

# Influencia de los parámetros fotométricos en el diseño óptimo y calidad de la iluminación de carreteras<sup>(\*)</sup>

Por CARLOS LOPEZ ASIQ

Ingeniero de Caminos, C. y P.

En 1975, la Comisión Internacional de Alumbrado (CIE) publicó una edición completamente revisada de sus «Recomendaciones para la iluminación de calzadas para el tráfico rodado», basada en el concepto de luminancia.

En este informe se expone en primer lugar la información básica apoyada en los nuevos criterios de la CIE, sobre todo en lo que se refiere a cuáles son los parámetros fotométricos que se han de utilizar para definir las exigencias de calidad del alumbrado de calzadas. Después se presenta el efecto que los valores de esos parámetros tienen sobre la calidad final. Sabiendo qué factores influyen en la calidad última de la instalación de alumbrado de calzada, así como los valores que se necesitan para hacer frente a diferentes circunstancias, puede llevarse a cabo un proyecto óptimo de esa instalación.

## 1. PARAMETROS FOTOMETRICOS QUE DETERMINAN LA CALIDAD DE LA ILUMINACION DE LAS CALZADAS

Para seguridad del tráfico nocturno, una instalación de iluminación de calzada tiene que proporcionar una información visual suficiente, que permita al usuario poder reaccionar ante cualquier eventualidad de un modo correcto y a su debido tiempo. Esto sólo será posible si la instalación asegura:

- Fiabilidad de percepción.
- Comodidad visual.

### 1.1. Parámetros que influyen en la fiabilidad de la percepción.

Un objeto sólo se puede percibir si la diferencia de iluminancia (contraste) entre su superficie y el fondo tiene un valor mínimo. El valor de contraste que se necesita para percibir el objeto depende del ángulo con el que se vea y de la distribución de la luminancia en el campo de visión del observador. Cuanto mayor sea el ángulo con que se ve el objeto y más alta la luminancia de fondo mejor será la sensibilidad de contraste del ojo que mira (siempre que no haya deslumbramiento).

(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 30 de noviembre de 1980.

La sensibilidad de contraste del ojo (S C).

Se define como la inversa del contraste justamente perceptible (contraste umbral  $C_u$ ), en tanto que el contraste se define como:

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

siendo  $L_0$  la luminancia del objeto y  $L_f$  la luminancia del fondo.

En la figura 1 se da la relación entre la sensibilidad de contraste del ojo y luminancia de un disco (De CIE Publication, No. 19, 1972). La curva de trazos representa la relación en una situación en la cual la luminancia de los alrededores (con un campo de visión de 90°) es 10 veces mayor que la del fondo en sí.

Cuanto mayor sea la luminancia media de la superficie de la calzada, más alta será la luminancia del fondo y, según la figura 1, la sensibilidad de contraste (S C).

Aumentando sólo la luminancia media de la superficie de la calzada y, por tanto, la luminancia del fondo de los objetos situados en ella, se mejora la sensibilidad del ojo del conductor, a la vez que el contraste de las posibles obstrucciones que haya en la calzada.

Por lo tanto, el primer parámetro importante

## PARAMETROS FOTOMETRICOS EN LA ILUMINACION DE CARRETERAS

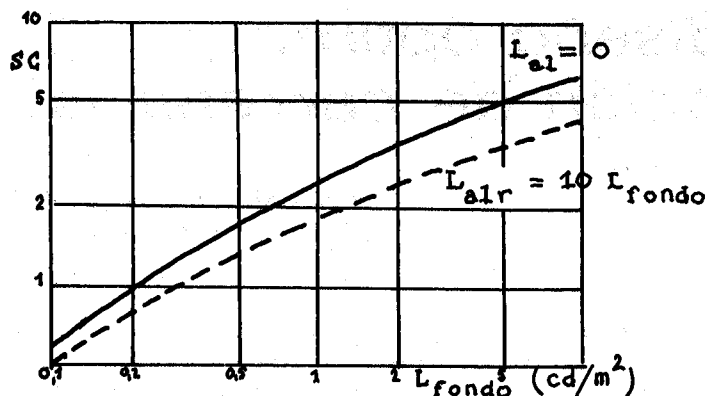


Fig. 1.—Sensibilidad de contraste, SC, en relación con la luminancia del fondo,  $L_{fondo}$  (CIE Publication 19). La curva de trazos representa la relación en una situación en la cual la luminancia de los alrededores (con un campo de visión de 90°) es 10 veces mayor que la del fondo en sí.

para la perceptibilidad es, pues:

LA LUMINANCIA MEDIA DE LA SUPERFICIE DE LA CALZADA ( $L_{med}$ ).

Los contrastes peores se encuentran siempre en los puntos en que la luminancia de la superficie de la calzada tiene el valor mínimo.

Las instalaciones de alumbrado que proporcionan una buena luminancia media en la superficie de la calzada pueden dar aún unas luminancias mínimas tan bajas en la superficie que el contraste en esos puntos resulta escaso.

Por eso, para asegurar una perceptibilidad suficiente en todos los puntos de la calzada, la diferencia admisible entre la luminancia mínima y la media de la superficie de ella tendrá que ser definida.

Esta condición nos lleva al segundo parámetro importante para la perceptibilidad:

$$\text{LA UNIFORMIDAD GLOBAL, } U_0 = \frac{L_{min}}{L_{med}}$$

Otro factor que influye directamente en la fiabilidad de la percepción es EL DESLUMBRAMIENTO. El aspecto del deslumbramiento relacionado con la fiabilidad de percepción se denomina deslumbramiento fisiológico o incapacidad (que no deberá confundirse con el deslumbramiento molesto o psicológico, del que hablaremos más adelante).

El mecanismo por el cual el deslumbramiento se traduce en una pérdida de perceptibilidad se comprenderá mejor suponiendo que en el ojo tiene lugar un proceso de dispersión de la luz.

La dispersión en la dirección de la retina actuará como una veladura brillante, superpuesta a la imagen nítida. Esta veladura puede considerarse que tiene una luminancia equivalente proporcional al grado de dispersión del deslumbramiento en la dirección de la retina.

Para definir la sensación visual global hay que sumar esta luminancia a todas las demás de la escena.

Según Holladay y otros, la luminancia equivalente de la veladura,  $L_{velo}$ , puede calcularse mediante la siguiente fórmula (empírica):

$$L_{velo} = K \cdot \left\{ \frac{E_{ojo1}}{\theta_1^2} + \frac{E_{ojo2}}{\theta_2^2} + \dots \right\} = K \cdot \sum_{i=1}^n \frac{E_{ojo i}}{\theta_i^2}$$

Siendo  $E_{ojo i}$  la iluminancia en el ojo (en un plano perpendicular a la línea de visión) causada por la fuente de deslumbramiento  $i$ -ésima (lux);  $\theta_i$  el ángulo entre la dirección de visión y la luz que incide en el ojo desde la fuente de deslumbramiento  $i$ -ésima (grados), y  $K$  el factor de envejecimiento (valor medio = 10).

Sumando esta luminancia de la veladura a las del fondo y del objeto, se obtienen los cambios de las luminancias eficaces del fondo (y, por tanto, de la sensibilidad de contraste) y los contrastes en sí.

— El aumento de las luminancias eficaces del fondo:

$$L_{fondo-eficacia} = L_{fondo} + L_{velo}$$

es decir, un aumento de la sensibilidad de contraste (véase figura 1).

— La reducción de los contrastes:

$$C_{eff} = \frac{|(L_{fondo} + L_{velo}) - (L_{obj} + L_{velo})|}{L_{fondo} + L_{velo}} = \frac{|L_{fondo} - L_{obj}|}{L_{fondo} + L_{velo}}$$

Con la curva de sensibilidad de contraste (figura 1) se puede demostrar que el efecto positivo de la ganancia de sensibilidad de contrastes no basta para compensar la pérdida de contrastes. Esto quiere decir que el objeto que sea justamente visible cuando no hay deslumbramiento (contraste umbral) no se puede ver cuando lo hay, a menos que se aumenten los contrastes reales. La cantidad de contraste extra que hace falta para volver a ver justamente el objeto cuando hay deslumbramiento, es la medida por la que se expresa la pérdida de perceptibilidad causada por el deslumbramiento de incapacidad. Esta cantidad, tal como prescribe la

CIE, se obtiene tomando el incremento de contraste de umbral relativo necesario de un objeto visto con un ángulo de 8' y se llama *incremento de umbral*,  $T I$ .

Por consiguiente, para restringir el efecto molesto del deslumbramiento en la perceptibilidad hay que especificar un límite para el INCREMENTO DE UMBRAL,  $T I$ .

Este incremento se puede determinar usando las cifras de luminancia de veladura y la de luminancia media de la superficie de la calzada, junto con una curva de sensibilidad de contraste. De este modo puede demostrarse que, con luminancias medias en la superficie de la calzada comprendidas entre 0,05 y 5  $\text{cd/m}^2$ , el incremento de umbral se puede calcular con la fórmula:

$$T I = 65 \frac{L_{velo}}{(L_{med})^{0,8}} \quad (T I \text{ en } \%)$$

## 1.2. Parámetros que influyen en la comodidad visual.

Las provisiones de comodidad visual en la calzada no son un lujo, sino una de las más importantes condiciones de la seguridad del tráfico, como lo es asimismo la fiabilidad de la percepción. Una instalación de alumbrado de calzada que proporcione poca comodidad visual se traducirá en una falta de concentración por parte de los conductores, lo que a su vez reduce su velocidad de reacción. Además, la falta de comodidad visual tiene también una influencia nefasta sobre el rendimiento de los ojos del conductor, cuya sensibilidad de contraste disminuye.

El grado de comodidad visual será mejor cuanto más alto sea el nivel de adaptación de los ojos del conductor lo que a su vez depende de la luminancia media de la superficie de la calzada (siempre que se mantenga por debajo del nivel de deslumbramiento). Así, pues, de modo similar a la condición de fiabilidad de percepción, esto nos lleva desde el punto de vista de las condiciones de comodidad visual, a una exigencia en función de LA LUMINANCIA MEDIA DE LA CALZADA,  $L_{med}$ .

Otro aspecto importante es el orden en que se suceden las zonas oscuras y brillantes de la calzada delante del conductor al circular por ella. Los efectos llamados de «cebra», se pueden reducir limitando la diferencia de luminancia entre los puntos más oscuros y más brillantes. El parámetro de este efecto es LA UNIFORMIDAD LONGITUDINAL,

$$U_L = \left( \frac{L_{med}}{L_{max}} \right)_{long}$$

El deslumbramiento tendrá lógicamente un efecto molesto sobre la comodidad visual. La sensación de molestia depende de varias características de las luminarias y de otras de la instalación de alumbrado. Se ha obtenido una medida del deslumbramiento límite a partir de varias investigaciones, que es LA SEÑAL DE CONTROL DEL DESLUMBRAMIENTO,  $G$ .

Se ha podido deducir la señal de control del deslumbramiento  $G$  a partir de las siguientes características de las luminarias y de la instalación:

### a) Características de la luminaria.

$I_{80}$ : Intensidad luminosa con un ángulo de elevación de 80° en dirección paralela al eje de la calzada ( $\text{cd}$ ).

$I_{88}$

—: Razón de la intensidad luminosa en 80 y 88° (razón de retroceso).

$F$ : Superficie aparente del área iluminada de la luminaria vista bajo un ángulo de 76°, expresada en metros cuadrados.

$C$ : Factor cromático, que depende del tipo de lámpara:

- Sodio baja presión (SOX), 0,4.
- Otras, 0.

### b) Características de la instalación.

$L_{med}$ : Luminancia media de la superficie de la calzada ( $\text{cd/m}^2$ ).

$h'$ : Distancia entre el nivel de los ojos y la altura de montaje de la luminaria (m).

$p$ : Número de luminarias por kilómetro.

La relación entre estos parámetros y la señal de control del deslumbramiento  $G$ , está dada por:

$$G = 13,84 - 3,31 \log I_{80} + 1,3 (\log I_{80}/I_{88})^{0,5} - 0,08 \log I_{80}/I_{88} + 1,29 \log F + C + 0,97 \log L_{med} + 4,41 \log h' - 1,46 \log p$$

Esta fórmula sólo se ha comprobado para las siguientes gamas de los distintos parámetros:

$$50 \leq I_{80} \leq 7000 \text{ (cd)}$$

$$1 \leq I_{80}/I_{88} \leq 50$$

$$0,007 \leq F \leq 0,4 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$0,3 \leq L_{med} \leq 7 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

$$5 \leq h' \leq 20 \text{ (m)}$$

$$20 \leq p \leq 100$$

y puede simplificarse utilizando un símbolo para

# PARAMETROS FOTOMETRICOS EN LA ILUMINACION DE CARRETERAS

las características de la luminaria específica: SLI (índice específico de la luminaria):

$$G = SLI + 0,97 \log L_{m,d} + 4,41 \log h' - 1,46 \log p$$

El deslumbramiento molesto se expresa siempre con una señal de restricción, es decir, que cuanto más alta es la señal de control  $G$  mayor es la restricción sobre el deslumbramiento molesto conseguido.

Además de los aspectos cuantitativos precedentes, hay otro importante tanto desde un punto de vista de la fiabilidad de la percepción como del de la comodidad visual y para el que, a pesar de todo, resulta imposible deducir un parámetro fotométrico. Este aspecto se llama: PROVISION DE UNA GUIA VISUAL.

La guía visual tiene que ser tal que asegure que, para un conductor, haya una indicación clara, tanto de la situación inmediata como de lo que sucede en la calzada más adelante.

## 1.3. Parámetros adicionales.

En varias publicaciones se encuentran a veces, utilizadas para describir la calidad de la iluminación de una calzada otros parámetros de luminancia distintos de los mencionados en lo que antecede. Algunos pueden tener un significado especial (investigación u otras circunstancias), pero son de difícil aplicación en la práctica. Uno de ellos es el GRADIENTE DE LUMINANCIA  $S_{max}$  que se emplea para describir la velocidad con que varía la luminancia. Otro aún en discusión es la «APRECIACION SUBJETIVA DEL VALOR DE LUMINANCIA Y LA UNIFORMIDAD», SALU. El más sencillo, de RAZON DE UNIFORMIDAD TRANSVERSAL puede usarse, en combinación con la RAZON DE UNIFORMIDAD LONGITUDINAL, para asegurar una perceptibilidad suficiente en los puntos más oscuros de la calzada. Pero como se obtiene la misma garantía usando la RAZON DE UNIFORMIDAD GLOBAL,  $U_0 = L_{min}/L_{med}$ , no hay razón para recurrir al empleo de los dos antes mencionados.

## 2. INFLUENCIA DE LOS VALORES DE LOS PARAMETROS FOTOMETRICOS EN LA CALIDAD DEL ALUMBRADO DE LAS CALZADAS

### 2.1. Influencia de los parámetros fotométricos en la fiabilidad de la percepción.

Se llevan a cabo cálculos de la cantidad de objetos que se pueden percibir contra el punto más oscuro de una calzada en varias condiciones (definidas por el nivel de luminancia, la uniformidad y el deslumbramiento).

El porcentaje de objetos que se puede ver en las condiciones específicas se llama «probabilidad de visión» o «PODER REVELADOR», RP, de la instalación. En la tabla 1 se resumen algunos de los resultados obtenidos:

TABLA 1.— *Resumen de los resultados del poder revelador, RP.*

| Condic-<br>ción | Cambio respecto<br>a condición | $L_{med}$<br>cd/m <sup>2</sup> | $V_0$ | TI<br>% | RP<br>% |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|---------|---------|
| 1               | —                              | 2                              | 0,4   | 7       | 85      |
| 2               | Nivel $L_{med}$                | 1                              | 0,4   | 7       | 70      |
| 3               | Unif. $V_0$                    | 2                              | 0,2   | 7       | 55      |
| 4               | Desl. TI                       | 2                              | 0,4   | 30      | 70      |

### 2.2. Influencia de los parámetros fotométricos en la comodidad visual.

El aspecto de la comodidad de la visión es puramente psicológico. El grado de comodidad visual que se experimenta puede determinarse pidiendo a un gran número de observadores que indiquen su evaluación de diferentes situaciones de iluminación.

Se han realizado investigaciones obteniéndose las calificaciones mostradas en la tabla 2.

TABLA 2.—*Escala de nueve puntos para evaluación subjetiva.*

| Evaluación | Nivel de luminancia/<br>uniformidad | Deslumbramiento |
|------------|-------------------------------------|-----------------|
| 1          | Malo                                | Intolerable     |
| 3          | Inadecuado                          | Molesto         |
| 5          | Regular                             | Admisible sólo  |
| 7          | Bueno                               | Satisfactorio   |
| 9          | Excelente                           | Inapreciable    |

En la figura 2 se dan los resultados de las evaluaciones llevadas a cabo en varias instalaciones de iluminación de calzadas (carreteras principales), basadas en el nivel medio de luminancia de la superficie de la calzada. Puede verse que la evaluación «bueno» (siete en la escala de nueve puntos) se obtiene con una luminancia media de la superficie de la calzada de aproximadamente 1,5 cd/m<sup>2</sup>.

En la figura 3 se indica la correlación entre  $V_1$  y la evaluación media de una cantidad de observadores, obtenida con varias instalaciones de ilumi-

## PARAMETROS FOTOMETRICOS EN LA ILUMINACION DE CARRETERAS

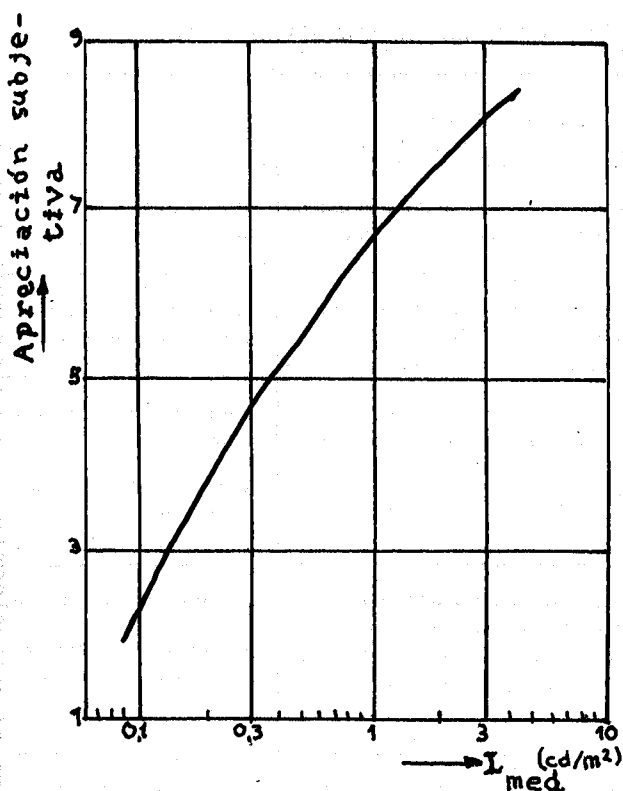


Fig. 2.—Evaluación de la luminancia media de la superficie de la calzada,  $L_{med}$  (carreteras de mucho tráfico).

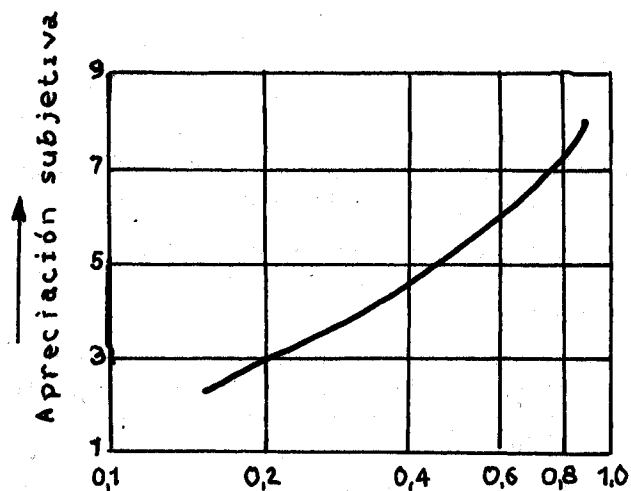


Fig. 3.—Evaluación de la uniformidad longitudinal en la distribución de la luminancia,  $U_l$ .

nación de calzadas (carreteras principales). Para conseguir la calificación de «bueno», la razón de uniformidad longitudinal debe ser de acuerdo con la figura 3, por lo menos de 0,7.

La correlación entre las evaluaciones medias de un gran número de observadores, en muchas carreteras principales, con la señal de deslumbramiento  $G$  se da en la figura 4.

Como instrumento satisfactorio para la medida de la señal de control del deslumbramiento,  $G$ , no hay ninguna; la única manera de determinar  $G$  es calcular este valor partiendo de los parámetros de luminarias e instalación (véase el apartado 2.2) o conseguir una evaluación de la instalación de un grupo de observadores que sea estadísticamente suficiente.

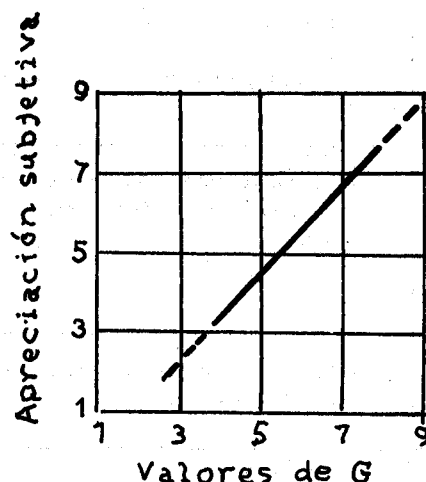


Fig. 4.—Correlación entre las evaluaciones de deslumbramiento y la señal de control de deslumbramiento,  $G$ .

### 3. RECOMENDACIONES DE LA CIE EN EL ALUMBRADO DE CALZADAS

Las recomendaciones del alumbrado de calzadas tienen que expresar diferentes condiciones para las distintas categorías de calzadas. En la tabla 3 se dan las clases de calzadas, tal como las ha definido la CIE con este fin, en tanto que en la tabla 4 se resumen los valores de los parámetros fotométricos (ya descritos) para estas distintas clases de calzadas, tal como se recomiendan en la Publicación número 12 de la CIE (segunda edición, año 1975): «Recomendaciones para el alumbrado de las calzadas para el tráfico rodado».

### 4. INFLUENCIA EN EL DISEÑO DE ILUMINACION DE CALZADAS

El tipo de instalación de alumbrado que ha de resultar solución óptima en condiciones prácticas no depende sólo de los aspectos cualitativos de la iluminación, como es lógico, sino también de consideraciones económicas y energéticas.

# PARAMETROS FOTOMETRICOS EN LA ILUMINACION DE CARRETERAS

TABLA 3. — *Clasificaciones de las calzadas* (basadas en las Recomendaciones CIE)

| Clase de calzada   |   | Tipo y densidad de tráfico (1)  | Tipo de calzada   |  |
|--------------------|---|---|---|--|
| TRAFICO MOTORIZADO | A | Tráfico motorizado pesado y de gran velocidad.  | Calzada con carriles sin acceso a pasos de nivel, control total de accesos.   | Autopistas.<br>Autovías.   |
|                    | B |   | Carretera importante para tráfico motorizado solamente, posiblemente con carriles separados para tráfico lento y/o peatones.  | Carretera interurbana.<br>Carretera principal.                   |
|                    | C | Tráfico motorizado pesado y de velocidad moderada (2).<br>o<br>Tráfico pesado mixto, de velocidad moderada. | Carretera rural o urbana, de todo uso.  | Carretera de circunvalación.<br>Carretera extrarradio, etcétera. |
| TRAFICO MIXTO      | D | Tráfico mixto importante, con una mayor proporción de tráfico lento o peatones.                             | Calles urbanas o comerciales, calles de acceso a edificios oficiales o zonas turísticas en las que el tráfico motorizado se une al tráfico pesado lento o a los peatones. | Carreteras interurbanas.<br>Calles comerciales, etc.             |
|                    | E | Tráfico mixto con límite de velocidad y densidad moderada.  | Calzadas que unen áreas residenciales y carreteras del tipo A.  | Carreteras colectoras.<br>Calles urbanas, etc.                   |

(1) En los casos en que la disposición de la calzada no esté a la altura del tipo y densidad de tráfico considerado, se recomienda instalar un alumbrado de superior calidad (escalón inmediato superior). En los casos en que la disposición de la calzada sea superior a la densidad del tráfico que ha sido calculada, se considera justificable, económicamente hablando, una ligera disminución en la calidad del alumbrado.

(2) Límite de velocidad aproximado: 70 Km/hora.

El informe presente intenta cubrir el diseño de la iluminación de calzadas desde el primer punto de vista de los mencionados.

Los valores de los parámetros fotométricos que determinan la calidad del alumbrado de una calzada obtenida con una instalación particular dependen:

- Del tipo de fuente luminosa utilizada.
- De la distribución de la intensidad luminosa de las luminarias utilizadas.
- De las propiedades reflectantes de las superficies de la calzada de que se trate.
- De la geometría y del tipo de distribución.

## 4.1. Distribución de la intensidad luminosa.

En las nuevas recomendaciones de la CIE (1975) la limitación del deslumbramiento se da en función de los parámetros que determinan directamente el

efecto del deslumbramiento molesto y del de incapacidad, como ha quedado dicho ya.

La nueva clasificación de luminarias de la CIE se basa en tres propiedades fundamentales de las luminarias:

- La distancia a la que la luz de la luminaria queda distribuida a lo largo de la calzada, que es lo que se denomina «alcance» de esa luminaria.
- La distribución luminosa en el sentido transversal de la calzada: la «dispersión».
- La facilidad de poder controlar el deslumbramiento producido por la luminaria: su «control».

El «alcance» queda definido por el ángulo de elevación (medido hacia arriba desde el nadir) del centro del haz,  $\gamma_{max}$ , y es el medio entre los dos ángulos de elevación del 90 por 100 de  $I_{max}$  del

# PARAMETROS FOTOMETRICOS EN LA ILUMINACION DE CARRETERAS

TABLA 4.—Recomendación para instalaciones de alumbrado de calzadas de varias categorías (según la Publicación número 12 de la CIE, segunda edición, 1975)

|         | Alrededores | Nivel de luminancia (1)   | Coeficiente de uniformidad   |   | Control de deslumbramiento               |                                    |
|---------|-------------|---|--|---|--|------------------------------------|
|         |             | Luminancia media en servicio sobre la superficie de la calzada = $L_{med}$ (cd/m <sup>2</sup> ) | Coeficiente de uniformidad media<br>$U_{II} = \frac{L_{min}}{L_{med}}$ | Coeficiente de uniformidad longitudinal $U_I$ (3) | Indice del control del deslumbramiento G | Incremento de umbral (4)<br>TI (%) |
| A       | Cualquiera  | 2   | 0,4  | 0,7   | 6  | 10 (2)                             |
| B 1 (2) | Claros      | 2   |  |   | 5  | 10                                 |
|         | Oscuros     | 1   |  | 0,5   | 6  | 10 (2)                             |
| C 1 (2) | Claros      | 2   |  |   | 5  | 20 (2)                             |
|         | Oscuros     | 1   |  |   | 6  | 10                                 |
| D       | Claros      | 2   |  |   | 4  | 20                                 |
| E 1 (2) | Claros      | 1   |  |   | 4  | 20                                 |
|         | Oscuros     | 0,5   |  |   | 5  | 20 (2)                             |

- (1) El nivel de luminancia recomendado es el valor en servicio de la luminancia media de la superficie de la calzada. Para mantener este nivel debe considerarse un factor de depreciación de 0,8 como mucho, según el tipo de luminaria y el grado local de contaminación atmosférica.
- (2) En vista de la escasa experiencia actual en el empleo del concepto del TI, es preferible no exceder de un valor 2/3 del indicado.
- (3)  $U_I$  es la razón entre las luminarias mínima y máxima en la línea paralela al eje de la calzada que pasa por el lugar del observador. Para ello, éste se coloca en el centro de la vía de tráfico. Si hay más de un carril deberá tomarse el valor más bajo de los así obtenidos en todos ellos. En los demás cálculos el observador ha de situarse a 1/4 del lado derecho del ancho de la calzada.
- (4) Se supone que el ángulo de apantallamiento del techo de un coche es de 20°, lo que significa que las luminarias colocadas por encima del plano inclinado de 20° no deben incluirse en el incremento de umbral (o luminancia de veladura) a la hora de hacer los cálculos. En éstos se supone además que el observador está mirando a un punto de la calzada situado a 90 metros delante de él y puesto en un lugar tal que ve la primera luminaria con un ángulo de 19° (es decir, aproximadamente el valor máximo del incremento de umbral es lo que se obtendrá de este modo).

plano, que pasa por el máximo, tal como se ilustra en la figura 5.

Los grados del «alcance» se definen como sigue:

$\gamma_{max} < 60^\circ$ : alcance corto.

$60^\circ \cdot \gamma_{max} \cdot 70^\circ$ : alcance intermedio.

$\gamma_{max} > 70^\circ$ : alcance largo.

La «dispersión» se define mediante la posición de la línea (paralela al eje de la calzada) que corta exactamente al contorno de 90 por 100  $I_{max}$  en la calzada. Pueden encontrarse dos de estas líneas, de las cuales se tomará la más alejada como se

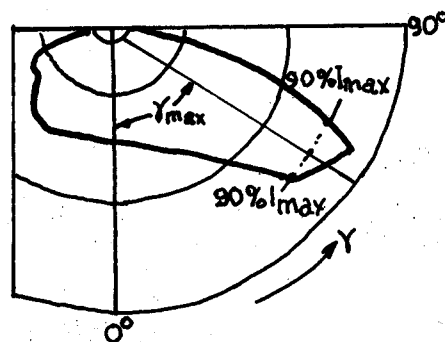


Fig. 5.—Curva de intensidad en el plano de máxima intensidad luminosa, en el que se da una indicación del ángulo  $\gamma_{max}$  para la determinación del «alcance».

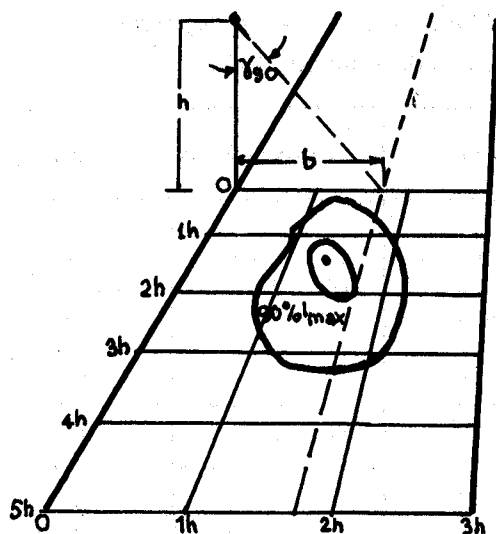


Fig. 6.—Diagrama isocandela relativo proyectado en la calzada, en el que se incluye una indicación del ángulo  $\gamma_{90}$  para la determinación de la "dispersión".

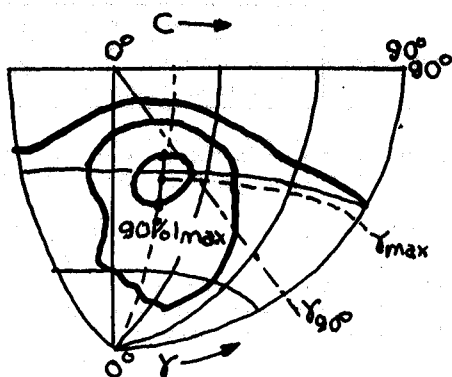


Fig. 7.—Diagrama isocandela relativo en proyección acimutal (sinusoidal), que incluye una indicación de los ángulos  $\gamma_{max}$  y  $\gamma_{90}$  para la determinación del "alcance" y la "dispersión".

indica en la figura 6. La posición de esta línea queda mostrada por el ángulo  $\gamma_{90} = \arctg b/h$ .

Los tres grados de «dispersión» se definen como sigue:

- $\gamma_{90} < 45^\circ$ : dispersión estrecha.
- $45^\circ \leq \gamma_{90} \leq 55^\circ$ : dispersión media.
- $\gamma_{90} > 55^\circ$ : dispersión ancha.

Tanto el alcance como la dispersión de una luminaria se pueden determinar más fácilmente partiendo del diagrama isocandela en proyección acimutal (sinusoidal), que incluye una indicación de

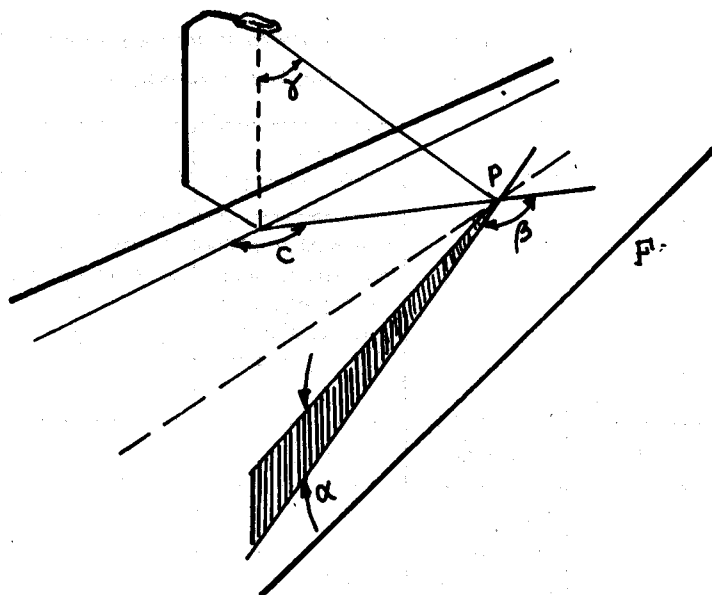


Fig. 8.—Ángulos de los que depende el coeficiente de luminancia:  $\alpha$ , ángulo de observación (con la horizontal);  $\beta$ , ángulo entre el plano de incidencia y el de observación;  $\gamma$ , ángulo de incidencia.

los ángulos  $\mu_{max}$  y  $\gamma_{90}$  para la determinación del «alcance» y la «dispersión». Este método se ilustra en la figura 7.

El «control» queda definido por el índice específico de la luminaria SLI. También en el caso del «control» hay que distinguir:

- SLI < 2: control limitado.
- $2 \leq \text{SLI} \leq 4$ : control moderado.
- SLI > 4: control intenso.

## 4.2. Propiedades reflectantes de la superficie de la calzada.

Para poder calcular los parámetros de luminancia hay que conocer las propiedades reflectantes de su superficie. Se pueden dar éstas por una serie de coeficientes de luminancia.

Este coeficiente de luminancia se define como la relación entre la luminancia en un punto y la iluminancia horizontal en ese mismo punto (obtenidas ambas en una misma luminaria):

$$q = \frac{L}{E}$$

El coeficiente de luminancia depende de las posiciones del observador y de la fuente de luz respecto al punto de la calzada que se esté conside-



# PARAMETROS FOTOMETRICOS EN LA ILUMINACION DE CARRETERAS

*Clasificación de varias iluminarias con respecto al alcance, difusión y control*

| Luminaria       | Lámpara       | Alcance (*) |                | Difusión (**) |               | Control (***) |     |
|-----------------|---------------|-------------|----------------|---------------|---------------|---------------|-----|
|                 |               |             | $\gamma_{max}$ |               | $\gamma_{90}$ |               | SLI |
| HGS 201- 5 c.o. | 250 HPL-N     | c           | 51             | n             | 23            | i             | 6,0 |
| HGS 201-10 c.o. | 250 HPL-N     | c           | 53             | n             | 29            | i             | 5,5 |
| HGS 201-15 c.o. | 250 HPL-N     | c           | 54             | n             | 33            | i             | 5,1 |
| HGS 201-20 c.o. | 250 HPL-N     | c           | 55             | n             | 38            | i             | 5,2 |
| HGS 201- 5 c.o. | 400 HPL-N     | c           | 53             | n             | 22            | i             | 5,2 |
| HGS 201-10 c.o. | 400 HPL-N     | c           | 53             | n             | 29            | i             | 5,1 |
| HGS 201-15 c.o. | 400 HPL-N     | c           | 56             | n             | 34            | i             | 4,6 |
| HGS 201-20 c.o. | 400 HPL-N     | c           | 57             | n             | 38            | i             | 5,1 |
| HRP 011         | 250 HPL-N     | c           | 53             | n             | 41            | i             | 6,3 |
| HRP 011         | 400 HPL-N     | c           | 37             | n             | 37            | i             | 5,7 |
| HRP 012         | 2 x 125 HPL-N | c           | 37             | n             | 43            | i             | 5,8 |
| HRP 013         | 2 x 250 HPL-N | c           | 53             | n             | 44            | i             | 4,9 |
| HRP 013         | 400 HPL-N     | c           | 40             | n             | 42            | i             | 4,5 |
| HRL 40-4        | 250 HPL-N     | i           | 67             | m             | 48            | i             | 1,7 |
| HRL 40-4        | 400 HPL-N     | i           | 67             | n             | 32            | i             | 0,8 |
| HRL 40/s-41/s   | 250 HPL-N     | c           | 57             | n             | 23            | m             | 3,9 |
| HRL 40/s-41/s   | 400 HPL-N     | c           | 53             | n             | 17            | m             | 2,7 |
| SGS 201- 5 c.o. | 250 SON       | c           | 52             | n             | 22            | i             | 5,3 |
| SGS 201-10 c.o. | 250 SON       | c           | 53             | n             | 29            | i             | 5,2 |
| SGS 201-15 c.o. | 250 SON       | c           | 57             | n             | 37            | i             | 4,8 |
| SGS 201-20 c.o. | 250 SON       | c           | 57             | n             | 38            | i             | 4,8 |
| SGS 201- 5 c.o. | 400 SON       | c           | 52             | n             | 18            | i             | 4,8 |
| SGS 201-10 c.o. | 400 SON       | c           | 53             | n             | 28            | i             | 4,2 |
| SGS 201-15 c.o. | 400 SON       | c           | 54             | n             | 32            | i             | 4,2 |
| SGS 201-20 c.o. | 400 SON       | c           | 58             | n             | 37            | i             | 4,1 |
| SRP 012         | 250 SON       | c           | 53             | n             | 38            | i             | 4,8 |
| SRP 012         | 400 SON       | c           | 49             | n             | 37            | m             | 3,7 |
| SRP 152         | 250 SON/T     | c           | 38             | m             | 48            | i             | 5,1 |
| SRP 152         | 400 SON/T     | c           | 38             | m             | 48            | i             | 4,5 |
| SRP 153         | 2 x 250 SON/T | c           | 38             | m             | 50            | i             | 4,8 |
| SRP 153         | 2 x 400 SON/T | c           | 33             | n             | 44            | i             | 4,0 |
| SRP 163         | 2 x 250 SON/T | i           | 62             | n             | 37            | m             | 3,7 |
| SRP 163         | 2 x 400 SON/T | i           | 62             | n             | 37            | m             | 2,7 |
| SRM 120         | 135 SOX       | i           | 65             | a             | 62            | i             | 4,1 |
| SRM 120 X       | 180 SOX       | i           | 69             | a             | 67            | m             | 3,6 |
| SDP 252         | 135 SOX       | c           | 48             | m             | 53            | i             | 5,3 |
| SDP 253         | 180 SOX       | c           | 48             | m             | 53            | i             | 4,8 |

(\*) c = corta  $\gamma_{min} < 60^\circ$

i = intermedia:  $60^\circ \leq \gamma_{max} \leq 70^\circ$

l = larga  $\gamma_{max} > 70^\circ$

(\*\*) n = estrecha  $\gamma_{90} < 45^\circ$

m = media  $45 \leq 90 \leq 55^\circ$

a = ancha  $\gamma_{90} > 55^\circ$

(\*\*\*) l = limitado  $SLI < 2$

m = moderado  $2 \leq SLI \leq 4$

i = intenso  $SLI > 4$

rando. Esta dependencia puede describirse mediante los ángulos ilustrados en la figura 8 en la que:

$\alpha$  = Angulo de observación (con la horizontal).

$\beta$  = Angulo entre el plano de incidencia y el de observación.

$\gamma$  = Angulo de incidencia.

Por consiguiente:  $q = q(\alpha, \beta, \gamma)$ . En la zona de la calzada que resulta más importante para un conductor de automóvil (60 a 160 metros delante de él)  $\alpha$  varía sólo entre  $0,5$  y  $1,5^\circ$ . (La medida del coeficiente de luminancia se hace con  $\alpha = 1^\circ$ .)

Por lo tanto, en la iluminación de calzadas puede decirse que el coeficiente de luminancia sólo

# PARAMETROS FOTOMETRICOS EN LA ILUMINACION DE CARRETERAS

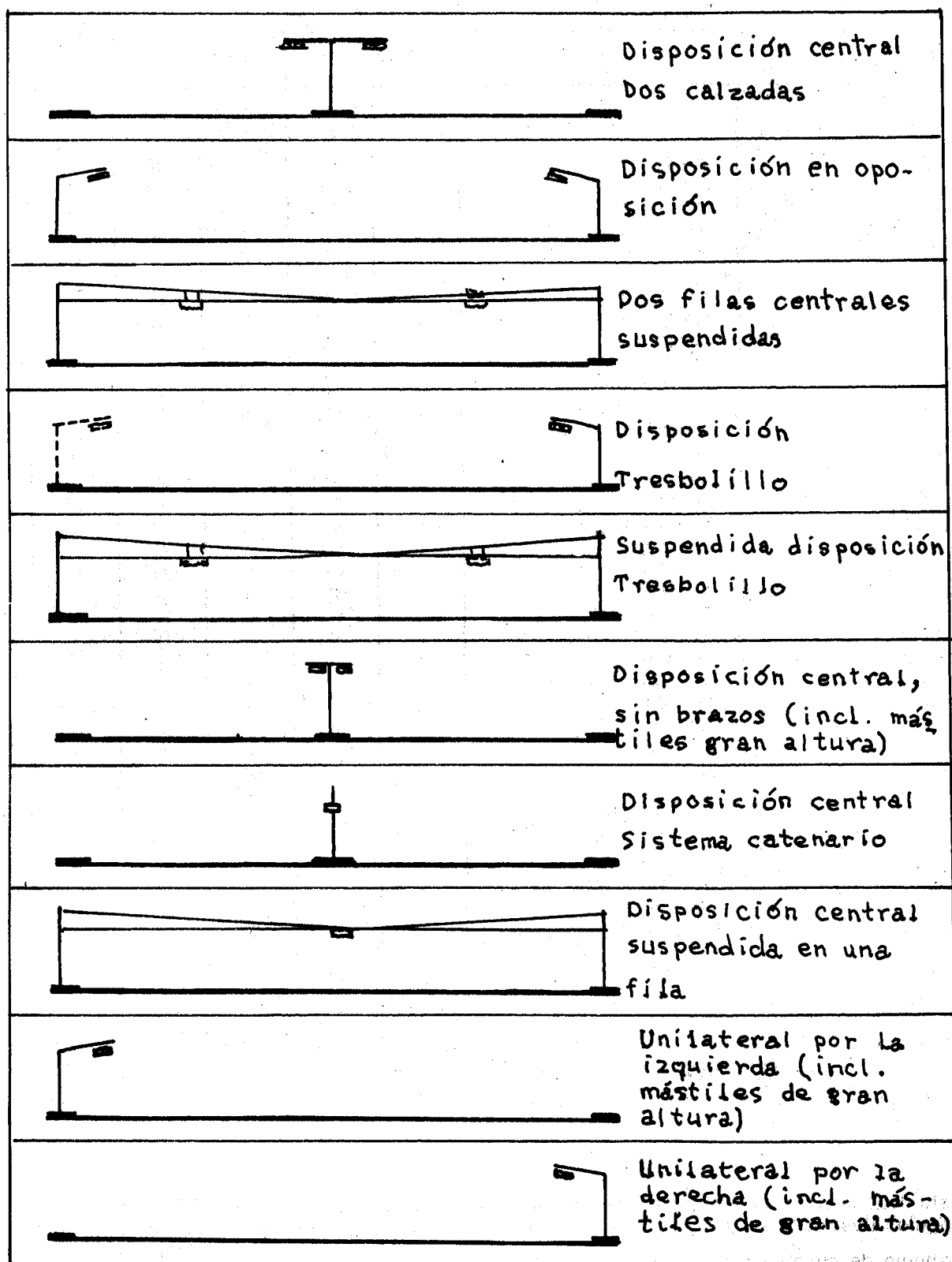


Fig. 9.—Tipos de distribuciones, para los que se han hecho los esquemas.

depende de los valores de dos ángulos ( $\beta$  y  $\gamma$ ). Así, pues, todas las propiedades de reflexión de una superficie pueden darse en una tabla bidimensional en la que se exprese el valor de  $q$  que corresponde a cada combinación de  $\beta$  y  $\gamma$ . Por razones de conveniencia al hacer cálculos de luminancia estas tablas suelen darse en función de  $q \cos^3 \gamma$  y se llaman tablas  $R$ :

$$L = q(\beta, \gamma) \cdot E(c, \gamma) = \frac{q(\beta, \gamma) \cdot I(c, \gamma)}{h^2} \cdot \cos^3 \gamma = R(\beta, \gamma) \frac{I(c, \gamma)}{h^2}$$

Con este fin se dispone de programas de calculador.

Para los fines prácticos del diseño de una iluminación de calzada, las características de su superficie, o lo que es igual, su correspondiente tabla  $R$ , pueden describirse mediante dos o tres valores característicos nada más, que se pueden medir con bastante facilidad. En estos valores característicos puede tratarse una tabla  $R$  en la que basar con suficiente precisión los cálculos de luminancia:

Los tres valores característicos son los que siguen:

- Coeficiente de luminancia media  $Q_0$ .
- Factor especular 1,  $S_1$ .
- Factor especular 2,  $S_2$ .

que se definen así:

$$Q_0 = \frac{\int q \cdot d\omega}{\int d\omega} ; S_1 = \frac{R(0, 2)}{R(0, 0)} ; S_2 = \frac{Q_0}{R(0, 0)}$$

siendo  $R(0, 2)$  y  $R(0, 0)$  los valores de  $R$  en los ángulos específicos  $\beta$  y  $\gamma$ , es decir,  $\beta = 0^\circ$  y  $\gamma = \arctg 63,4^\circ$  para  $R(0, 2)$ , y  $\beta = 0^\circ$  y  $\gamma = 0^\circ$  para  $R(0, 0)$ .

La tabla  $R$  numérica se puede representar también como diagrama tridimensional ( $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $R$ ).

### 4.3. Determinación de la geometría de la instalación.

Entiéndase por «geometría de la instalación» el tipo de distribución, la separación y la altura de montaje de las luminarias.

Los parámetros de calidad fotométricos resultantes de varios tipos de geometrías pueden evaluarse en relación con las exigencias correspon-

dientes de calidad, encontrándose de ese modo una geometría óptima. Para este proceso de diseño se necesitan métodos, con los que determinar los parámetros de calidad fotométrica de las distintas geometrías.

En la actualidad el proyecto de iluminación de calzadas suele efectuarse con ayuda de calculadores electrónicos. De todos modos hay también otras ayudas que pueden resultar útiles a la hora de hacer un proyecto sin tener que recurrir al empleo directo de un calculador. Las más importantes de esas ayudas son:

- Las «hojas de características fotométricas de la luminaria».
- Los nomogramas para el cálculo del deslumbramiento.
- Los esquemas de iluminación para el alumbrado de calzadas, que incluyen tablas de rendimiento de la instalación, según las recomendaciones CIE.

Los esquemas de iluminación para el alumbrado de calzadas contiene tablas que dan los valores calculados con ordenador, de los parámetros de calidad fotométrica de cuatro superficies patrones, para una gama de secciones típicas de calzada y de distribuciones de luminarias. En la figura 9 se dan varios tipos de distribuciones usadas.

## REFERENCIAS

- ADRIAN, W.: "Grundlagen der physiologischen und psychologischen Blendung und ihre numerische Darstellung". Licht-technik 27, 1975.
- ADRIAN, W. und EBERBACH, K.: "Ueber den Zusammenhang zwischen Sehschwelle und Umfeldgröße". Optik 28, 1968-1969.
- DE BOER, J. B.: "Public Lighting (ed), 1967.
- DE BOER, J. B.: "Quality aspects in public lighting". Engineering Report 24, 1972.
- V. BOMMEL, W. J. M.: "Gepolariseerd licht en de toepassing daarvan voor autoverlichting". University of Technology. Eindhoven, 1970.
- V. BOMMEL, W. J. M.: "Optimum utilisation of energy in Public Lighting". Engineering Report 31, 1974.
- V. BOMMEL, W. J. M., and WESTERMANN, H. O.: "Illuminance calculations for Public Lighting". Engineering Report 26, 1974.
- V. BOMMEL, W. J. M.: "Luminance calculations for Road Lighting". Engineering Report 27 (sec. cd.), 1976.
- LE GRAND, Y.: "Optique Physiologique", I, II, III, 1948, 1952, 1956.

---

## PARAMETROS FOTOMETRICOS EN LA ILUMINACION DE CARRETERAS

---

DE GRIIS, J. C.: "Visuelle beordeling van verlichtingscriteria in Den Haag en Amsterdam". *Elektrotechnik* 50, 1972.

HOLLADAY, L. L.: "Action of a light source in the field of view in lowering visibility". *J.O.S.A.* 14, 1927.

WALDRAM, J. H.: "The revealing power of street lighting installations". *Trans. I.E.S. London*, 1938.

RANGE, H. D.: "Ein Strassenreflektimeter zur vereinfachten Bestimmung der Lichttechnischen Eigenschaften von Fahrbahnlagen". *Lichttechnik* 25, 1973.

SMITH, F. C.: "Reflektion factors and revealing power". *Trans. I.E.S. London*, 3, 1938.

STILES, W. S.: "The effect of glare on the brightness difference threshold". *Proc. Roy. Soc. London*, 1429.

CIE PUBLICATION No. 19 (TC-3.1): "A unified framework of methods for evaluating visual performance aspects of lighting", 1972.

CIE PUBLICATION No. 12 (sec. ed.) (TC-4.6): "Recommendations for the lighting of roads for motorized traffic", 1975.

CIE PUBLICATION No. 30 (TC-4.6): "Calculation and measurement of luminance and iluminance in road lighting", 1976.

CIE PUBLICATION No. 31 (TC-4.6): "Glare and uniformity in road lighting installations", 1976.

CIE PUBLICATION No. 34 (TC-4.6): "Road lighting lantern and installation data-photometrics, classification and performance", 1976.