabla 19. Puede ser necesario inclinar las luminarias, al objeto de lograr las intensidades luminosas especificadas en la Tabla 19.

TABLA I
INTENSIDADES LUMINOSAS EN LA ZONA DE ENTRADA DE TÚNELES
CLASE DE ALUMBRADO 1

ÁNGULO	$80^\circ < \gamma < 87,5^\circ$		$\gamma = 87,5^\circ$	
	INTENSIDAD (cd)		INTENSIDAD (cd)	
TIEMPO	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.
Durante el día	300	800	—	400
Durante la noche	8	50	—	25

Tabla 19

Con el fin de asegurar un guiado visual adecuado, la separación entre luminarias no deberá ser mayor de 25 m. En túneles en curva siempre serán visibles como mínimo 4 luminarias, por lo que la separación entre luminarias podrá ser reducida.

13.9.1.2. Guiado visual en la zona del interior para túneles. Clase de alumbrado 1

En la zona del interior de los túneles clase de alumbrado 1 (Tabla 19), las luminarias instaladas tendrán unas intensidades luminosas hacia el conductor que cumplirán lo establecido en la Tabla 20.

TABLA II
 INTENSIDADES LUMINOSAS EN LA ZONA DEL INTERIOR DE TÚNELES
 CLASE DE ALUMBRADO 1

ÁNGULO	$80^\circ < \gamma < 87,5^\circ$		$\gamma = 87,5^\circ$	
TIEMPO	INTENSIDAD (cd)		INTENSIDAD (cd)	
	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.
Día y noche	8	50	—	25

Tabla 20

13.9.2. Guiado visual para túneles cortos

Los túneles cortos o pasos inferiores que carecen de instalación de alumbrado, requieren una buena señalización tanto vertical como horizontal. Podrán utilizarse las siguientes disposiciones para el guiado visual:

- Marcas retrorreflectantes en la calzada.
- Sistema de balizamiento retrorreflectante (captafaros, hitos, etc.) en la calzada.
- Marcas y balizamiento retrorreflectantes en las paredes.
- Diodos fotoemisores o emisores de luz.