Capítulo 6.

PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

6.1. Ley de la inversa del cuadrado de la distancia

Desde los experimentos primitivos se ha comprobado que las iluminancias producidas por las fuentes de luz disminuyen inversamente con el cuadrado de la distancia desde el plano a iluminar a la fuente. Se expresa por la fórmula siguiente:

$$E = \frac{I}{d^2} \quad (\text{lx})$$

donde E es el nivel de iluminación en lux (lx), I es la intensidad de la fuente en candelas (cd), y *d* es la distancia de la fuente de luz al plano receptor perpendicular.

De esta forma podemos establecer la relación de iluminancias E_1 y E_2 que hay entre dos planos separados una distancia *d* y *D* de la fuente de luz respectivamente:

$$E_1 \cdot d^2 = E_2 \cdot D^2$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{D^2}{d^2}$$

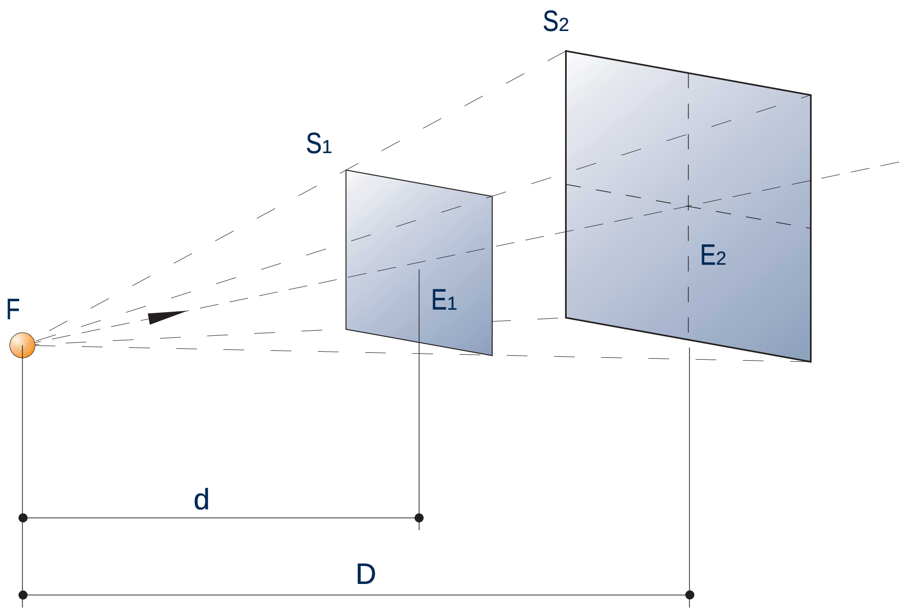

Figura 1. Distribución del flujo luminoso sobre distintas superficies.

Esta ley se cumple cuando se trata de una fuente puntual de superficies perpendiculares a la dirección del flujo luminoso. Sin embargo, se puede suponer que la ley es lo suficientemente exacta cuando la distancia a la que se toma la medición es, por lo menos, cinco veces la máxima dimensión de la luminaria (la distancia es grande con relación al tamaño de la zona fuente de luz).

6.2. Ley del coseno

En el caso anterior la superficie estaba situada perpendicularmente a la dirección de los rayos luminosos, pero cuando forma con ésta un determinado ángulo a, la fórmula de la *ley de la inversa del cuadrado de la distancia* hay que multiplicarla por el coseno del ángulo correspondiente cuya expresión constituye la llamada *ley del coseno,* que se expresa como:

$$E = \frac{I}{d^2} \cdot \cos \alpha \quad (\text{lx})$$

"La iluminancia en un punto cualquiera de una superficie es proporcional al coseno del ángulo de incidencia de los rayos luminosos en el punto iluminado".

En la Fig. 2 se representan dos fuentes de luz F y F´ con igual intensidad luminosa (I) y a la misma distancia (d) del punto P. A la fuente F con un ángulo de incidencia a igual a cero, corresponde un cos0 = 1, y produce una iluminación en el punto P de valor:

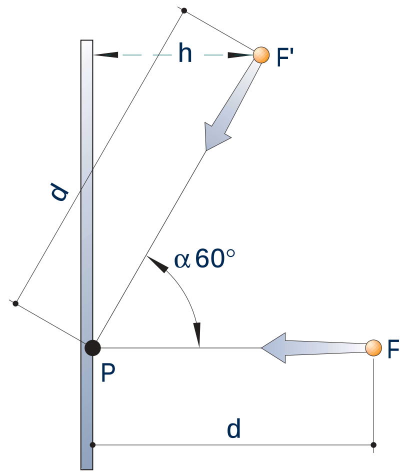

Figura 2. Iluminancia en un punto desde dos fuentes de luz con diferente ángulo de incidencia.

$$E_p = \frac{I}{d^2} \cdot \cos 0 = \frac{I}{d^2} \cdot 1 \;\Rightarrow\; E_p = \frac{I}{d^2} \quad \text{(lx)}$$

De la misma forma el F´ con un ángulo α = 60°, al que corresponde el cos60° = 0´5, producirá en el mismo punto una iluminación de valor:

$$E'_p = \frac{I}{d^2} \cdot \cos 60° = \frac{I}{d^2} \cdot 0'5 \;\Rightarrow\; E'_p = \frac{1}{2} \cdot \frac{I}{d^2} \quad \text{(lx)}$$

Por lo tanto, $E'_p = 0'5 \cdot E_p$, es decir, para obtener la misma iluminación en el punto P, la intensidad luminosa de la fuente F´ debe ser el doble de la que tiene la fuente F.

En la práctica, generalmente no se conoce la distancia *d* del foco al punto considerado, sino su altura *h* a la horizontal del punto. Empleando una sencilla relación trigonométrica y sustituyendo ésta en la ecuación inicial, obtenemos una nueva relación en la cual interviene la altura *h:*

$$\cos\alpha = \frac{h}{d} \;\Rightarrow\; d = \frac{h}{\cos\alpha}$$

$$E_p = \frac{I}{d^2} \cdot \cos\alpha = \frac{I}{\left(\dfrac{h}{\cos\alpha}\right)^2} \cdot \cos\alpha = \frac{I}{h^2} \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos\alpha$$

$$E_p = \frac{I}{h^2} \cdot \cos^3\alpha \quad \text{(lx)}$$

6.3. Iluminación normal, horizontal, vertical y en planos inclinados

En la Fig. 3 la fuente F ilumina tres planos situados en posiciones normal, horizontal y vertical respecto al mismo. Cada uno de ellos tendrá una iluminancia llamada:

E_N = Iluminancia normal.

E_H = Iluminancia horizontal.

E_V = Iluminancia vertical.

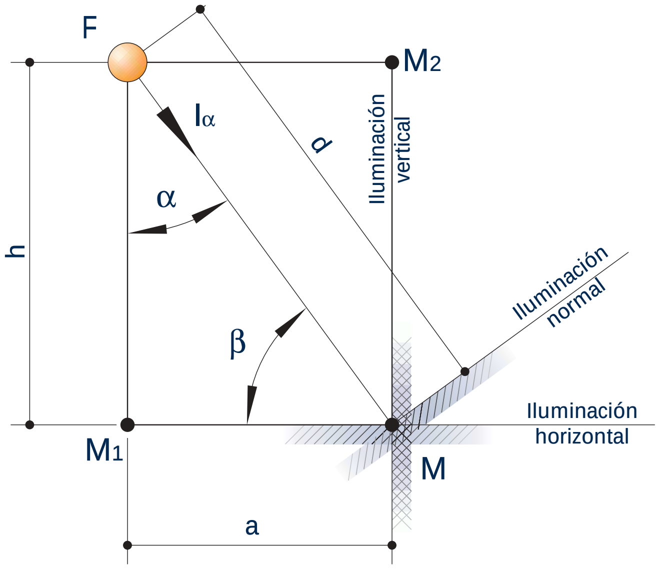

Figura 3. Iluminancia normal, horizontal y vertical.

Vamos a determinar la iluminancia normal, horizontal y vertical para el punto M de la Fig. 3.

Iluminación normal

Aplicamos la ley de la inversa del cuadrado de la distancia:

$$E_N = \frac{I_\alpha}{d^2} \quad \text{(lx)}$$

donde Iα es la intensidad luminosa bajo el ángulo a. Prácticamente, sólo se considera la iluminancia normal de un punto en el caso que éste se encuentre situado en la vertical de la fuente sobre el plano horizontal (punto M_1), por lo que la fórmula anterior se convierte en:

$$E_N = \frac{I}{h^2} \quad \text{(lx)}$$

y también cuando está situado en línea recta con la fuente sobre el plano vertical (punto M_2), siendo la iluminancia:

$$E_N = \frac{I}{a^2} \quad \text{(lx)}$$

Iluminación horizontal

Si aplicamos directamente la ley del coseno, tenemos que:

$$E_H = E_N \cdot \cos\alpha = \frac{I_\alpha}{d^2} \cdot \cos\alpha \quad \text{(lx)}$$

Esta expresión la podemos expresar en relación con la altura h que existe entre la fuente F y el punto M (d = h / cosα):

$$E_H = \frac{I_\alpha}{h^2} \cdot \cos^3\alpha \quad \text{(lx)}$$

Iluminación vertical

En este caso también aplicamos directamente la ley del coseno, y obtenemos que:

$$E_V = E_N \cdot \cos\beta \quad (lx)$$

Entre los ángulos α y β existe una relación sencilla, ya que ambos pertenecen a un triángulo rectángulo.

$$\alpha + \beta + 90° = 180° \quad \Rightarrow \quad \beta = 90° - \alpha$$

Aplicando relaciones trigonométricas:

$$\cos\beta = \cos(90° - \alpha) = \cos 90° \cdot \cos\alpha + \mathrm{sen}\, 90° \cdot \mathrm{sen}\,\alpha$$

Por lo tanto, $\cos\beta = \mathrm{sen}\,\alpha$. Sustituimos este valor en la expresión y obtenemos que:

$$E_V = E_N \cdot \mathrm{sen}\,\alpha \quad (lx)$$

$$E_V = \frac{I_\alpha}{d^2} \cdot \mathrm{sen}\,\alpha \quad (lx)$$

Podemos expresar la ecuación en función de la altura h que existe entre la fuente F y el punto M.

$$E_V = \frac{I_\alpha}{h^2} \cdot \cos^2\alpha \cdot \mathrm{sen}\,\alpha \quad (lx)$$

Iluminación en planos inclinados

El plano vertical puede cambiar a través de un ángulo γ como el que aparece en la Fig. 4. Dicho ángulo γ es el que forma el plano vertical que contiene al punto P con el plano de incidencia de la luz.

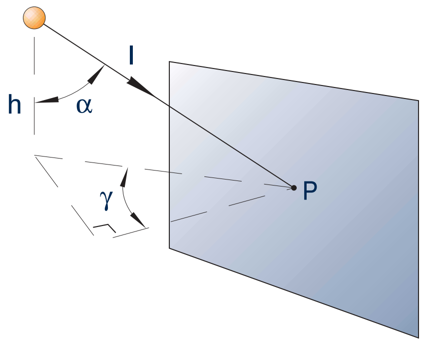

Figura 4. Iluminancia en el punto P.

Teniendo esto en cuenta, la expresión anterior se transforma en:

$$E_{Pl} = \frac{I_\alpha}{h^2} \cdot \cos^2\alpha \cdot \mathrm{sen}\,\alpha \cdot \cos\gamma \quad (lx)$$

h es la altura vertical de la fuente de luz sobre el plano horizontal que contiene al punto P.

6.4. Relaciones de iluminancia

Se han propuesto diferentes conceptos para describir la luz que proviene de otras direcciones que la vertical, entre los que se incluyen los que vamos a ver a continuación. Éstos se deben considerar como parámetros de confort junto con otros como el nivel de iluminación (iluminancia).

Vertical / Horizontal

La experiencia obtenida de las instalaciones de alto nivel de iluminación con un buen control del deslumbramiento, indica que la relación entre la iluminancia vertical (E_V) y la iluminancia horizontal (E_H) para un buen modelado* no debe ser inferior a 0´25 en las principales direcciones de la visión.

$$\frac{E_V}{E_H} \geq 0'25$$

* Modelado: Habilidad de la luz para revelar la textura y forma tridimensional de un objeto creando juegos de luces y sombras.

Vectorial / Esférica

Los efectos de la iluminación direccional se pueden describir en parte por la iluminancia vectorial y la relación entre la iluminancia vectorial y la esférica.

El vector iluminancia E en un punto tiene una magnitud igual a la diferencia máxima en iluminancia sobre elementos de superficie diametralmente opuestos en un pequeño disco (Fig. 5) ubicados en un punto, siendo su dirección del elemento de mayor iluminancia hacia el de menor iluminancia.

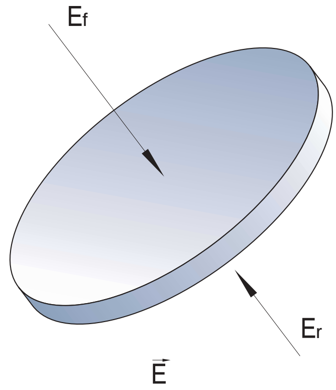

Figura 5. Vector ilumanacia E = Ef – Er.

La media esférica en un punto es la iluminancia media sobre toda la superficie de una pequeña esfera ubicada en dicho punto (Fig. 6).

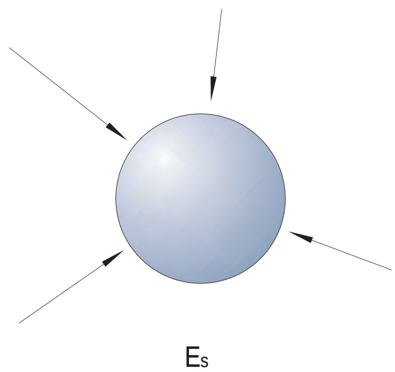

Figura 6. Iluminancia media esférica E_S.

La intensidad direccional de la iluminación se puede indicar por el índice de modelado dado por la relación entre la iluminancia vectorial y la iluminancia esférica media:

$$\frac{E}{E_S}$$

Si la medimos utilizando una esfera de radio r que recibe un haz de luz con flujo luminoso F, esta es:

$$E_S = \frac{\Phi}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

La iluminancia E en un elemento de la superficie de radio r es:

$$E = \frac{\Phi}{\pi \cdot r^2}$$

En una habitación con luz difusa y con piso, paredes y cielorraso con reflexión difusa, tenemos que $\vec{E} \to 0$ (es decir, no existen sombras). Bajo estas condiciones, el índice de modelado es $\vec{E} / E_s \to 0$. En cambio, en una habitación completamente oscura donde la luz proviene de una sola dirección (por ejemplo la luz del Sol), $\vec{E} = E$ (es decir, sombras oscuras). Bajo estas condiciones, el índice de modelado es $\vec{E}$ / $E = E / E_s = 4$.

Por lo tanto, el índice de modelado puede tener valores entre 0 y 4.
El vector $\vec{E}$ debe tener una dirección descendente (preferentemente entre 45° y 75° a la vertical) para obtener una apariencia natural de las facciones humanas.

Cilíndrica / Horizontal

Un concepto alternativo para describir el efecto de modelado es la relación entre iluminancia cilíndrica y la iluminancia horizontal en un punto.
La iluminancia cilíndrica media E_C en un punto es la iluminancia media sobre la superficie curva de un pequeño cilindro ubicado en el punto (Fig. 7). Salvo indicación contraria, el eje del cilindro debe ser vertical.

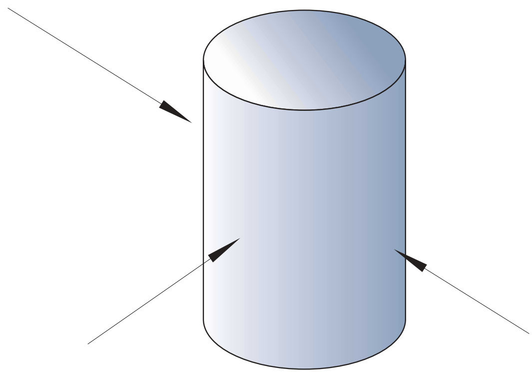

Figura 7. Iluminacia cilíndrica media E_C.

La iluminancia cilíndrica en un punto es igual a la iluminancia vertical media en todas las direcciones en dicho punto. Se logra un buen modelado cuando la relación es :

$$0'3 \leq \frac{E_C}{E_H} \leq 3$$

Cabe destacar que en general la dirección es tomada en cuenta automáticamente, por lo tanto no se necesita especificarla adicionalmente, como en el caso de la relación vectorial / esférica: cuando la luz proviene directamente de arriba, $E_C = 0$ y E_C / $E_H = 0$; cuando la luz es horizontal, $E_H = 0$ y E_C / $E_H \rightarrow \infty$.

Vertical / Semicilíndrica

Las pruebas que se han llevado a cabo relacionadas con la iluminación de áreas exteriores para peatones (con niveles de iluminación bajos) han demostrado que la relación entre la iluminancia vertical y la semicilíndrica proporciona una media útil de aceptación de modelado de las facciones humanas, para esta área de aplicación.
La iluminancia semicilíndrica $E_{semincil}$ en un punto en una dirección horizontal dada es la iluminancia media sobre una superficie curva de un semicilindro pequeño vertical ubicado en dicho punto con una superficie curva enfocada a la dirección especificada (Fig. 8).

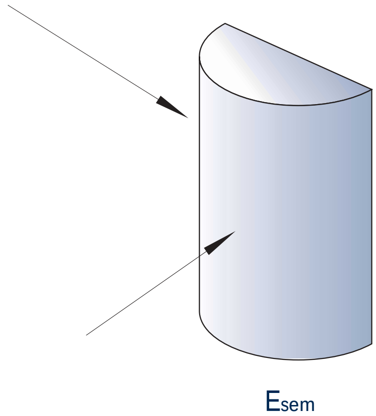

Figura 8. Iluminancia semicilíndrica.

La iluminación de relieve bien equilibrada (ni muy chata ni muy dura) se obtiene a:

$$0'8 \leq \frac{E_V}{E_{semincil}} \leq 1'3$$

Las relaciones extremas son:

Cero	modelado muy duro.
$(\pi/2) = 1'57$	modelado muy chato.

6.5. Ley de Lambert

Existen superficies emisoras o difusas que al observarlas desde distintos ángulos se tiene la misma sensación de claridad. A estas superficies se las denomina emisores o difusores perfectos.

Si L_0 es la luminancia según la normal y L_α la luminancia según el ángulo de observación α, se verifica que $L_\alpha = L_0$ para cualquier ángulo α.

Como $L_0 = \dfrac{I_0}{S}$ y $L_\alpha = \dfrac{I_\alpha}{S \cdot \cos\alpha}$, se cumple la ecuación:

$$I_\alpha = I_0 \cdot \cos\alpha$$

Esta relación se conoce como Ley de Lambert y sólo la cumplen los emisores o difusores perfectos.

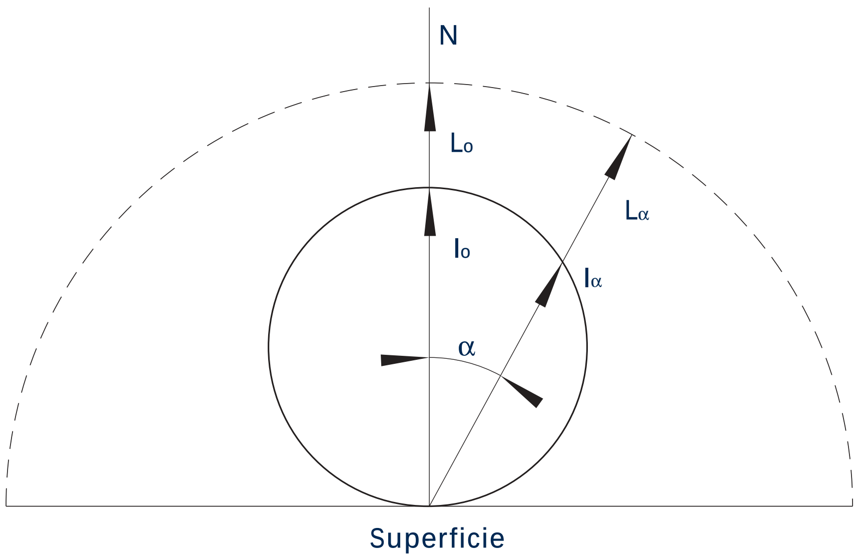

Figura 9. Invariabilidad de la luminancia con el ángulo de incidencia.