



CAPÍTULO 15. ILUMINACIÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE
SERVICIOS TÉCNICOS

CAPÍTULO 15. ILUMINACIÓN



Túnel El Sinaloense, Carretera Durango-Mazatlán

15.1. INTRODUCCIÓN

Los túneles carreteros constituyen un elemento fundamental en la comunicación global del país. Su evolución e importancia han ido creciendo con el auge de la infraestructura carretera del país.

Los sistemas de iluminación son parte esencial en las instalaciones de seguridad de los túneles y por ello, los responsables del proyecto y construcción de los mismos deben tener pleno conocimiento de la actualización y modernización de dichos sistemas para lograr una máxima seguridad, confort visual, eficiencia y bajo costo de operación y mantenimiento.

La conducción de vehículos a través de los túneles durante las horas diurnas plantea una problemática diferente a la conducción al aire libre por la noche, ya que se concreta fundamentalmente en las diferencias existentes entre los elevados niveles de luminancia exteriores y los bajos niveles de luminancia en el interior de los túneles. El objetivo del alumbrado en túneles carreteros es garantizar que el tráfico existente durante el día y la noche pueda aproximarse, atravesar y salir de un túnel a la velocidad apropiada, con un grado de seguridad y confort en proporción con el de los tramos de la troncal.

Para ello, los usuarios de la calzada deben tener suficiente información relativa a la trayectoria de ésta, a los posibles obstáculos y especialmente información relativa a la presencia y movimiento de otros vehículos.

El fenómeno de adaptación se manifiesta a medida que el conductor se interna en el túnel, donde se produce un cambio de iluminación y la retina tiene que adaptarse a estas nuevas condiciones de luminancia. Esto hace que, a la entrada de un túnel si no está bien iluminada, aparezca el efecto de agujero negro, con lo que no será visible para el conductor ningún detalle del interior.



Figura 15.1. Efecto de agujero negro.

Además, todo el entorno iluminado de un túnel debe ofrecer a los usuarios y en particular a los conductores de vehículos motorizados, una sensación de seguridad no inferior a la experimentada en la calzada adyacente al aire libre, de lo contrario, es probable que el tráfico se alente repentinamente creando con ello una situación peligrosa. Al cambio brusco de luminancia no le sigue una adaptación simultánea de la sensibilidad del ojo. A este tiempo en el que no se perciben con claridad los objetos se le denomina tiempo de adaptación.

El fenómeno de inducción relaciona la sensibilidad de cada parte de la retina con la iluminación que recibe del resto de ella. Este fenómeno se conoce como deslumbramiento por contraluz, y hace que no se pueda ver un objeto dentro de una distribución de luminancias, aunque se esté observando durante largo tiempo.



Figura 15.2. Luminancia al interior del túnel.

Las principales características fotométricas necesarias para describir la calidad de alumbrado de túneles son:

- Características de aproximación de la vialidad
- Características de la superficie rodante del túnel, paredes y techo
- Características del área circundante en la entrada del túnel
- Condiciones atmosféricas y ambientales
- Características de operación del tráfico
- Orientación del túnel con respecto al sol
- El nivel de luminancia de la calzada
- El nivel de luminancia de las paredes, en particular hasta los 2 metros de altura por encima de la superficie de la calzada.
- La uniformidad de la distribución de luminancias de la calzada y las paredes
- El control de deslumbramiento
- La restricción del efecto de parpadeo.

15.2. DEFINICIONES RELACIONADAS CON EL ALUMBRADO DE TÚNELES

Los principales términos empleados en este campo de la ingeniería son los siguientes: (NORMA UNE-CR_14380:2007)

UNE: Acrónimo de Una Norma Española.

Portal de entrada: La parte de la construcción del túnel que corresponde al comienzo de la parte cubierta del túnel o cuando se usan pantallas para el sol abiertas, al comienzo de las pantallas para el sol.

Portal de salida: El final de la parte cubierta del túnel o, cuando se usan pantallas para el sol abiertas, el final de las pantallas para el sol.

Adaptación: Proceso por el cual la sensibilidad de la retina del ojo se ajusta para aumentar o disminuir la luz hasta el nivel necesario. La sensibilidad resultante de la retina es el límite al estado de adaptación. La iluminancia que provoca este estado de adaptación es el límite del nivel de adaptación.

Candela por metro cuadrado: Unidad de luminosidad fotométrica del S.I. Una superficie perfectamente difuminada de luz emitida o reflejada en el rango de un lumen por metro cuadrado.

Candela: Unidad de intensidad luminosa en el S.I. de unidades. Una candela (cd) es un lumen por metro cuadrado.

Capacidad de tráfico: El flujo de tráfico máximo practicable en unas circunstancias determinadas.

Coefficiente de contraste q_c : El coeficiente de contraste q_c en una ubicación determinada del túnel es la relación entre la luminancia de la superficie de la calzada y la iluminancia vertical E_v en esa ubicación $q_c = L/E_v$.

Donde q_c es el coeficiente revelador del contraste expresado en cd/m^2 . L^{ux} .

Deslumbramiento: Sensación producida por la luminosidad del campo visual que es más intensa que la luminosidad a la cual los ojos se adaptan, causando molestias o pérdidas de la capacidad visual.

Calzada: Parte de la carretera, usada normalmente para el tránsito de vehículos.

Carril: Una banda de la calzada, destinada a acomodar una única línea de vehículos que se mueven.

Distancia mínima de seguridad de frenado: Es la distancia necesaria para llevar a un vehículo, conducido de la velocidad de diseño a un alto total. Suele estar definida en la NOM-001-SEDE.

Flujo de tráfico: El número de vehículos que pasan por un punto determinado en un momento especificado en ambos sentidos.

Guía visual: Los medios ópticos y geométricos que garantizan que los usuarios reciban información apropiada en la trayectoria de la carretera dentro del túnel. La guía visual se refiere en particular a los aspectos de percepción y la guía óptica de los aspectos geométricos. La guía visual se suele utilizar como término general, teniendo en cuenta que también engloba la guía óptica.

Luminancia de la zona de acceso L_{20} : Es la luminancia media contenida en un campo de visión cónica, subtendiendo un ángulo de 20° con el vértice en la posición del ojo de un conductor que se aproxima y orientado al centro de la boca del túnel. L_{20} se calcula desde un punto situado a una distancia igual a la de Detención Mínima de Seguridad de Frenado (DMSF) desde el portal del túnel hasta la mitad de la carretera o carril correspondiente.

Iluminación vertical E_v : Es la luminancia en una ubicación determinada a una altura de 0.2 metros por encima de la superficie de la calzada, en un plano orientado con ángulos rectos a la dirección de llegada del tráfico. La altura de 0.2 metros por encima de la superficie de la calzada pretende representar el centro de un objeto de 0.4 x 0.4 metros.

Lumen: Unidad de medida de cuantificación de luz. Es la cantidad de luz que incide en un área de 1 pie², cada punto de los cuales está a 1 pie de una fuente de una candela.

Luminancia de la zona de umbral L_{th} : En una ubicación en particular, es la luminancia media de la superficie de la calzada de una banda transversal en esa ubicación y en la zona de umbral del túnel.

Luminancia de la zona de transición L_{tr} : En una ubicación determinada, es la luminancia media de la superficie de la calzada de una banda transversal en esa ubicación y en la zona de transición del túnel.

Luminancia de la zona central L_{in} : En una ubicación determinada, es la luminancia media de la superficie de la calzada de una banda transversal en esa ubicación y en la zona central del túnel.

Luminosidad: Flujo luminoso por unidad de área proyectada y unidad de ángulo sólido.

Lux: Iluminación que incide en una superficie de un metro cuadrado de área en el que se distribuye una potencia de luz uniforme de un lumen (lumen/m²).

Parpadeo: Resultado del cambio periódico de luminancia en el campo de visión, debido al espaciado entre los accesorios de iluminación.

Punto de adaptación: Punto de la carretera donde la adaptación del ojo de un conductor aproximándose a un túnel comienza a ser influenciada por la presencia de la oscura entrada del mismo.

Rayos contrarios: Técnica por la cual un control de luz direccional se utiliza en dirección opuesta a la del tráfico con el fin de proporcionar contraste negativo (la luminancia del objeto es menor que la del fondo).

Relación luminancia – zona de umbral, k: Es la relación entre la luminancia de la zona de umbral L_{th} y la luminancia de la zona de acceso L_{20} , $k = L_{th}/L_{20}$.

TDPA: Tráfico diario medio al año, expresado en vehículos/día, que pasa por un túnel en cuestión.

Tráfico mixto: Tráfico compuesto de vehículos motorizados. En algunos países, solo se incluyen los vehículos que son capaces de mantener una velocidad mínima. En otros, los ciclomotores no se consideran tráfico.

Uniformidad de la luminancia de la superficie de la calzada: Es la relación existente entre la más pequeña de las luminancias calculadas y la luminancia media. La uniformidad longitudinal se considera para cada carril de conducción y es la relación L_{\min}/L_{\max} a lo largo de la línea central de cada carril, suponiendo que el punto de observación se coloca en dicha línea central.

Alumbrado de emergencia de guiado contra incendios: proporciona guiado visual en caso de incendio y humo.

Pantallas para la luz natural para lúmenes: dispositivo que transmite (algo de) la luz natural ambiente y que pueden ser aplicados para el alumbrado en la zona de umbral y/o en la zona de entrada del túnel.

Pantallas que no dejan pasar el sol: pantallas que están construidas de tal modo que la luz solar directa no puede alcanzar nunca la superficie de la calzada o de las paredes bajo la pantalla.

Luminancia de velo equivalente L_{seq} : el velo de luz como resultado de la dispersión ocular, L_{seq} es cuantificado como una luminancia.

Luminancia atmosférica L_{atm} : el velo de la luz que resulta de la dispersión de la atmósfera expresado como una luminancia.

Luminancia del parabrisas L_{winds} : el velo de la luz que resulta de la dispersión en el parabrisas expresado como una luminancia.

15.3. TÚNEL, TIPOS Y CLASIFICACIÓN

15.3.1. Clasificación de túneles

Antes de abordar el tema de las instalaciones de alumbrado y sistemas especiales de un túnel se debe hacer un pequeño análisis de los tipos de túneles de carretera, según la norma, Orden Ministerial del 19 de Noviembre, Título V, Epígrafe V.2 “Túneles de carreteras” (Construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre, IOS-98) (España):

Túneles de nivel **III**: Túneles cortos o de poco tráfico que no requieren de ningún tipo de instalaciones específicas.

Túneles nivel **II**: Túneles que van a exigir un cierto tipo de instalaciones y de vigilancia particular con respecto al resto de trazado donde están inscritos (túneles de montaña y mediana longitud).

Túneles nivel **I**: Túneles en los que por sus condiciones especiales van a necesitar una organización específica permanente para el control y vigilancia de sus instalaciones (túneles de autopista, urbanos, etc.).

En México los túneles se clasifican según su longitud y para fines de alumbrado y sistemas de seguridad, en túneles cortos, medianos y largos.

Túneles cortos: Es el túnel recto cuya longitud total de un extremo a otro, a lo largo de su eje central, es igual o menor que la distancia mínima de seguridad de frenado.

Un túnel corto puede tener hasta 25 metros de largo, sin que necesite alumbrado durante el día, siempre que sea recto o el tráfico no sea muy intenso.

Túneles medianos: Con longitud mayor o igual a la distancia mínima de seguridad de frenado y menor de 400 metros.

Túneles largos: Es un túnel cuya longitud total es mayor que la distancia mínima de seguridad de frenado, o bien, aquel que por su alineación o curvatura impida observar al conductor la salida del mismo. En los túneles largos necesariamente existen zona de umbral, transición, interior y salida. Túneles con longitud mayor a 400 metros.

En función del flujo vehicular se distinguen:

Túnel unidireccional: Consiste en dos túneles separados, cada uno de los cuales está diseñado para el flujo de tráfico en una sola dirección. Este tipo de túnel puede ser de uno o varios carriles.

Túnel bidireccional: Consiste de un solo túnel común diseñado para el flujo de tráfico en ambas direcciones. En este tipo de túnel, el nivel de luminancia en la zona interior debe ser mayor que la correspondiente del túnel unidireccional.

Para cada nivel y longitud de túnel, el presente capítulo indica una relación de los tipos de instalaciones necesarias, incluidas las eléctricas.

15.3.2. Instalaciones en túneles

Las instalaciones en los túneles contienen las tres partes principales siguientes:

Instalaciones eléctricas, con el siguiente contenido:

Instalaciones de alumbrado, que comprende la iluminación tanto del propio túnel como de las zonas colindantes a él.

Instalaciones de fuerza que comprende desde el suministro de la C.F.E. hasta la subestación eléctrica.

Instalaciones complementarias, como son: la red de puesta a tierra, los cables eléctricos y sus canalizaciones.

Todas estas instalaciones se deberán desarrollar cumpliendo con la NOM-001-SEDE y las normas de C.F.E. y normativas aplicables, tanto a instalaciones como equipos.

Instalaciones de ventilación.

Instalaciones de control, seguridad y comunicaciones.

Sistema de detección de incendio.

Sistema de extinción de incendio.

15.4. ALUMBRADO

15.4.1. Características y zonas del túnel

Las condiciones de la carretera y del tráfico en los túneles pueden diferir considerablemente de aquellas que prevalecen en la carretera a cielo abierto o troncal. El diseño de las instalaciones de alumbrado de túneles deberá tener en cuenta estas condiciones diferentes, en particular en lo que se refiere a los aspectos de seguridad del tráfico.

Es necesario considerar el medir los niveles de luminancia del túnel después de concluir la instalación del alumbrado para asegurarse de que se han cumplido los requisitos de diseño.

Las principales ventajas del alumbrado de un túnel son:

- Evitar el contraste de luminosidad entre la zona exterior de acceso y la zona interior inicial, evitando en lo posible el efecto de “agujero negro”.
- Conseguir que el conductor disponga de suficiente información visual en la zona interior, de manera que pueda distinguir, no solo la dirección del tráfico, sino también la presencia o ausencia de obstáculos, el suficiente contraste y los posibles movimientos de los mismos.
- Para permitir a un conductor reaccionar y parar dentro de la distancia mínima de seguridad de frenado, si aparece un peligro inesperado.

15.4.1.1. Composición del tráfico

La composición del tráfico es importante para el alumbrado de túneles en varios aspectos:

- El porcentaje de camiones.
- La presencia/ausencia de bicicletas y/o motocicletas de pedales.
- La presencia/ausencia de peatones (en condiciones de no emergencia)
- La presencia/ausencia de autorización para permitir el tránsito de material peligroso.

El alumbrado debe adaptarse a estas circunstancias. Son necesarios mayores niveles o un alumbrado de mayor calidad para las paredes o la carretera para la tarea visual cuando las condiciones son más difíciles o más peligrosas.

Ante la falta de normativa, es aconsejable aplicar las directrices indicadas en las Recomendaciones del Comité Español de Iluminación CEI-26,88, etc., y, mejor aún, en la última edición de la Propuesta de Norma de la CE: CENT/TC 169 WG6 y Recomendaciones para la Iluminación de Carreteras y Túneles en España, editadas por el Ministerio de Fomento a finales de 1999 (indicadas en adelante por: Pr. N. CEN y Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles en España (RICTE) respectivamente), y con valores de luminancias en vez de con iluminancias. En este caso, se va a utilizar la RICTE como directriz a seguir.

Este capítulo se va a limitar al alumbrado simétrico, debido a que no se está tratando un túnel en particular; pues es sabido las limitaciones que conlleva el alumbrado a contraflujo (sólo recomendable en la zona de entrada de los túneles y para velocidades a partir de 90 km/h, no apto para túneles de dos sentidos de circulación, etc.), para una mayor información, se remite al lector a la RICTE. Asimismo, el contenido del capítulo está orientado a los túneles que se definen como largos (nivel II y sobretodo el nivel I de la IOS-98, anteriormente citada).

Para conseguir los objetivos de una buena iluminación, los túneles se dividen en varias zonas o tramos, de forma que el contraste y nivel de iluminación vaya disminuyendo de forma gradual, desde el exterior al interior, para permitir la adaptación visual del ojo humano, tal como se puede ver en la RICTE y que se muestra en la Figura 15.3.

Estas zonas y longitudes, de acuerdo a las recomendaciones de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), Pr. N. CEN y RICTE y velocidad de diseño del túnel (recomendándose 60, 80, 100 km/h, en función del tipo de carretera; no siendo aconsejables velocidades de diseño mayores), son:

Zona de acceso o aproximación: Es la zona de la carretera a cielo abierto o troncal que se encuentra adelante del portal del túnel y que abarca la distancia en que el conductor al aproximarse podrá ver el interior del túnel. Comienza en el punto de DMSF por delante del portal y termina en el portal.

Zona umbral: que constituye el primer tramo interior del túnel, donde más altos deben ser los valores luminosos a proporcionar por el alumbrado.

La longitud de esta zona depende de la velocidad de diseño del túnel, del deslumbramiento de velo, del tiempo de adaptación del ojo y de la DMSF.

Zona de transición: situada entre el umbral y la zona interior o central, donde paulatinamente van disminuyendo los niveles de iluminación hasta conseguir la adaptación del ojo del conductor. Su longitud es variable dependiendo también de la velocidad de circulación en el interior del túnel.

Zona Interior o Central: Esta zona es la siguiente a la de transición donde el nivel de iluminación se mantiene constante hasta la zona de salida al haberse acomodado la adaptación del ojo a las condiciones de iluminación interior del túnel. La longitud de esta zona es también variable y está condicionada a la longitud del túnel y al tipo de circulación de una o dos direcciones, pudiendo ocurrir que esta zona no exista al traslaparse las zonas de transición de los dos carriles en los túneles de doble dirección.

Zona de salida: que es la parte final interna del túnel, donde comienza a adaptarse la visión del conductor a las luminancias exteriores, por lo que necesita un mayor nivel de iluminación que la zona central. La longitud de esta zona depende también de la velocidad de circulación en el interior del túnel y su longitud es de aproximadamente 200 metros.

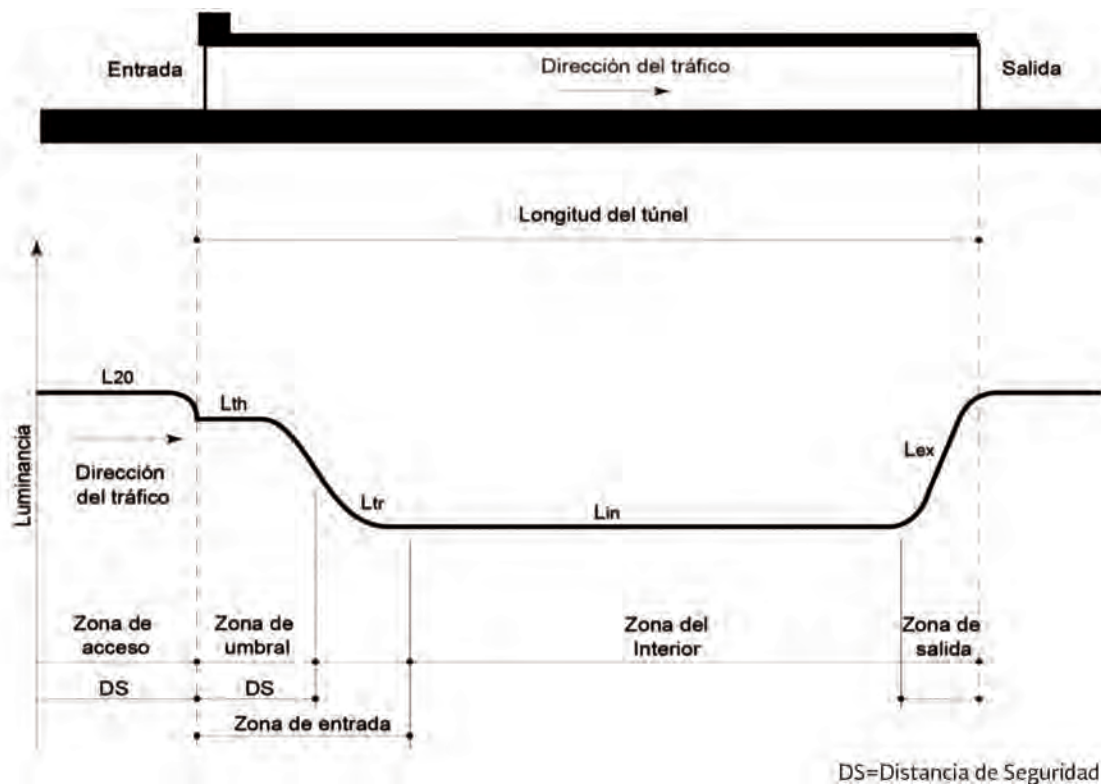


Figura 15.3. Sección longitudinal de un túnel largo.

15.5. RECOMENDACIONES IMPORTANTES

Antes de entrar a un túnel:

- El trazo debería mostrar claramente que uno se está aproximando a un túnel, esto debería apoyarse en señales pertinentes.
- Los portales deberían construirse con materiales oscuros a fin de reducir la luminancia de la zona de acceso.
- La carretera deberá presentar una superficie asfáltica negra hasta el portal.

Al entrar al túnel:

- Las orientaciones Este–Oeste pueden causar más problemas que las orientaciones Norte–Sur.
- Deben evitar superficies de color claro en los alrededores inmediatos del portal como edificios, muros, etc.
- Adoptar arboles u otras pantallas para evitar el deslumbramiento directo del sol.

Dentro del túnel:

- Si existen discontinuidades, rampas e intersecciones en el diseño geométrico, es aconsejable tratarlos especialmente por un sistema de alumbrado adecuado para cada situación.
- Adoptar una superficie de carretera de color claro que debería ser casi difusa para el alumbrado simétrico y más especular para el alumbrado a contraflujo.
- Adoptar y mantener buenas instalaciones de guiado (marcas en la carretera, delimitadores, etc.) a lo largo de la carretera.
- Adoptar alumbrado de señalización independiente cuando el túnel es iluminado por fuentes de luz monocromáticas.

A la salida:

- Adoptar, cuando pueda esperarse una situación de deslumbramiento fuera de la salida, obras de ingeniería civil o plantaciones que apantallen la luz solar directa.

15.6. DISTANCIA EN TÚNELES LARGOS Y CORTOS

Los requisitos o 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, pueda ver a través del túnel como se ve desde un punto situado a una distancia igual a la distancia mínima de seguridad de frenado, enfrente del portal del túnel. La capacidad de ver a través del túnel depende fundamentalmente de su longitud, pero también de otros parámetros de diseño (ancho, altura, curvaturas horizontal y/o vertical, etc.).



Figura 15.4. Alumbrado de túnel corto con curvatura.

Los túneles cortos normalmente ocurren cuando una carretera pasa por debajo de otra carretera o vía del ferrocarril o está cubierta en una corta distancia en situaciones urbanas. Los túneles menores de 25 metros no necesitan alumbrado durante el día (diurno).

Los túneles mayores de 200 metros siempre necesitan algún tipo de alumbrado artificial diurno para evitar problemas de adaptación para los usuarios de la carretera. Para túneles de longitud comprendidas entre 25 y 200 metros, se da un método para determinar si es necesario alumbrado diurno (Ver Tabla 15.1).

1. Longitud del túnel	< 25 m	25 m - 75 m	75 m - 125 m	> 125 m
2. Si la salidad del túnel está completamente visible desde la distancia de frenado enfrente del túnel		sí / no	sí / no	
3. Si la presentación de la luz es buena ó pobre		buena / pobre	buena / pobre	
4. Si la reflectancia de las paredes es alta (>0.4) ó es baja (<0.2)		alta / baja	alta / baja	
5. Si el tráfico es ligero o es pesado (o incluye ciclistas y peatones)		ligero / pesado	ligero / pesado	
Alumbrado de día para diferente largo de túneles	No hay alumbrado de día	50% del nivel de iluminación normal en la zona de umbral	Nivel de iluminación normal en la zona de umbral	

Tabla 15.1. Determinación del alumbrado en túneles cortos.

Otro método es producido por el Centro de estudios de túneles (CETU) puede ser encontrado en la siguiente referencia (CETU Dossier pilote de tunnels, Noviembre de 2000, Centre d'Étude des tunnels, Bron, France).

15.7. SISTEMAS DE ALUMBRADO

15.7.1. Alumbrado simétrico

Es el alumbrado en el que la luz incide igualmente sobre objetos en direcciones a favor y en contra del tráfico. El alumbrado simétrico está caracterizado por utilizar luminancias que muestran una distribución de intensidad luminosa que es simétrica en relación al plano normal a la dirección del tráfico.

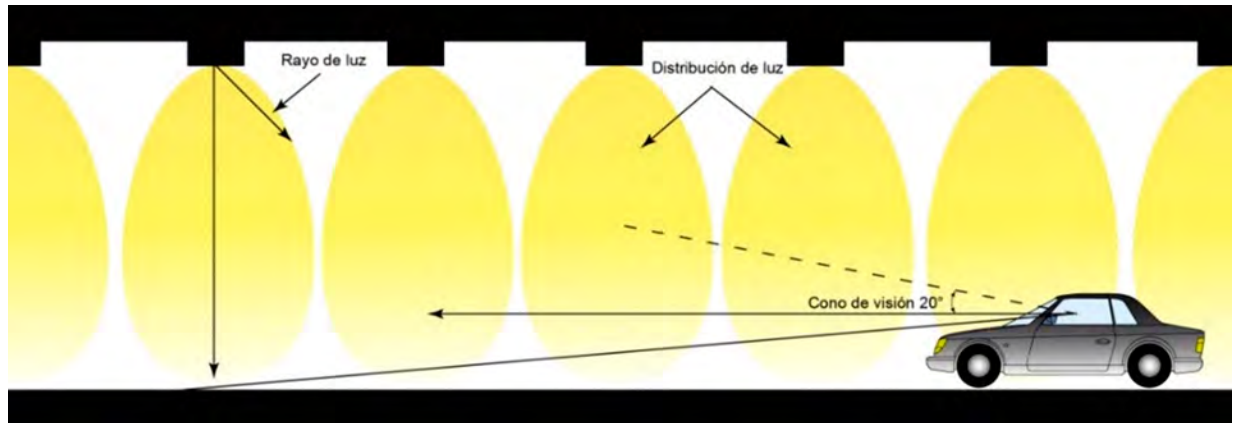


Figura 15.5. Sistema simétrico de iluminación.

15.7.2. Alumbrado a “contraflujo” (CBL)

Es aquel en el que la luz incide sobre los objetos desde una dirección opuesta al tráfico. El alumbrado a contraflujo está caracterizado por utilizar luminancias que muestran una distribución de intensidad luminosa que es asimétrica en relación al plano normal a la dirección del tráfico, en que la intensidad luminosa está orientada contra la dirección del tráfico.

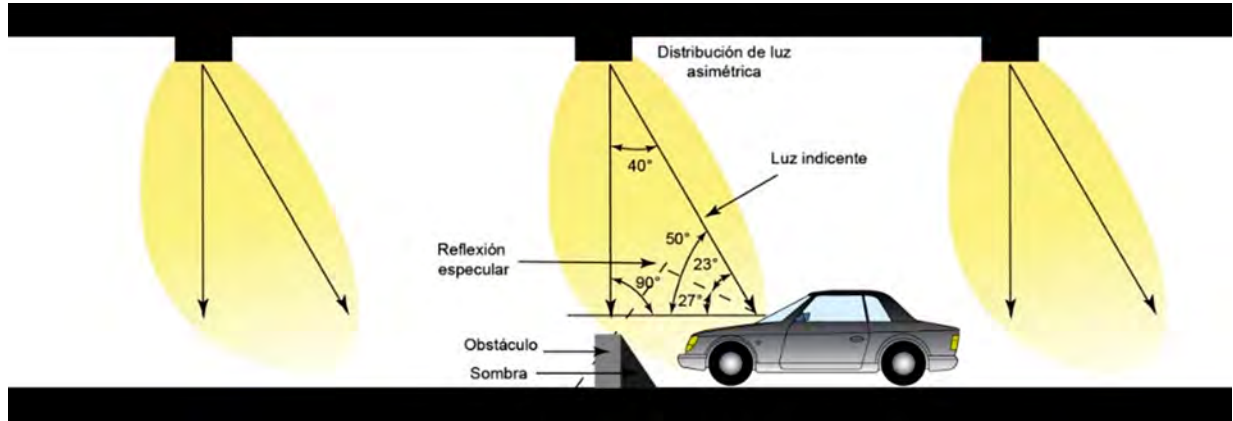


Figura 15.6. Sistema de iluminación a contraflujo.

15.7.3. Alumbrado a favor del flujo

La luz incide sobre los objetos en la misma dirección del tráfico. El alumbrado a favor del flujo está caracterizado por utilizar luminancias que muestran una distribución de intensidad luminosa que es asimétrica en relación al plano normal a la dirección del tráfico, en que la intensidad luminosa máxima está orientada en la misma dirección que la dirección del tráfico.

15.8. ASPECTOS COMUNES DE DISTINTOS MÉTODOS DE DISEÑO

15.8.1. Efecto Flicker o parpadeo

Se experimenta sensaciones de parpadeo o Flicker cuando se conduce a través de cambios periódicos especiales en luminancia, tales como los producidos por las pantallas o parálumenes en las paredes o techos de los túneles, o por el espaciamiento inadecuado de las luminarias (con una elevada velocidad de cambio en su distribución de intensidad luminosa). La incomodidad visual experimentada debido al efecto Flicker depende de:

- El número de cambios de luminancia por segundo (frecuencia de Flicker).
- La duración total de la experiencia del Flicker
- La velocidad de cambio de claro a oscuro, en un solo ciclo.
- La relación de luminancia de pico (luz) a valle (oscuridad) dentro de cada periodo (profundidad de modulación de luminancia).

Las influencias de los puntos (a), (b) y (c) dependen de la velocidad de vehículo y del espaciamiento entre luminarias, los puntos (c) y (d) dependen también de las características ópticas y del diseño de luminarias.

Cuando la distancia entre los extremos de las luminarias adyacentes es menor que la longitud de una sola luminaria, el cuarto punto (d) es típicamente minimizado y el Flicker percibido resulta despreciable. Para calcular la frecuencia de Flicker dentro de un tramo de túnel, se divide la velocidad en m/s por la separación entre luminarias en metros. Por ejemplo: Si $v = 60 \text{ km/h} = 16.6 \text{ m/s}$ y el espaciamiento o separación entre luminarias = 4 metros, entonces la frecuencia de Flicker = $16.6/4 = 4.2 \text{ Hz}$.

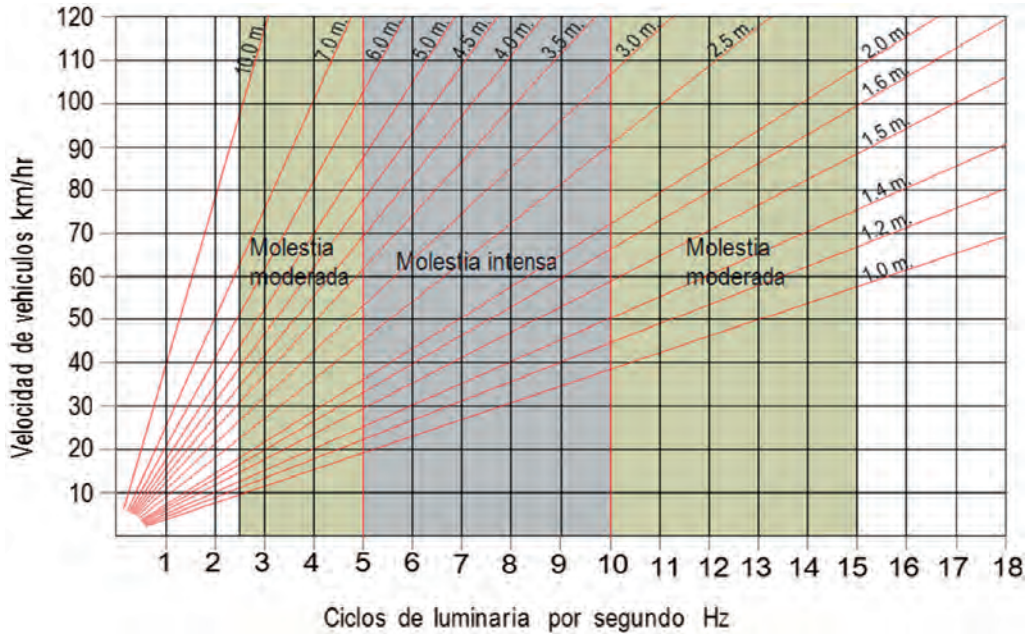


Figura 15.7. Efecto Flicker o parpadeo.

En general, el efecto flicker es despreciable a frecuencias inferiores a 2.5 Hz y superiores a 15 Hz. Cuando la frecuencia está entre 4 Hz y 11 Hz, y tiene una duración de más de 20 segundos, pueden presentarse molestias si no se toman otras medidas.

15.8.2. Limitación del deslumbramiento

Como el deslumbramiento reduce la visibilidad es importante minimizarlos. En el alumbrado de túneles, tienen que considerarse solamente el deslumbramiento fisiológico (incapacitivo). Los efectos del deslumbramiento incapacitivo son cuantificados por el incremento de umbral TI como se describe en la publicación CIE No. 31, 1976 “Deslumbramiento y uniformidad en el alumbrado (Austria)”.

Durante el día el incremento de umbral TI debe ser menor del 15% para la zona de umbral, y la zona interior del túnel y para todas las zonas del túnel durante la noche. Para la zona de salida durante el día no existe limitación. Debe utilizarse la siguiente fórmula para calcular TI:

$$TI = 65 L_v / L_{carretera}^{0.8} \text{ si } L_{carretera} < 5 \text{ cd/m}^2$$

$$TI = 95 L_v / L_{carretera}^{1.05} \text{ si } L_{carretera} > 5 \text{ cd/m}^2$$

Con $L_{carretera}$: Luminancia media de la superficie de la carretera

Y L_v : Luminancia de velo creada por todas las luminarias presentes en el campo de visión donde el eje de fijación está 1° por debajo de la horizontal en la situación en cuestión. Los cálculos deben hacerse sobre la base de los valores iniciales y con un ángulo de desfilada completa de hasta 20° por encima del eje de observación debido al techo del vehículo.

15.8.3. Control de alumbrado

La luminancia en la zona de acceso varía con los cambios en las condiciones diurnas. Durante el día, los niveles de luminancia en las zonas de alumbrado y transición necesitan ser porcentajes constantes de la luminancia en la zona de acceso. Por ello, es necesario prever un control automático del alumbrado artificial en estas zonas.

Hay dos sistemas posibles: Apagar (o encender) grupos de lámparas, o reducir su flujo. El primero es el más comúnmente aplicado, particularmente en niveles elevados de luminancia.

Para el control automático, la solución más viable es colocar un luminancímetro con un campo de medición de 20°, centrado en el portal del túnel y posicionando a la distancia mínima de seguridad de frenado, en frente del portal del túnel. Por razones prácticas, el luminancímetro tiene que ser montado generalmente a mayor altura que la posición de los ojos del conductor. Por ello el instrumento tiene que ser calibrado separadamente en la posición correcta.

La conmutación de las lámparas puede hacerse en escalones, para encender varias lámparas o apagarlas. Esta conmutación deberá tener un retardo de tiempo de varios minutos para evitar la conmutación innecesaria, debido a la variación transitoria en el nivel de alumbrado local provocada por nubes que pasan.

Puede considerarse la reducción de flujo o potencia, pero debe ser tomado en cuenta el ahorro real. Los estudios han mostrado que la reducción de flujo y consumo puede dar como resultado ahorros financieros considerables. El costo incrementado del equipo y a veces la reducción de la eficacia de la lámpara (lm/W) deben tenerse en cuenta.

El mantenimiento y limpieza de los equipos de control deberán realizarse frecuentemente.

15.9. TÉRMINOS RELACIONADOS CON EL TRÁFICO

15.9.1. Velocidad de diseño

Es en principio la velocidad para la que el túnel ha sido construido. Generalmente se acepta que esta sea la máxima velocidad permitida en las carreteras de acceso del túnel. Sin embargo, se debe considerar una reducción de velocidad en la aproximación al túnel y en el recorrido. En este caso la reducción debe ser indicada desde luego a la entrada del túnel.

Como la adaptación para bajar los niveles de iluminación en condiciones dinámicas es relativamente corta, la velocidad del tráfico es de gran importancia para determinar la iluminación requerida en la zona de umbral. Por ejemplo, cuando un conductor se acerca a la entrada de un túnel a una velocidad relativamente baja de 40 km/h, y observa el portal del túnel a una distancia de 150 m, el conductor tendrá un periodo de pre adaptación de 13 segundos antes de entrar al túnel, permitiendo bajar significativamente los niveles de iluminación en la zona de umbral. Un conductor viajando a 80 km/h tendrá solamente 6.5 segundos para la pre adaptación, de tal modo que, la demanda para la adaptación del ojo será más severa y serán necesarios niveles significativamente más altos en la zona de umbral.

En la noche el conductor está adaptado al ambiente de baja iluminación. Los sistemas de iluminación de un túnel en horas nocturnas son similares a la iluminación nocturna de una carretera, tomando en cuenta que el nivel de iluminación es constante.

Nota: La iluminación de un túnel de carretera no debe de ser 3 veces mayor a los niveles en una carretera.

15.9.2. Densidad de tráfico

El número de vehículos que pasan por un punto específico en un tiempo establecido a una dirección o direcciones establecidas. En un túnel se usará el número de vehículos por hora, por carril, en hora pico.

15.10. TRÁNSITO Y GEOMETRÍA DE LA CALZADA

15.10.1. Tránsito

El número anual promedio de vehículos que pasan a través de un túnel para todas las líneas en una dirección en un periodo de 24 horas (TDPA), debe ser significativo en la determinación no solo de niveles de iluminación, sino de la calidad de iluminación, tipo de equipo, mantenimiento y procesos de iluminación.

Cuando se diseña el sistema de iluminación de un túnel, se debe considerar el volumen de tránsito y la velocidad. Velocidades altas colocan demandas incrementadas de discreción del conductor y respuestas, que son influenciadas por el proceso de adaptación del ojo, con mayores niveles de iluminación (Ver Tabla 15.2).

Características de Enfoque	Velocidad de tráfico		Dirección del Conductor		
	Km/h	mph	Norte	Este-Oeste	Sur
			cd/m ²		
Escena de camino abierto o troncal 1,2,3	100	60	250	310	370
	80	50	220	260	320
	60	40	180	220	270
Escena de Túnel Urbano	100	60	320	280	310
	80	50	280	240	270
	60	40	230	200	220
Escena de Túnel en Montaña 7,8	100	60	230	200	200
	80	50	200	170	170
	60	40	170	140	140

Tabla 15.2. Niveles sugeridos de luminancia mantenida promedio en el día, en la zona de umbral de túneles vehiculares (L_{th}).

Un volumen alto de tránsito también implica la necesidad de mantener el flujo de tráfico. La percepción del conductor de la presencia de luz en el túnel va a provocar que el conductor mantenga su velocidad. Superficies interiores con niveles de iluminación elevados van a dar a los conductores la impresión de un túnel brillante.

El diseñador debería considerar los requerimientos operacionales del túnel, incluyendo carriles posiblemente reversibles y los procedimientos de mantenimiento.

15.10.2. Túneles divididos y no divididos

Se consideran túneles divididos a los que cuentan con una protección adicional para incrementar la seguridad del usuario de la carretera mediante una barrera central o algún elemento que impida a los vehículos invadir los carriles del sentido contrario.

El flujo de tráfico en túneles divididos y no divididos difiere en muchos aspectos. Los túneles divididos son estimados por ofrecer flujo de tráfico más seguro. En los túneles divididos casi no hay posibilidades de colisiones de frente, la ocupación de carriles es mejor distribuido que en los túneles no divididos. Los niveles de iluminación de noche en túneles no divididos deberán permanecer en el día en comparación con los túneles divididos en donde los niveles de luz se reducirían en un nivel sugerido en la noche durante las horas de tráfico nocturno.

15.11. PROBLEMÁTICA VISUAL EN LOS TÚNELES

15.11.1. Efecto Visual

El sistema visual del ojo se puede adaptar en forma escalonada reduciendo los niveles de iluminación tal y como ocurre cuando se pasa de la luz del día a la oscuridad del túnel, no siendo estos ajustes instantáneos; el proceso de adaptación del ojo requiere de cierto tiempo dependiendo de la diferencia de la luminosidad, ya que a mayor diferencia, mayor tiempo de adaptación.

15.11.2. Fenómenos visuales

Existen varios fenómenos visuales que se presentan al conductor en el exterior e interior de los túneles los cuales se deben de tener en cuenta para mantener la seguridad del conductor, éstos son:

- El fenómeno de adaptación
- El fenómeno de inducción
- Luminancia de velo
- El aspecto del campo de visión en función de la orientación geográfica del túnel
- La distancia mínima de seguridad de frenado (DMSF) en función de la velocidad del tráfico del túnel.

15.11.2.1. 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.



Figura 15.8. Efecto de adaptación.

15.11.2.2. Fenómeno de inducción

Es producido por la influencia de las partes contiguas de la retina en la que se forma la imagen del objeto que se está visualizando. Cuando los ojos del conductor se encuentran en estado de adaptación a un determinado nivel de luminancia únicamente se pueden ver los objetos de luminancia similar.

El efecto de inducción es un nivel de iluminancia. La iluminación natural diurna de la carretera, que no permite ver un objeto si su luminancia es inferior a la del nivel de la entrada del túnel. Este cambio extremo entre niveles altos y bajos de iluminación produce una ceguera momentánea que es peligrosa.

Un claro ejemplo se tiene cuando al mirar un objeto con niveles altos de luminancia y ver una zona oscura queda la sensación de seguir viendo el objeto iluminado.



Figura 15.9. Fenómeno de inducción.

15.11.2.3. Luminancia de velo

Es el conjunto de luces parásitas presentes sobre el ojo del conductor debido a los reflejos del parabrisas, la luminancia atmosférica (polvo, contaminantes, humedad, etc.), los cuales se combinan para formar un velo luminoso que reduce la visibilidad de los obstáculos a la entrada del túnel.

Los tres primeros fenómenos: adaptación, de inducción y luminancia de velo afectan la visibilidad del conductor reduciendo la visibilidad de los objetos que se presentan al frente como un vehículo u objeto, etc.

Esta visibilidad se logra por contraste de objetos contra el fondo de los mismos.

Este contraste se expresa en la siguiente ecuación:

$$C = (L_o - L_f) / L_f$$

Donde:

L_o = Luminancia del obstáculo

L_f = Luminancia de fondo

El Contraste C puede ser positivo o negativo:

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

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

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

$$C_{int} = L_o - L_f / L_f$$

En la siguiente figura se muestra el contraste intrínseco C_{int} que se mide junto al obstáculo, mientras el contraste de retina C_R

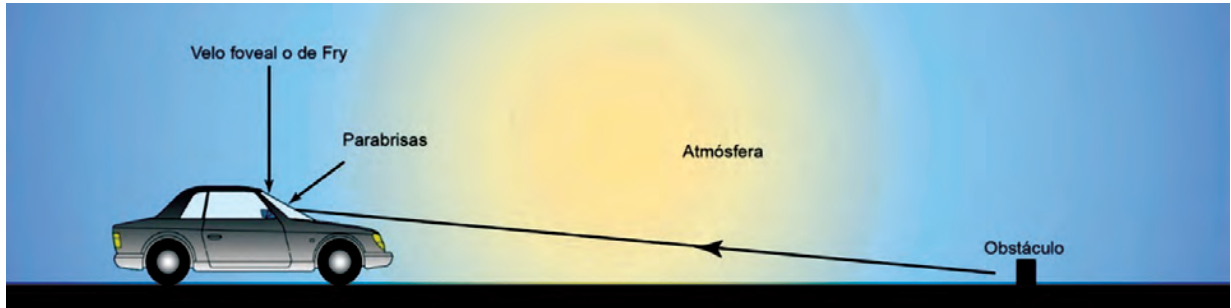


Figura 15.10. Velos parásitos atmosféricos (L_{atm}), de parabrisas (L_{pb}) y velo foveal (L_v).

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

La luminancia del parabrisas L_{pb} provoca efectos de difracción o reflexión según la posición del sol en el campo visual y curvatura e inclinación del propio parabrisas del vehículo.

La luminancia del velo foveal L_v , es causada por la perturbación en la visión que provoca una luminancia ajena al objetivo visual que dificulta la percepción de las imágenes. Las luminancias de velo atmosférico, del parabrisas y foveal, tal como se representa en la figura 15.10, se interponen entre el obstáculo y el conductor reduciendo el contraste intrínseco C_{int} del obstáculos ($C_R < C_{int}$), disminuyendo la visibilidad de los obstáculos a la entrada de los túneles.

Las luminancias de velo se producen en el parabrisas aunado a las de la atmósfera perturbando la visión del conductor a la entrada del túnel, éstas son variables dependiendo de la región, orientación, y zona donde se encuentra el túnel, así como la estación del año, etc.

15.11.2.4. El aspecto del campo de visión en función de la orientación geográfica del túnel

La presencia del sol dentro o cerca del ángulo de acercamiento del portal del túnel crea un severo problema de diseño de iluminación. Esto ocurre con túneles de Este-Oeste al este del portal antes de la puesta de sol y en el portal Oeste por un periodo después del amanecer. Esto también puede ocurrir en túneles Norte-Sur al Norte del portal, especialmente en meses de invierno a elevadas alturas.

Si el sol está cerca del ángulo de visión del portal durante el acercamiento al túnel, la iluminación del cielo será muy alta, creando una iluminación de velo elevada. Un portal deprimido, que permite una línea directa de visión al sol en ángulos bajos de visión, acentuará el problema. Un ejemplo sería el acercamiento a un túnel debajo de un río. Ningún sistema de iluminación de un túnel puede competir directamente con el sol. La única alternativa es bloquear el sol de la visión, o confiar en que los conductores protejan sus ojos.

15.11.2.5. Distancia mínima de seguridad de frenado (DMSF)

Es 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.

Al aproximarse un vehículo a un túnel, los efectos de inducción, adaptación y la influencia de las luminancias de velo, están relacionadas directamente con la distancia que el conductor tiene hacia la boca del túnel denominada zona de acceso, con una longitud igual a la DMSF. (Ver Tabla15.3.)

Velocidad del Tráfico Km/h	DMSF (m)
50	80
65	90
80	140
90	165
95	200
105	220

Tabla 15.3. Distancia mínima de seguridad de frenado (DMSF) de la NOM-001-SEDE.

15.12. ALUMBRADO DE TÚNELES LARGOS

Es esencial conocer la luminancia en la zona de acceso a fin de determinar los niveles de luminancia que se requieren en la zona de entrada del túnel. El valor de la luminancia en la zona de acceso que se utiliza para el diseño de iluminación y/o control de iluminación debería ser determinado de uno entre dos modos: o bien es la luminancia máxima en la zona de acceso que tiene lugar durante el año, o bien es el valor que es solamente excedido durante una cierta proporción de un año.

15.13. ALUMBRADO ARTIFICIAL DE TÚNELES CORTOS

Cuando se necesita alumbrado artificial diurno, el alumbrado deberá cumplir con los requisitos de túneles largos. El alumbrado diurno a tiempo parcial está previsto durante periodos en los que la penetración de la luz natural no proporciona un fondo de luminancia suficientemente elevada para permitir que funcione el efecto silueta. Tales condiciones pueden plantearse después de obscurecer, antes de amanecer y en días nublados.

Para túneles cortos mayores de 25 metros en los que las carreteras de aproximación están iluminadas, se recomienda el alumbrado nocturno incluso aunque no haya justificación para el alumbrado diurno. La luminancia debería ser al menos igual, pero no mayor de dos veces la de las carreteras de aproximación.

15.14. SEÑALES DE TRÁFICO

Cuando se utilizan lámparas de vapor de sodio (tanto de alta como de baja presión), la separación entre las luminarias y las señales de tráfico amarillas deberán estar, o bien a una distancia horizontal de al menos un metro, o bien a una separación angular de al menos 1° (se elegirá siempre la mayor), observando desde una distancia igual al 50% de la distancia mínima de seguridad de frenado.

15.15. MÉTODO PARA DETERMINAR LA LUMINANCIA EN LAS DIFERENTES ZONAS AL INTERIOR DEL TÚNEL

Este método está basado en la Norma UNE-EN CR_14380:2007 conocida como “Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de túneles”.

Establece todos los aspectos más importantes con relación al modo de resolver la problemática de visión de los túneles, indicando los criterios de calidad y la forma de cumplirlos en las distintas situaciones que se pueden plantear en un túnel.

Está principalmente basada en la Publicación CIE No. 88:1990, e incorpora algunos métodos de países particulares para la determinación de algunos de los criterios a satisfacer. Siendo una de las contribuciones mayores la ayuda a la toma de decisión de la iluminación de túneles cortos, empleando el método del cálculo de la visión a través, potencia tiempo limitado (LTP).

Métodos para la determinación de la luminancia de acceso L_{20} :

- Método Aproximado
- Método más exacto
- Método de L_{20} ponderado con el tráfico. (A partir de la determinación de la luminancia de acceso).

En éste método se incluyen una serie de tablas basadas en la obtención de distintas clases de túnel en función de la intensidad de tráfico y de la composición del mismo para poder calcular:

- La L_{th} a partir de la L_{20} .
- La luminancia en la zona interior del túnel así como por el guiado visual.
- La zona de salida.
- Las uniformidades de luminancia.
- El alumbrado nocturno.

15.15.1. Método aproximado

Este método da valores aproximados de la L_{20} (en cd/m^2) de acuerdo con lo expuesto en la Tabla 15.4. Debe usarse sólo si no existe suficiente información detallada de los alrededores inmediatos de la boca del túnel.

Los valores están basados en estudios empíricos según la publicación No. 88: 2004 de la CIE.

Luminancia media L_{20} en el campo de visión cónico de 20°, en cd/m^2 .																
	Porcentaje de cielo en el campo de visión cónico de 20°															
	35%				25%				10%				0%			
	Normal		Nieve		Normal		Nieve		Normal		Nieve		Normal		Nieve	
	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	
Situación de claridad en campo de visión	1)		1)		1)		1)		2)		3)		2)		3)	
DMSF * 60 m.	4)		4)		4.00	5.00	4.00	5.00	2.50	3.50	3.00	3.50	1.50	3.00	1.50	4.00
DMSF * 100-160 m.	4.00	6.00	4.00	6.00	4.00	6.00	4.00	6.00	3.00	5.00	3.00	5.00	2.50	4.50	2.50	5.00
Notas																
1) Efecto fundamental dependiente de la orientación del túnel. -Bajo: en el hemisferio norte-entrada sur. -Alto: en el hemisferio norte-entrada norte. -Para entradas por el este y el oeste, debería elegirse un valor medio entre "bajo" y "alto".																
2) Efecto fundamental dependiente de la claridad de los alrededores. -Bajo: reflectancias de alrededores bajas. -Alto: reflectancias de alrededores altas.																
3) Efecto fundamental dependiente de la orientación del túnel. -Bajo: entrada norte. -Alto: entrada sur. -Deberán interpolarse valores medios entre valores altos y bajos.																
4) Para una DMSF de 60 m., no se han encontrado en la práctica porcentajes de cielo del 35%.																
5) "Entrada norte" significa desplazándose hacia el sur (hemisferio norte). *Calculada para pavimento húmedo.																

Tabla 15.4. Valores habituales de la luminancia en la zona de acceso.

15.15.2. Método más exacto

Debe usarse siempre que exista una vista tridimensional del portal. En este método, la evaluación de L_{20} se obtiene a partir de un croquis de los alrededores de la entrada del túnel y se calcula mediante la fórmula:

$$L_{20} = \gamma L_C + \rho L_R + \varepsilon L_E + t L_{th}$$

Donde:

L_C es la luminancia de cielo: $\gamma = \%$ de cielo.

L_R es la luminancia de calzada: $\rho = \%$ de calzada.

L_E es la luminancia del entorno: $\varepsilon = \%$ de entorno.

L_{th} es la luminancia de zona de umbral: $t = \%$ de portal.

Con:

$$\gamma + \rho + \varepsilon + t = 1$$

En esta fórmula el valor de L_{th} es la incógnita a determinar. Para distancias mínimas de seguridad de frenado superiores a 100 metros el valor t es bajo (menor del 10%) y como L_{th} es ya bajo con respecto a los otros valores de luminancia, puede despreciarse la contribución de L_{th} .

Para una distancia mínima de seguridad de frenado de 60 metros, se puede escribir:

$$L_{20} = (\gamma L_C + \rho L_R + \varepsilon L_E) / (1 - t k)$$

Como k nunca excede de 0.1, se obtiene:

$$L_{20} = \gamma L_C + \rho L_R + \varepsilon L_E$$

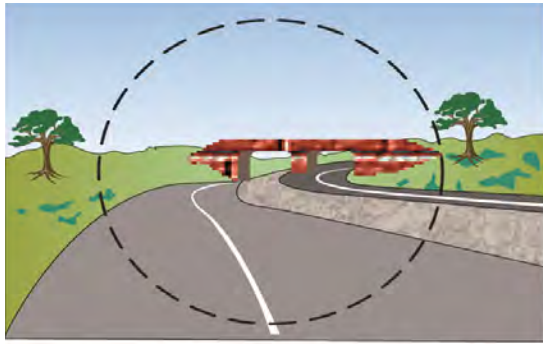
Con:

$$\gamma + \rho + \varepsilon < 1$$

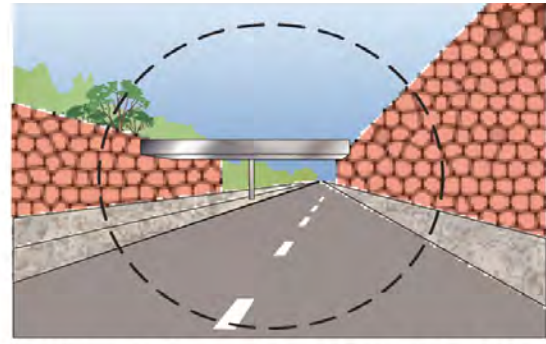
Cuando la determinación exacta de $\gamma + \rho + \varepsilon$ y t , no es posible, sus valores pueden también evaluarse por medio de fotografías o dibujos a escala. Para estimar los valores de porcentaje de las áreas que contribuyen al valor de L_{20} en cualquier entrada del túnel, deberá hacerse una fotografía desde el punto de frenado y, a partir de una dimensión conocida como la imagen, como por ejemplo la altura del túnel, puede determinarse el diámetro del cono L_{20} en la imagen.

Si el túnel no está aún construido entonces puede usarse una fotografía, siempre y cuando la línea del cielo no resulte alterada durante la construcción; en caso contrario debería usarse un dibujo a escala. La fotografía o el dibujo pueden ser escalados a continuación para las áreas relativas (rocas, cielo, edificios, etc.) como un porcentaje del área de L_{20} total.

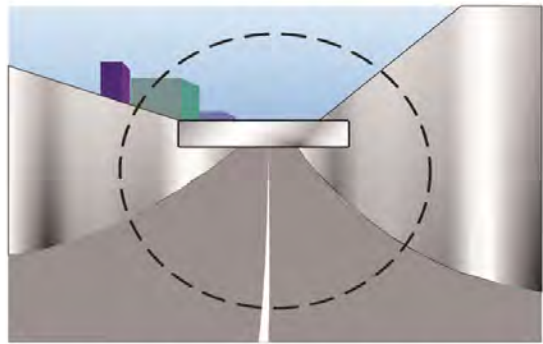
Si los datos para el cálculo anterior no están disponibles, entonces puede tomarse una aproximación de L_{20} a partir de los croquis dados en la Figura 15.11., comparando la fotografía o dibujo con el croquis que más se le parezca.



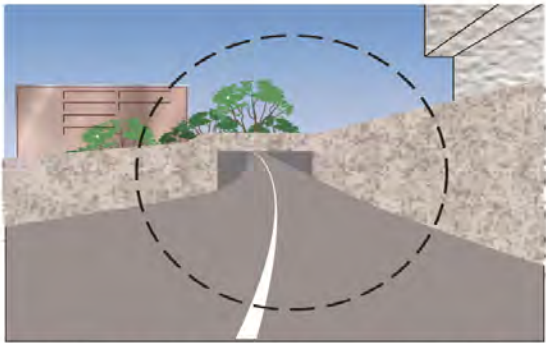
1.-Distancia de seguridad 160 m. Cielo 35%



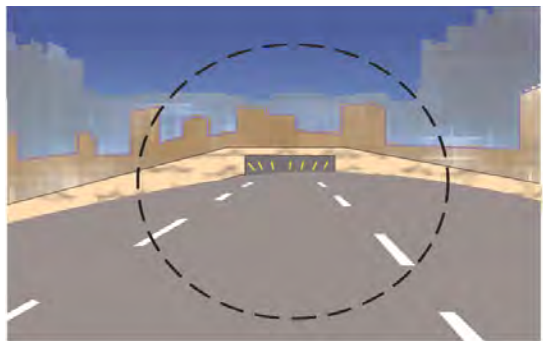
2.-Distancia de seguridad 100 m. Cielo 27%



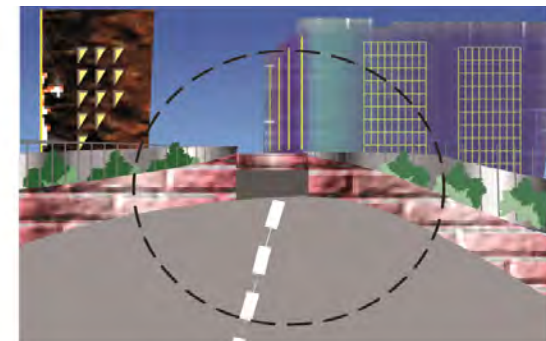
3.-Distancia de seguridad 60 m. Cielo 14%



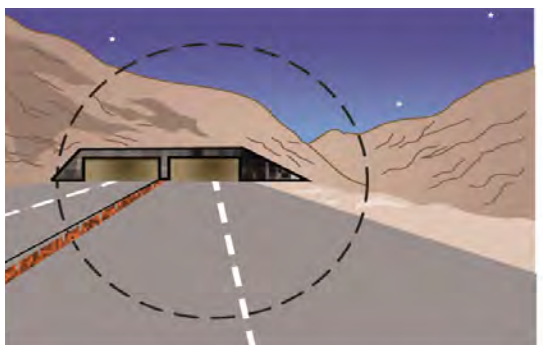
4.-Distancia de seguridad 100 m. Cielo 18%



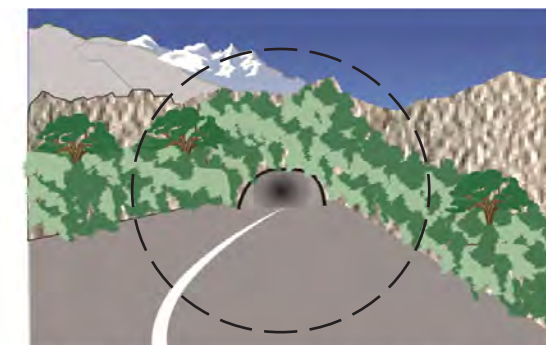
5.-Distancia de seguridad 160 m. Cielo 14%



6.-Distancia de seguridad 100 m. Cielo 3%



7.-Distancia de seguridad 100 m. Cielo 18%



8.-Distancia de seguridad 100 m. Cielo 4%

Figura 15.11. Luminancia de la zona acceso (L_{20}) para situaciones típicas de túneles.

Si los valores de luminancia de los alrededores locales no están disponibles, los datos para L_c , L_R , L (expresados en kcd/m^2) pueden tomarse de la Tabla 15.5.

Sentido de circulación	L_c (kcd/m^2) cielo	L_R (kcd/m^2) carretera	L_E (kcd/m) ² entorno			
			Rocas	Edificios	Nieve	Vegetación
N	8	3	3	8	15 (V) 15 (H)	2
E – O	12	4	2	6	10 (V) 15 (H)	2
S	16	5	1	4	5 (V) 15 (H)	2

Tabla 15.5. Valores típicos de L_c , L_R y L_E expresados en kcd/m^2 .

(V) Paisaje montañoso con muchos obstáculos visuales verticales

(H) Paisaje llano, más o menos horizontal

Nota: en el hemisferio sur N y S serían intercambiables.

El valor L_{20} obtenido por este método es un valor máximo y puede estar sobreestimado debido a que en los portales de los túneles, los valores máximos para los tres componentes de calzada, cielo y alrededores no suelen ocurrir simultáneamente en el mismo momento del día.

Además no hay disponible ninguna información sobre la frecuencia de estos valores durante el año y la seguridad correspondiente de la instalación a partir de este único valor L_{20} .

15.15.3. Método de L_{20} ponderado con el tráfico

La luminancia media mantenida al nivel de la superficie de la carretera necesaria al principio de la zona de umbral (L_{20}) se calcula a partir de las relaciones de L_{th}/L_{20} dadas en la Tabla 15.8, las cuales fueron tomadas de la Norma UNE-CR_14380:2007.

Para llegar a la predeterminación de L_{th} a continuación se describen sucesivamente las operaciones realizadas para la clasificación del túnel en función de la intensidad y la composición del tráfico.

15.15.3.1. Clases de túneles

El método de la clase de túnel está basado en las características del uso del túnel y no en la visibilidad de objetos. Puede aplicarse cuando se utiliza el método de L_{20} . La clasificación está basada en los principales factores de influencia:

- Intensidad de tráfico.
- Tipo de tráfico.
- Guiado visual.

Para la intensidad de tráfico se consideran los tres niveles que se reflejan en la Tabla 15.6.

Intensidad de tráfico	Tráfico unidireccional (vehículo/hora.carril)	Tráfico bidireccional (vehículo/hora.carril)
Alta	>1500	>400
Media	500 - 1500	100 - 400
Baja	<500	<100

Tabla 15.6. Intensidad de tráfico.

En cuanto a tipo y composición del tráfico se consideran los dos tipos siguientes:

- A. Sólo tráfico motorizado.
- B. Tráfico mixto incluyendo bicicletas.

Para túneles en los que la intensidad de tráfico es baja ($IMD < 1000$) y el tráfico del túnel es del tipo A, tan solo se considera necesario un guiado visual, ya que en este caso no está justificado el alumbrado del túnel “completo”. En función de la intensidad y tipo de tráfico fijados anteriormente, se establece en la tabla siguiente las cuatro fases de alumbrado de túneles.

Intensidad de tráfico	Alta		Media		Baja	
Tipo de tráfico	M	A	M	A	M	A
Clase de túnel	4	3	3	2	2	1 (guiado)

Tabla 15.7. Clases de alumbrado de túneles.

15.15.3.2. Determinación de la luminancia de umbral L_{th} .

En la Tabla 15.8, figuran los distintos valores asignado a la relación entre L_{th} y L_{20} ($k = L_{th}/L_{20}$) para que las condiciones de visión sean adecuadas. Dicho coeficiente k recibe el nombre de poder revelador y depende de la distancia mínima de frenado y de la clase de túnel.

Clase de túnel	DMSF* (m)		
	≤ 60 km/hr	100 km/hr	≥ 160 km/hr
4	$k=0.05$	$k=0.06$	$k=0.1$
3	$k=0.04$	$k=0.05$	$k=0.07$
2	$k=0.03$	$k=0.04$	$k=0.05$
1	No hay requisitos (solamente orientación al alumbrado)		

*Calculada para pavimento húmedo

Tabla 15.8. Valores recomendados de $k = L_{th}/L_{20}$ para diferentes valores de DMSF y distancias clases de túnel.

Es importante poner atención al usar valores bajos de k en los sistemas de alumbrado a contraflujo. Al aceptar niveles bajos de L_{th} hay un incremento en el efecto de agujero negro comparado con el valor de L_{th} similar obtenido en sistemas de alumbrado simétricos. Aun así, los sistemas de alumbrado a contraflujo crean mayores contrastes entre objetos pequeños y el fondo (superficie de la carretera). Por lo tanto, con este sistema de alumbrado se obtiene una mayor visibilidad con niveles de luminancia más bajos y los objetos se revelan antes de que el proceso de adaptación visual se haya completado.

15.15.3.3. Longitud de la zona de umbral y de transición

La longitud total de la zona de umbral debe ser al menos igual a la distancia mínima de frenado.

Durante la primera mitad de la distancia, el nivel de luminancia debe ser igual a L_{th} (el valor al comienzo de la zona de umbral). A partir de la mitad de la distancia mínima de frenado hacia adelante, el nivel de alumbrado puede disminuir gradual y linealmente hasta un valor igual a $0,4 L_{th}$ al final de la zona de umbral. La reducción gradual durante la última mitad de la zona de umbral puede hacerse en escalones o de forma progresiva. Sin embargo, los niveles de luminancia no deben descender por debajo de los valores correspondientes a una disminución gradual.

15.15.3.4. Determinación de la luminancia en la zona interior del túnel

En función de la clase de túnel y de la velocidad de circulación se muestra la Tabla 15.9, la cual proporciona valores recomendados para la iluminación de la zona interior.

Clase de túnel	Distancia mínima de frenado* (m)		
	≤60	100	≥160
4	3	6	10
3	2	4	6
2	1.5	2	4
1	**	0.5	1.5

*Calculada para pavimento seco

** No hay requisitos

Tabla 15.9. Luminancia media de la superficie de la calzada de la zona interior en cd/m^2 .

15.15.3.5. La zona de salida

A fin de asegurar una iluminación directa adecuada de los vehículos pequeños y a una visión suficiente por el retrovisor, la zona de salida tiene que ser iluminada del mismo modo que la zona interior del túnel.

En situaciones en las que se esperan peligros adicionales cerca de la salida del túnel, se aconseja que para túneles de clase de alumbrado 4 la luminancia durante el día en la zona de salida aumente linealmente a lo largo de una longitud igual a la distancia mínima de seguridad de frenado, a partir del nivel de la zona interior, a un nivel cinco veces el de la zona interior a una distancia de 20 metros, desde el portal de salida.

15.15.3.6. Uniformidades de luminancia

La Norma UNE-CR_14380 proporciona datos, los cuales se encuentran en la Tabla 15.10; en la que se fijan, en función de la clase de túnel cómo deben ser las uniformidades de luminancia.

Valores mínimos de la uniformidad de la superficie de calzada en la zona de umbral, en la zona interior y en la zona de salida.

Clase de túnel	U0	U1
4	0.4	0.7
3	0.4	0.6
2	0.3	0.5
1	-	-

Tabla 15.10. Valores mínimos de la uniformidad de la superficie de calzada en la zona de umbral, en la zona interior y en la zona de salida.

15.15.3.7. Alumbrado nocturno

Durante la noche la longitud total del túnel es tratada de manera uniforme:

Si el túnel se encuentra en un tramo de carretera iluminado, las exigencias del alumbrado dentro del túnel deberían ser al menos iguales al nivel, uniformidades y control del deslumbramiento de la carretera de acceso.

La luminancia durante la noche no debería ser mayor que la luminancia de la zona interior durante el día; por lo tanto, la luminancia durante la noche debería de ser de entre 1 y 2 cd/m^2 , de acuerdo con el nivel exterior.

La uniformidad por la noche en los túneles debe satisfacer los mismos requisitos que el alumbrado durante el día.

Si el túnel es parte de una carretera que no está iluminada, la luminancia media de la superficie de la calzada debe ser del orden de 1 cd/m², la uniformidad global al menos del 40% y la uniformidad longitudinal al menos del 60%.

15.16. DECISIÓN SOBRE LA ILUMINACIÓN O NO DE TÚNELES CORTOS

Un túnel corto se considera aquel que tiene una longitud igual o menor a la distancia mínima de seguridad de frenado. Para la determinación de las condiciones de visión en un túnel corto, se utiliza el método de LTP descrito y tomado de la Norma UNE-CR_14380, que se resume a continuación:

- Determinación del porcentaje de visión a través (LTP).
- El porcentaje de visión a través, LTP, se define:

$$LTP = 100 \times \frac{\text{Superficie EFGH}}{\text{Superficie ABCD}}$$

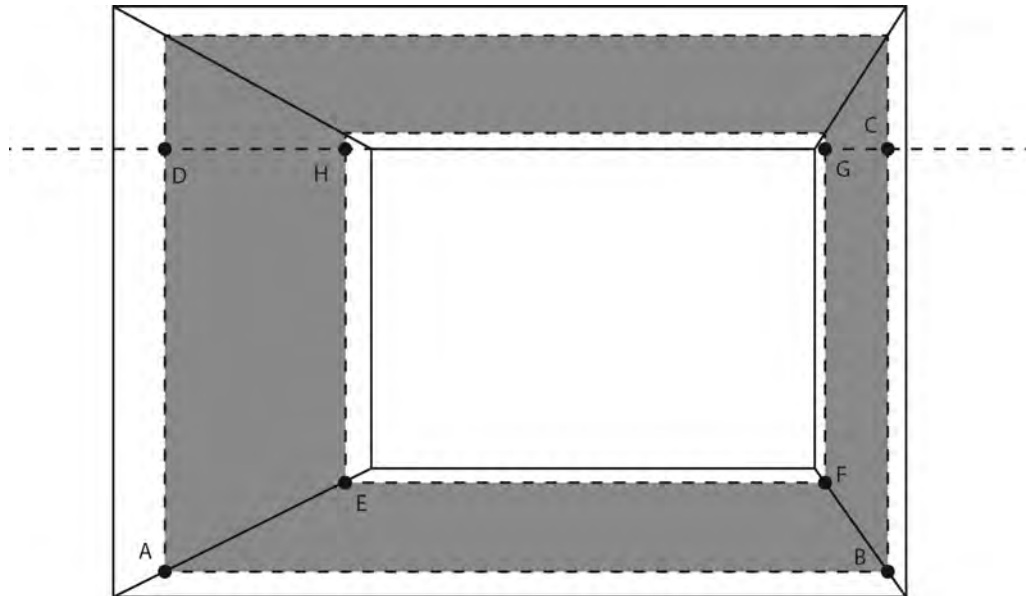


Figura 15.12. Porcentaje de visión a través.

El centro del dibujo en perspectiva es:

Un punto en una línea horizontal 1.2 metros, por encima de la superficie de la calzada, en el centro del carril de circulación (si hay más de un carril, se ha de determinar para cada carril, aunque los más próximos a las paredes son los que tendrán la situación más crítica) y a la distancia mínima de frenado para el portal de entrada aparente influido por luz natural.

Observaciones:

El techo no se toma en cuenta debido a que normalmente no es un fondo contra el que puedan percibirse otros usuarios de la carretera u obstáculos.

La penetración de la luz natural acorta la longitud visual aparente del túnel. Por ello se usan unos portales de entrada y salida aparentes cuando se determina LTP.

El portal de entrada aparente normalmente está insertado aproximadamente a 5 metros, y el portal de salida aparente está insertado aproximadamente a 10m dentro del túnel.

La diferencia entre portales reales y aparentes puede comprobarse viendo la superficie de la calzada en el túnel desde una larga distancia por delante del túnel, cuando se verá que la claridad de la superficie de la calzada en los portales es mayor dentro del túnel.

Sin embargo, en la práctica es difícil estimar o medir las distancias de inserción, y las figuras a 5 y 10 metros representan la buena práctica y deberían usarse normalmente.

Si se continúa sustituyendo en la fórmula, LTP se puede calcular del siguiente modo:

$$LTP = 100 \times \frac{(EF.GH)}{(AB.CD)}$$

$$LTP = 100 \times \frac{EF}{AB} \times \frac{FG}{BC}$$

Debido a que los ángulos son pequeños:

$$LTP = 100 \times \frac{\beta_u}{\beta_i} \times \frac{\alpha_u}{\alpha_i}$$

Siendo α_u y β_u los ángulos visuales para la parte visual de la boca de salida aparente y α_i y β_i los ángulos visuales para la boca de entrada aparente Figura 15.13

Según las investigaciones realizadas, pueden establecerse las siguientes conclusiones:

Para $LTP < 20\%$, siempre se necesita alumbrado artificial durante el día

Para $LTP > 50\%$, nunca se necesita alumbrado artificial durante el día

Para $20\% < LTP < 50\%$ puede ser necesario alumbrado artificial durante el día.

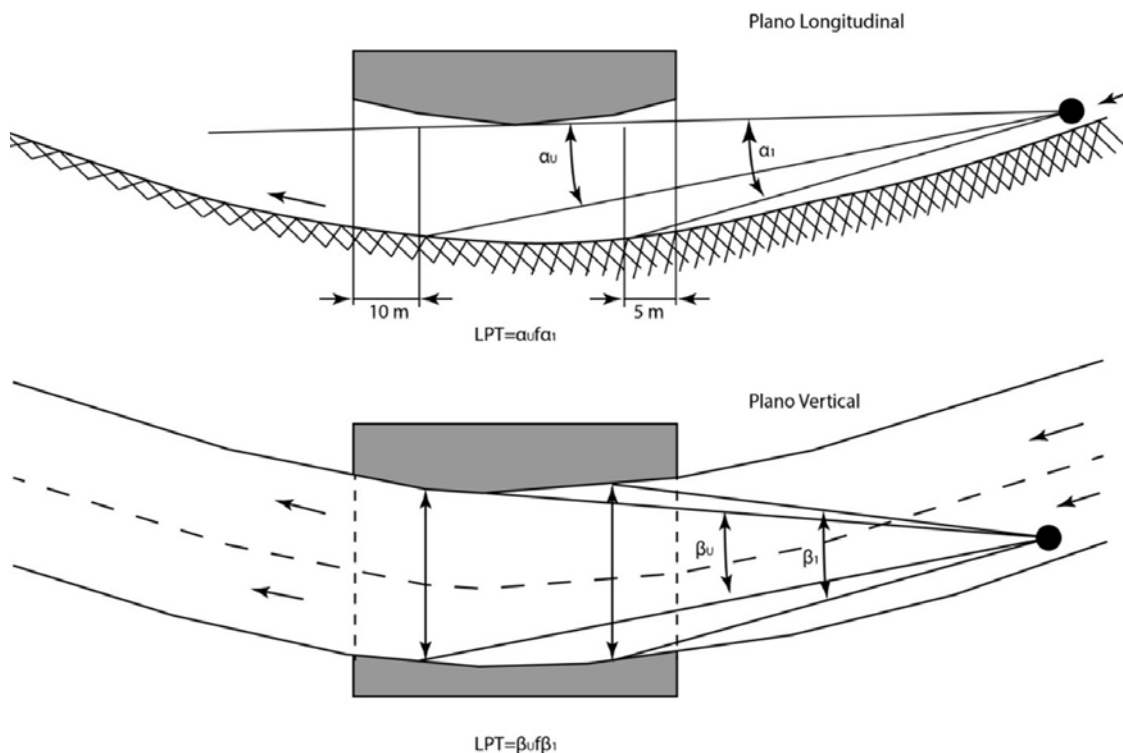


Figura 15.13. Ángulos visuales.

Para la situación en la que $20\% < LTP < 50\%$, debe analizarse la visibilidad de un objeto crítico importante; este objeto debe representar un vehículo si solamente se permite que circulen por el túnel vehículos motorizados y se añadirán peatones y ciclistas además, cuando se permite tráfico mixto:

Para vehículos motorizados, el objeto crítico es definido como un rectángulo de 1.6 m de ancho x 1.4 m de altura. Para peatones/ciclistas el objeto crítico es definido como un rectángulo de 0.5 m de ancho x 1.8 m de altura.

El objetivo principal es evitar una colisión y por ello el objeto debe situarse en el centro de carril de circulación.

Se necesita alumbrado artificial durante el día cuando:

No puede verse más de un 30% del objeto crítico que representa un vehículo o un peatón ciclista contra el portal de salida aparente. Estas situaciones se ilustran en las Figuras 15.14 y 15.15

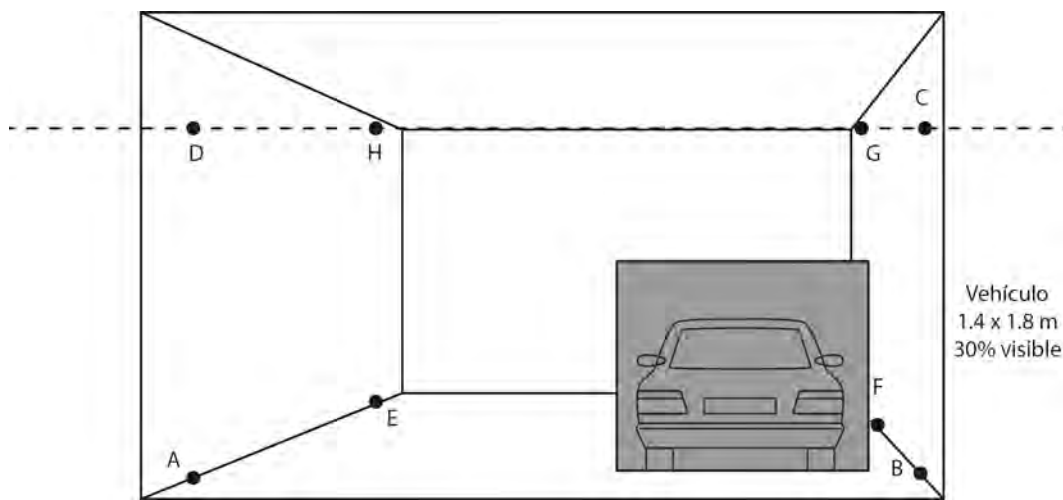


Figura 15.14. Visibilidad de un vehículo.

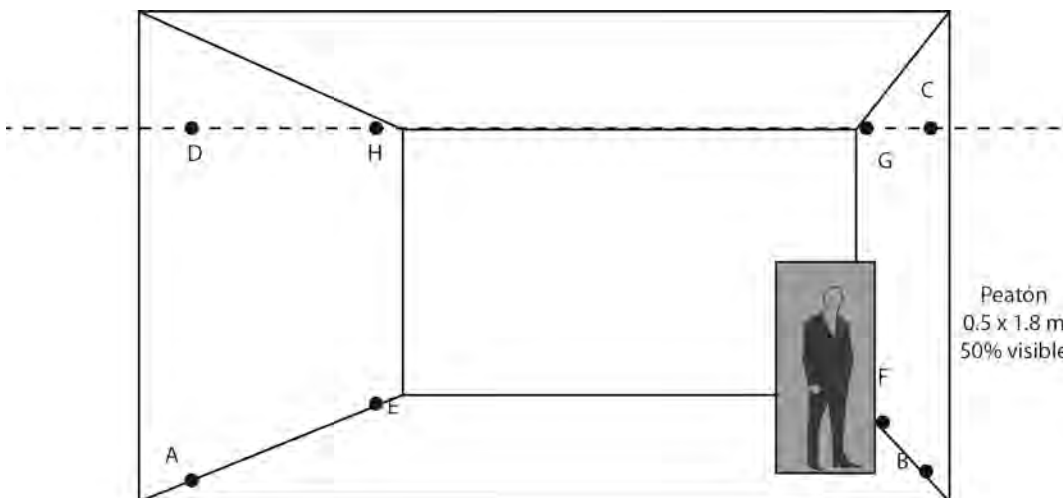


Figura 15.15. Visibilidad de un peatón o ciclista.

Tanto a partir de la práctica como del método de cálculo puede deducirse que los principales factores de influencia son la distancia mínima de frenado (calculada para pavimento húmedo) y la longitud del túnel, y no la altura ni la anchura, incluso teniendo en cuenta la penetración de luz natural. Cabe destacar que la distancia mínima de frenado está basada en la velocidad considerada.

En túneles con curva horizontal, la pared exterior curvada debe iluminarse de tal modo que los vehículos y otros usuarios de la carretera puedan verse como objetos oscuros contra la pared iluminada (si el túnel tiene también una gran curvatura vertical, este método puede no proporcionar una solución satisfactoria).

15.17. INFLUENCIA SOBRE EL PORCENTAJE DE VISIÓN A TRAVÉS

Promover una buena penetración de luz natural a la entrada y salida acortará la longitud aparente del túnel. Esto puede hacerse:

- Aumentando la altura o anchura de la entrada/salida.
- Aplicando cubiertas espectaculares (azulejos) en las paredes del túnel.
- Fragmentando el túnel en partes más cortas dejando abierto el techo cuando sea posible.

15.18. MÉTODO ALTERNATIVO O SIMPLIFICADO

En algunas situaciones comunes, la aplicación del método LTP puede evitarse usando las Tablas 15.11 y 15.12, que contienen el resultado de los cálculos de LTP para situaciones reales.

En estas tablas se dan dos situaciones:

- Túneles rectos (la carretera que se aproxima no tiene curvatura en el plano horizontal, pero puede tener pendiente)
- Túneles con curvatura horizontal con una carretera que se aproxima con curvas en el plano horizontal.

DMSF*	Alumbrado artificial durante el día	Carretera de aproximación pendiente de 0°	Carretera de aproximación pendiente de 2°	Carretera de aproximación pendiente de 4°
50m	Si	L>120 m	L>100 m	L>80 m
	Posible	50 m<L<120 m	50 m<L<100 m	40 m<L<80 m
	No	L<50 m	L<50 m	L<40 m
100m	Si	L<200 m	L>150 m	L>80 m
	Posible	90 m<L<200 m	60 m<L<150 m	50 m<L<80 m
	No	L<90 m	L<60 m	L<50 m
150m	Si	L>200 m	L>150 m	L>80 m
	Posible	120 m<L<200 m	70 m<L<150 m	50 m<L<80 m
	No	L<120 m	L<70 m	L<50 m
200m	Si	L>200 m	L>150 m	L>70 m
	Posible	150 m<L<200 m	70 m<L<150 m	50 m<L<70 m
	No	L<150 m	L<70 m	L<50 m

*Calculada para pavimento húmedo

Tabla 15.11. Túneles rectos.

No se ha dado ningún valor, en las tablas para túneles con curvatura horizontal y vertical, ya que estas soluciones deberían ser calculadas utilizando el procedimiento completo de LTP.

La tabla es importante cuando se aplican las siguientes dimensiones principales y condiciones:

- Un túnel de ancho comprendido entre 9 y 12 m y una altura de túnel entre 4.5 y 6 m.
- La escena detrás del portal de salida está bien iluminada por la luz natural.

DMSF*	Alumbrado artificial durante el día	Radio de la curva		Radio de la curva	
80m	Si	85 m	L>20 m	170 m	L>50 m
	Posible				20 m<L<50 m
	No		L<20 m		L<20 m
100m	Si	250 m	L>50 m	800 m	L>70 m
	Posible		30 m<L<50 m		50 m<L<70 m
	No		L<30 m		L<50 m
150m	Si	450 m	L>55 m	900 m	L>90 m
	Posible		40 m<L<55 m		60 m<L<90 m
	No		L<40 m		L<60 m
200m	Si	750 m	L>60 m	1500 m	L>100 m
	Posible		50 m<L<60 m		65 m<L<100 m
	No		L<50 m		L<65 m

*Calculada para pavimento húmedo

Tabla 15.12. Túneles con curvatura horizontal.

15.19. PUBLICACIÓN CIE No. 88:2004

Esta publicación es una revisión de la CIE No. 88:1990, pero actualizándola en un aspecto esencial en la visión al aproximarse a la boca de un túnel que es la luminancia de velo, provocada por las tres componentes: luminancia de velo atmosférica, de parabrisas y foveal o de Fry.

La predeterminación de la luminancia de umbral L_{th} está basada en la determinación de la Luminancia de velo equivalente, definida como L_{seq} .

Una vez extraída la L_{seq} de las Tablas 15.11 y 15.12, existen fórmulas para poder calcular la L_{th} y resolver así el problema de una manera más exacta que con el método anterior, que no tenía en cuenta la influencia de las luminancias de velo.

REFERENCIAS

- 1 Abella A. / García I. / Hacar F. El Túnel, Un Paso Más en el Camino, Seguridad, Normativa e Instalaciones. Arts&Press, 2012.
- 2 Asociación Mundial de Carreteras (AIPCR), Manual de Túneles de Carretera, <http://www.piarc.org>, (2011).
- 3 Título V, Epígrafe V.2, Túneles de carreteras (Construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre, IOS-98), España.
- 4 Recomendaciones del Comité Español de Iluminación CEI-26,88.
- 5 Propuesta de Norma de la CE: CENT/TC 169 WG6 y Recomendaciones para la Iluminación de Carreteras y Túneles en España. Ministerio de Fomento, 1999.
- 6 Recomendaciones para la iluminación de Carreteras y túneles en España (RICTE)
- 7 Centro de Estudios de Túneles (CETU), Dossier pilote de tunnels, Noviembre de 2000, Centre d'Étude des túneles, Bron, France.
- 8 Deslumbramiento y Uniformidad en el Alumbrado, Austria. Publicación CIE No. 31, 1976.
- 9 Aplicaciones de Iluminación, Alumbrado de túneles. Norma UNE-EN CR_14380:2007.