

DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA CARACTERIZAR LA REFLECTANCIA DE SUPERFICIES NO LAMBERTIANAS

Cabello A.J.*, Glez. Vizmanos J.L.** , Kirschbaum C.F.*

*Dpto. de Luminotecnia, Luz y Visión, FCEyT, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina
Av. Independencia 1800 – (T4002BLR) – Tucumán - Argentina
e-mail: acabello@herrera.unt.edu.ar - ckirschbaum@arnet.com.ar

**Dpto. de Óptica y Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid,
C/Preado de la Magdalena s/n – (47011) – Valladolid- España
e-mail: vizma@opt.uva.es

Se propone una metodología de evaluación y medición de la reflectancia de una superficie no perfectamente difusora, a partir de la evaluación de n sectores angulares de la misma que pueden ser considerados lambertianos, obteniendo la reflectancia total a partir de la suma de las n reflectancias parciales. Además se compara este método propuesto con las demás metodologías disponibles para efectuar de manera confiable dicha determinación.

Is proposed a methodology for evaluation and measurement of the reflectance of not perfectly diffusive surface, involving the evaluation of n angular sectors of the surface which can be considered lambertians elements. The total reflectance is obtained adding up n partial reflectances. Besides the proposed method is compared with other available methodologies in order to obtain a reliable that determination.

I.-INTRODUCCIÓN

La determinación de las propiedades reflectantes de cualquier superficie tiende a ser cada vez mas complicada a medida que ésta se aparta de las características propias de una superficie perfectamente difusora, para la cual se puede aplicar directamente la conocida relación $L = (\rho/\pi) \cdot E$, donde L es la luminancia de la superficie iluminada, E es la iluminancia en el plano de dicha superficie y ρ es la reflectancia de la misma.

Difusor Perfecto⁽¹⁾: Una superficie perfectamente difusora es aquella que emite o refleja el flujo luminoso en forma tal que ésta presenta la misma luminancia independientemente del ángulo de visión. Tal superficie se denomina *lambertiana* porque responde a la ley de Lambert⁽¹⁰⁾.

Ninguna superficie es perfectamente difusora, pero muchas superficies, especialmente las opacas, se aproximan bastante. Como ejemplo de una superficie no lambertiana podemos citar a un espejo, estando tal tipo de superficie en el extremo opuesto de una superficie lambertiana, denominándose superficie *especular*.

La premisa de que la luminancia es independiente del ángulo se ilustra en la Figura 1a. Si lo analizamos en términos de la intensidad luminosa I , a partir de la definición de luminancia ($dI = L \cdot dS \cdot \cos\theta$) podemos establecer que la intensidad luminosa dI y la luminancia L están relacionadas a través de la proyección del área dS en la dirección de observación. El área proyectada de una superficie plana varía según el coseno del ángulo respecto a la normal ($dS \cdot \cos\theta$), como se muestra en la Figura 1b. Por lo tanto la intensidad varía de la misma forma, según esta ley del coseno, como se muestra en la Figura 1c, y está dada por $I(\theta) = I \cdot \cos\theta$, donde I es la intensidad de la superficie en la dirección de la normal a la misma.

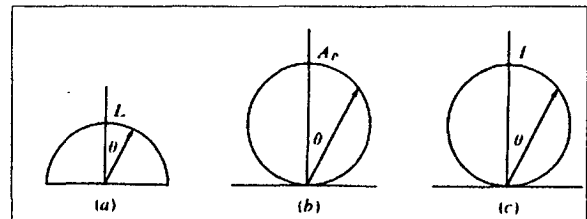


Figura 1.- Interpretación gráfica de superficies perfectamente difusoras

En este trabajo se propone una metodología de evaluación y medición de la reflectancia de una superficie no perfectamente difusora, a partir de la evaluación de n sectores angulares de la misma que pueden ser considerados lambertianos, obteniendo la reflectancia total a partir de la suma de las n reflectancias parciales.

Además se compara este método propuesto con las demás metodologías disponibles para efectuar de manera confiable dicha determinación, quedando limitada la estimación a la cantidad de muestras relevadas y medidas.

En el presente trabajo se han recogido muestras de las ciudades de San Miguel de Tucumán (Argentina) y de Valladolid (España), con el propósito de comparar sus respectivas emisiones de luz hacia la atmósfera y determinar la incidencia de factores locales que pudiesen influenciar en la polución luminosa.

II.- CARACTERÍSTICAS LUMINOTÉCNICAS DE LOS MATERIALES⁽¹⁾

Los grados de Reflexión, Transmisión y Absorción son magnitudes sin dimensión, que describen la cantidad de luz reflejada, transmitida o absorbida:

$$\text{Reflectancia} \quad \rho = \phi_r / \phi_i \quad (1)$$

$$\text{Transmitancia} \quad \tau = \phi_t / \phi_i \quad (2)$$

Absorbencia $\alpha = \phi_a / \phi_i$ (3)
 ϕ_i es el flujo luminoso incidente y vale:

$$\phi_i = \phi_p + \phi_r + \phi_a \quad (4)$$

entonces $\rho + \tau + \alpha = 1$

Para determinar la reflectancia de una superficie basta con efectuar mediciones de las magnitudes fotométricas derivadas de los flujos incidente y reflejado en una dada dirección por esa superficie. Las magnitudes asociadas son la iluminancia E [$\text{lux} = \text{lm}/\text{m}^2$] y la luminancia L [cd/m^2], que se expresan según las siguientes relaciones:

$$E = \frac{d\phi_i}{dS} \quad (5) \quad \text{y} \quad L = \frac{d^2\phi_h}{d\Omega \cdot dS \cdot \cos\theta} \quad (6)$$

Si además consideramos una superficie elemental lambertiana dS , a la que llega la iluminancia E (ver Figura 2), de manera que el flujo hemisférico difundido por dS en la dirección θ , puede escribirse⁽⁸⁾:

$$d^2\phi_h = L \cdot d\Omega \cdot dS \cdot \cos\theta \quad (7) \quad \text{y según la Figura 2}$$

vale que $d\Omega = \frac{2\pi r \sin\theta \cdot (rd\theta)}{r^2} = 2\pi \sin\theta \cdot d\theta \quad (8)$

entonces el flujo total hemisférico difundido por la superficie será, combinando (7) y (8) e integrando:

$$\begin{aligned} d\phi_h &= 2\pi \int_0^{\pi/2} L \cdot dS \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta \cdot d\theta = \\ &= 2\pi \cdot L \cdot dS \int_0^{\pi/2} \sin\theta \cdot \cos\theta \cdot d\theta = \pi L \cdot dS \end{aligned} \quad (9)$$

entonces, según la definición dada en (1) podemos escribir, sabiendo que de (5) es $d\phi_i = E \cdot dS$ y resolviendo la integral entre 0 y $\pi/2$, la siguiente expresión:

$$\rho_h = \frac{d\phi_h}{d\phi_i} = \frac{\pi \cdot L \cdot dS}{E \cdot dS} = \frac{\pi L}{E} \quad (10)$$

donde se define la "reflectancia hemisférica difusa", como la relación entre el flujo reflejado y el incidente ϕ_i . Por su parte, la cantidad $\rho_h \cdot E$ representa la **emitancia** M o densidad de flujo luminoso en [lm/m^2] que es difundido desde la superficie, pudiendo escribir:

$$\pi \cdot L = \rho_h \cdot E = M \quad (11)$$

Expresión General⁽⁸⁾: Dado que la luminancia L de una superficie es función tanto del ángulo cenital θ como del acimutal φ , será válida la siguiente expresión para la reflectancia:

$$\rho_h = \frac{d\phi_h}{d\phi_i} = \frac{1}{E} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} L(\theta, \varphi) \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (12)$$

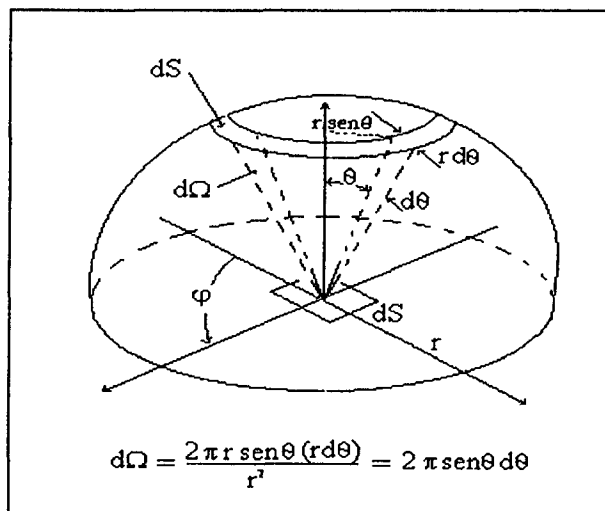


Figura 2.- Geometría correspondiente al flujo hemisférico difundido por una superficie lambertiana.

Existen muchas superficies en la naturaleza que son lambertianas hasta ángulos cenitales de 40° , y ciertos casos particulares como la nieve y la arena del desierto, se pueden considerar lambertianas hasta 50° o 60° . Respecto del ángulo acimutal φ , la luminancia presenta pocas variaciones pues la mayoría de las superficies estudiadas son de textura homogénea (isotropicas), aunque existen excepciones tales como revestimientos estriados o baldosas acanaladas. En este trabajo en particular vamos a considerar que L no varía con φ .

En el caso de las superficies presentes en un recinto urbano, se puede conocer hasta dónde pueden considerarse lambertianas determinando el correspondiente *coeficiente de difusión*, que se define como sigue.

II.1.-Coeficiente de Difusión de una superficie⁽¹⁾

La difusión de la luz indica la forma en que la luz es reflejada o transmitida. Una medida de la difusión la describen los siguientes valores característicos:

$$\sigma = (L_{20} + L_{70}) / 2L_5 \quad (13)$$

donde L_{20} , L_{70} y $2L_5$ son las luminancias en determinados ángulos de observación de la superficie difusora (Figura 3), suponiendo que la muestra es iluminada según cada dirección de observación.

Para una superficie completamente difusora (lambertiana) es $\sigma = 1$; en este caso la indicatriz de luminancia es un semicírculo. Por lo tanto, *el coeficiente de difusión σ nos indica en qué medida una superficie se aparta del comportamiento lambertiano.*

II.2.-Coeficiente de luminancia q de una superficie⁽⁴⁾

Este es un parámetro utilizado en la clasificación de pavimentos. El coeficiente q de luminancia es el vínculo entre iluminancia y luminancia en una escena iluminada. De la expresión (10) podemos concluir que

entre la iluminancia E y la luminancia L se verifica la siguiente proporcionalidad:

$$L = q \cdot E \quad (14)$$

El factor de proporcionalidad q (coeficiente de luminancia) es un parámetro que depende de la geometría de incidencia de la radiación y dirección de observación como también de las características de reflexión de los materiales iluminados, es decir de la reflectancia y de la difusión. Si la difusión posee una característica fija, como es el caso de la reflexión completamente difusa (superficie lambertiana), entonces la luminancia solo depende de la reflectancia ρ .

Es válido entonces, según la expresión (10), escribir:

$$L = (\rho/\pi) \cdot E \quad (15)$$

(para $\sigma = 1$ -superficie lambertiana-)

Entonces si conocemos, a partir de mediciones los valores promedio de E y L en una superficie dada:

$$L_m = q_m \cdot E_m \quad (16)$$

Entonces, para $\sigma \neq 1$ (superficie no perfectamente difusora): $q_m = \rho / (\pi \cdot \sigma)$

$$\text{resultando entonces:} \quad \rho = \pi \cdot \sigma \cdot q_m \quad (16b)$$

II.3.- Función de distribución de reflectancia bidireccional ^{(6),(7)}

En términos generales, las características reflectoras de una superficie pueden quedar descritas por la BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) frecuentemente designada por el símbolo f y que se define como:

$$f(\theta, \varphi, \theta', \varphi') = \frac{dL'(\theta', \varphi')}{dE(\theta, \varphi)} \quad (17)$$

$f(\theta, \varphi, \theta', \varphi')$ viene dada en $[\text{sr}^{-1}]$

dL' es la luminancia reflejada en la dirección θ', φ' y viene dada en $[\text{lm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$

dE es la iluminancia de un haz bien colimado que incide en la superficie con una dirección dada θ, φ . Viene dada en $[\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}]$.

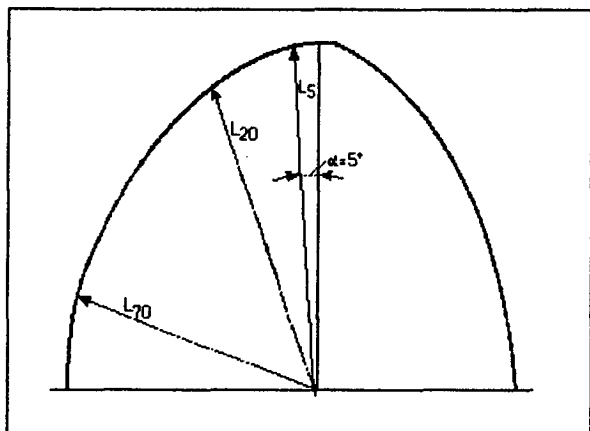


Figura 3.- Indicatriz de luminancia de una superficie difusora

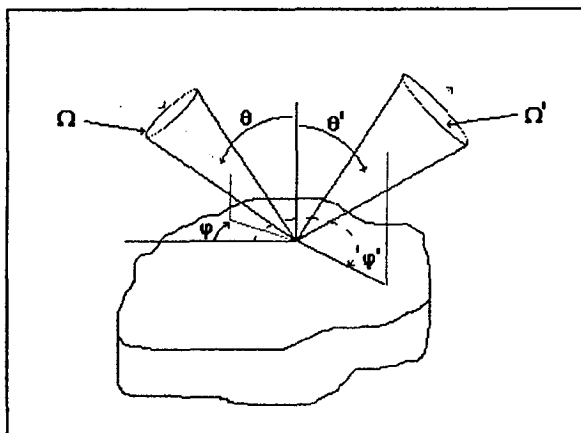


Figura 4.- Geometría de los flujos incidente y reflejado por una superficie, que define la función BRDF.

Si llamamos $L(\theta, \varphi)$ al flujo radiante procedente de una superficie elemental dS , en una dada dirección θ , por unidad de ángulo sólido $d\Omega$ y por unidad de superficie, podemos escribir derivando (5) y combinando con (6) :

$$dE(\theta, \varphi) = L(\theta, \varphi) \cos \theta \cdot \text{sen} \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$$

resultando:

$$f(\theta, \varphi, \theta', \varphi') = \frac{dL'(\theta', \varphi')}{L(\theta, \varphi) \cos \theta \cdot \text{sen} \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi} \quad (18)$$

La determinación de la BRDF mediante mediciones es verdaderamente compleja, ya que los valores de dL' no son fáciles de obtener en un lugar e instante dados, y para medirla es necesario colocar el sensor en la dirección θ' y φ' deseadas.

II.4.- Reflectancia Bidireccional ^{(6),(7)}

Otra medida de la reflectancia que suele utilizarse es la de la reflectancia bidireccional BR (Bidirectional Reflectance) o $d\rho(\theta, \varphi, \theta', \varphi')$ que se define como:

$$d\rho(\theta, \varphi, \theta', \varphi') = \frac{dL'(\theta', \varphi') \cos \theta' \cdot d\Omega'}{dE(\theta, \varphi)} = f(\theta, \varphi, \theta', \varphi') \cdot \cos \theta' \cdot d\Omega' \quad (19)$$

siendo $d\Omega' = \text{sen} \theta' \cdot d\theta' \cdot d\varphi'$

Aunque $d\rho$ se usa con frecuencia, no está determinada por una única propiedad de la muestra sino que depende de la instrumentación utilizada, ya que $d\rho$ depende de $\cos \theta' \cdot d\Omega'$, que es la proyección del ángulo sólido reflejado. El flujo incidente se determina conociendo las características de la fuente y del ángulo sólido de incidencia $d\Omega$. El valor de $d\Omega'$ Puede ser muy diferente de $d\Omega$ y esto puede producir confusión a la hora de interpretar resultados.

II.5.- Factor de Reflectancia Bidireccional ^{(6),(8)}

Dado que la determinación de BRDF es difícil a partir de mediciones, se ha desarrollado un concepto

más sencillo de medir denominado *Factor de Reflectancia Bidireccional* o BRF (Bidirectional Reflectance Factor). Para su medición se debe utilizar como referencia una superficie difusora perfecta (o lambertiana) y totalmente reflectante (sin transmisión ni absorción).

Se define al BRF como la relación entre el flujo reflejado por una superficie, bajo determinadas condiciones de iluminación y de observación, y el flujo reflejado por una superficie perfectamente difusora y totalmente reflectante (lambertiana), en idénticas condiciones de irradiación y de observación.

Si denominamos V_p a la respuesta medida en la referencia y V_t es la respuesta del instrumento correspondiente a la muestra en estudio, entonces el factor de reflectancia R_t de la muestra se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$R_t(\theta, \varphi; \theta', \varphi') = \frac{V_t}{V_p} R_p(\theta, \varphi; \theta', \varphi') \quad (20)$$

donde $R_p(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ es el factor de reflectancia bidireccional de la superficie de referencia, cuyo valor en [%] debe ser conocido de antemano y por lo general es un valor certificado por un laboratorio de calibración.

III.- METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

A lo largo de este trabajo se han efectuado determinaciones tanto de BR como de BRF, en aquellos casos donde la instrumentación disponible y la accesibilidad de las muestras lo han permitido. En este sentido, y teniendo en cuenta la disponibilidad real de laboratorios y equipos de medición, como así también la factibilidad de obtener muestras representativas de las superficies más comunes en el ambiente urbano, se ha optado por establecer una metodología para la determinación de la BR (o reflectancia bidireccional) para la mayor parte de las muestras, reservando la determinación del BRF (factor de reflectancia bidireccional) para aquellos casos (muestras de fachadas de edificios por ejemplo) donde no era posible el método de BR.

Es preciso aclarar que no se está buscando una comparación entre ambos métodos, sino más bien establecer las características reflectivas de las superficies consideradas de la mejor manera posible con los recursos disponibles en cada situación particular.

Con las mediciones efectuadas en San Miguel de Tucumán, se optó por el método de la BR en pavimentos y aceras, mientras que con las mediciones de Valladolid, además de la BR se pudo determinar también el BRF, como alternativa para obtener las propiedades reflectantes buscadas. Se evaluaron en una primera etapa muestras de pavimentos urbanos y revestimientos de aceras habituales en ambos asentamientos urbanos.

Esta experiencia busca determinar de manera sencilla, pero lo más precisa posible, cuál es el comportamiento tanto difusor como reflectante de estas superficies, de manera tal de obtener valores confiables de reflectancias, que permitan una simulación posterior

del flujo luminoso reemitido hacia la atmósfera y que es causante de la polución luminosa.

IV.- MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES DE REFLEXIÓN DE PAVIMENTOS

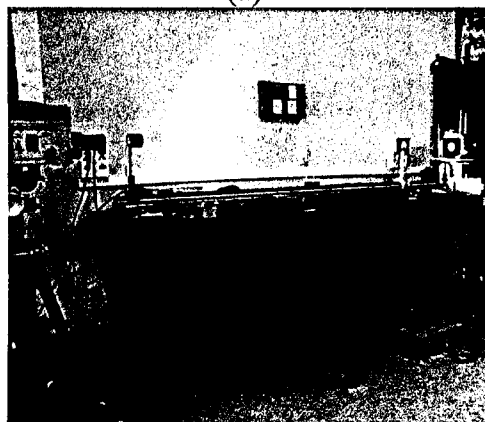
IV.1.- Descripción de la experiencia

Se han efectuado mediciones de iluminancia y luminancia perpendicular a cada muestra de pavimento, situada en banco fotométrico sobre una base giratoria con escala graduada en grados sexagesimales. Se ilumina cada muestra con una fuente luminosa estabilizada, consistente en una lámpara incandescente halogenada de $T_c = 3000K$, a una distancia de 2 metros, con incidencia perpendicular del haz luminoso sobre la superficie de la muestra (ver Figura 6). Sobre un mismo punto de la muestra se mide $E[\text{lux}]$ y $L[\text{cd}/\text{m}^2]$ a 0° de incidencia respecto de un eje normal a la muestra (incidencia perpendicular). También se han medido las respectivas luminancias con la muestra orientada a 5° , 15° , 20° , 45° y 70° .

En la Figura 5 se muestra el montaje de la misma experiencia en sendos laboratorios: a) en el Departamento de Luminotecnia de la facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Tucumán, y b) en el Laboratorio de Iluminación del Departamento de Optica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid.



(a)



(b)

Figura 5.- Montaje experimental en: (a) Universidad Nacional de Tucumán; (b) Universidad de Valladolid.

Con los valores obtenidos de E y de L para las distintas posiciones de las muestras, disponemos de los elementos suficientes para la determinación de la reflectancia bidireccional (BR), según la metodología desarrollada a continuación.

IV.2.-Determinación de la reflectancia perpendicular de las muestras de calzadas

En primer lugar, suponemos que las muestras son lambertianas, para poder aplicar la expresión general (12), que a su vez se corresponde con la función definida en (17). Pero dado que la geometría del flujo incidente corresponde a la de un haz estrecho, y que la geometría del flujo reflejado podemos acotarla según algún criterio práctico, hemos considerado que la información del flujo reflejado más relevante para nuestro interés se encuentra comprendida en un ángulo sólido con 40° de apertura, según el esquema de la Figura 6, y así poder utilizar la expresión definida por (19).

La expresión para el cálculo de la reflectancia de una superficie lambertiana (L constante a lo largo de θ y φ), particularizado para esta geometría, puede obtenerse a partir de las expresiones (19) y (8) resultando:

$$\rho_h = \frac{d\phi_h}{d\phi_i} = \frac{2\pi L}{E} \int_0^\theta \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta \quad (21)$$

Siendo $[-\frac{1}{2}\cos^2\theta]$ la solución de la integral contenida en (21), podemos obtener ρ_h para cada muestra de calzada, la siguiente expresión como resultado de una integración por partes en el semiángulo sólido comprendido entre 0° y 20°:

$$\rho_h = \frac{\pi}{E} \left[\begin{array}{l} L_0(-\cos^2 5^\circ + \cos^2 0^\circ) + \\ L_5(-\cos^2 15^\circ + \cos^2 5^\circ) + \\ L_{15}(-\cos^2 20^\circ + \cos^2 15^\circ) \end{array} \right] \quad (22)$$

Finalmente, resolviendo y ampliando el alcance de la (22) al ángulo sólido de 40° considerado en la Figura 6, nos queda finalmente:

$$\rho_h = \frac{2\pi}{E} (0,0076.L_0 + 0,0594.L_5 + 0,05.L_{15}) \quad (23a)$$

Nota: el factor 2 que multiplica a π/E considera que el valor de ρ comprendido entre 0 y 20° se repite en el otro sentido.

Para el intervalo $[-70^\circ, +70^\circ]$ quedaría:

$$\rho_h = \frac{2\pi}{E} (0,0076L_0 + 0,0594L_5 + 0,05L_{15} + 0,383L_{20} + 0,383L_{45} + 0,117L_{70}) \quad (23b)$$

Se puede simplificar el cálculo, si la superficie es de características difusoras, integrando solamente en un tramo comprendido entre 0° y 20°, y adoptando el valor perpendicular L_0 , según la siguiente expresión:

$$\rho_h = \frac{2\pi}{E} [L_0(-\cos^2 20^\circ + \cos^2 0^\circ)] \quad (24a)$$

Lo mismo si integramos en el tramo comprendido entre 0° y 70°:

$$\rho_h = \frac{2\pi}{E} [L_0(-\cos^2 70^\circ + \cos^2 0^\circ)] \quad (24b)$$

IV.3.-Mediciones con muestras de pavimentos de San Miguel de Tucumán

Se dispone de nueve muestras de pavimento usuales en San Miguel de Tucumán: de siete muestras con la denominación M(concreto asfáltico), de las cuales seis son rodadas (pavimentos con menos de 10 años de uso) y una es nueva, sin rodar; y de dos muestras con la denominación CR (hormigón), una es rodada y la otra sin uso. Los resultados se pueden observar en la Tabla 1.

Para esta experiencia, además del equipamiento ya mencionado, se utilizó el siguiente equipo (ver Figura 5a):

-Banco fotométrico: De precisión, marca Schmidt & Haensch, de 6 m de longitud

-Luminancímetro: Marca LMT modelo L 1009, con selector de campos de medición en 3°, 1°, 20' y 6'. Posee una cabeza fotométrica consistente en una célula fotoeléctrica de silicio con una excelente corrección por $V(\lambda)$.

-luxómetro: Marca Minolta modelo TS-01. Cabeza fotométrica: fotocélula de Si corregida por $V(\lambda)$ y por $\cos\phi$.

-Iluminante: Consistente de un proyector de diapositivas con lámpara incandescente halogenada de 24V, 150W, 3000K, con el que se ha conseguido una uniformidad del 92% sobre la superficie de cada muestra.

En Tabla 2 pueden verse los correspondientes coeficientes de difusión, obtenidos al aplicar la expresión (13) a los valores medidos, y que nos dan una idea de cuán lambertianas son las muestra evaluadas. Ello se puede apreciar gráficamente en la Figura 7.

TABLA 1: VALORES REGISTRADOS EN BANCO FOTOMÉTRICO CON INCIDENCIA PERPENDICULAR DE LUZ

Muestra	E [lux]	L ₀ [cd/m ²]	L ₅ [cd/m ²]		L ₁₅ [cd/m ²]		L ₂₀ [cd/m ²]		L ₄₅ [cd/m ²]		L ₇₀ [cd/m ²]	
			izq.	der.	izq.	der.	izq.	der.	izq.	der.	izq.	der.
M0	194	2.31	2.27	2.27	2.02	2.13	1.91	2.05	1.514	1.697	1.435	1.785
M1	219	5.76	5.75	5.66	5.42	5.41	5.26	5.38	4.73	4.4	4.4	4.39
M2	218.5	5.23	5.13	5.19	4.87	4.95	4.72	4.74	3.87	3.9	3.18	3.72
M3	203	6.96	6.85	7.06	6.47	6.9	6.25	6.76	5.3	5.93	4.64	5.21
M4	202.5	6.04	5.93	5.99	5.59	5.78	5.44	5.65	4.55	4.78	3.79	4.27
M5	200	5.42	5.21	5.23	4.54	4.55	4.22	4.31	3.06	3.08	2.42	2.7
M6	205	6.25	6.05	6.04	5.33	5.36	4.98	5.02	3.68	3.58	2.9	2.83
CR0	204	15.89	15.85	15.79	15.44	15.3	15.12	14.93	12.62	13.17	9.21	9.98
CR1	204	10.30	10.34	10.12	10.17	9.52	10.01	9.17	8.72	7.6	6.76	6.86

Nota: CR corresponde a una muestra de concreto a base de cemento Portland claro, el sufijo 0 corresponde a muestra nueva, sin uso, y 1 corresponde muestra rodada. M0 es una muestra de concreto asfáltico nuevo, sin uso (oscura).

TABLA 2: COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE LAS MUESTRAS EVALUADAS

Muestra:	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	CR0	CR1
$\sigma = (L_{20} + L_{70}) / 2L_5$	0.791	0.851	0.793	0.822	0.803	0.654	0.651	0.778	0.802

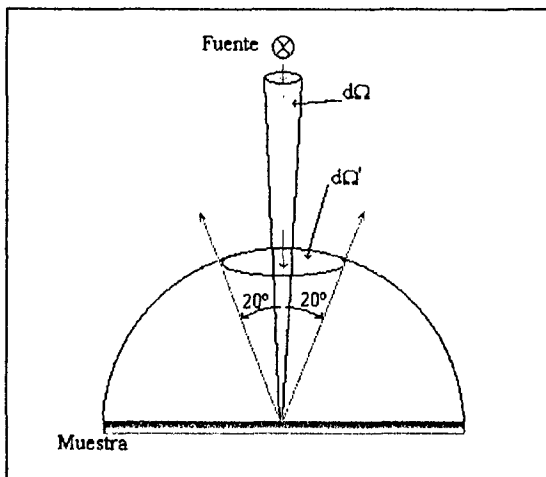


Figura 6.- Angulo sólido correspondiente al flujo reflejado por cada muestra.

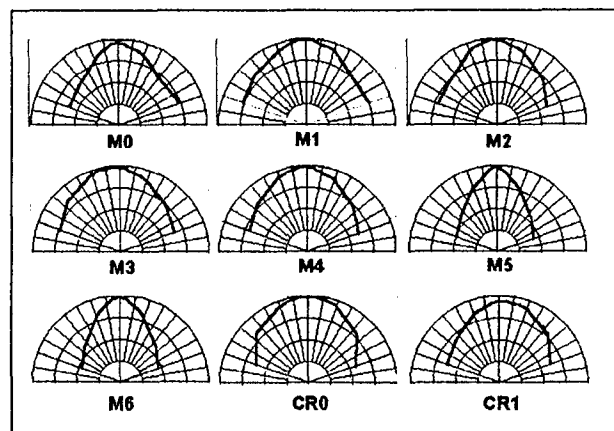


Figura 7.- Indicadores de luminancia de las muestras evaluadas.

A partir de las (23) a y b, y con los valores de E y L particularizados para cada muestra y que se

muestran en Tabla 1, obtenemos los valores de reflectancia en [%] de cada muestra, según la siguiente tabla:

TABLA 3: REFLECTANCIAS EN [%] DE LAS MUESTRAS EVALUADAS, APLICANDO (23) A Y B.

Muestra:	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	CR0	CR1
ρ_h [%] (-20° : +20°)	0.83	1.87	1.70	2.48	2.12	1.82	2.07	5.63	3.63
ρ_h [%] (-70° : +70°)	5.89	14.21	12.35	18.63	15.72	11.58	13.22	42.03	27.02

Los resultados de aplicar (24) a y b se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 4: REFLECTANCIAS EN [%] DE LAS MUESTRAS EVALUADAS, APLICANDO (24) A Y B.

Muestra:	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	CR0	CR1
ρ_h [%] (-20° :+20°)	0.88	1.93	1.76	2.52	2.19	1.99	2.24	5.73	3.71
ρ_h [%] (-70° :+70°)	6.61	14.59	13.28	19.02	16.55	15.04	16.91	43.21	28.01

Estos resultados serían correctos en el caso de que las muestras fuesen lambertianas, pero si observamos las indicatrices de luminancia de la Figura 7, comprobamos que no lo son, y habiendo determinado que el grado de semejanza de estas superficies con

una lambertiana está dado por la expresión (13), aplicando los coeficientes de Tabla 2 a los valores de reflectancia obtenidos, podemos aproximar los resultados a la realidad. En consecuencia, los valores definitivos de reflectancias estimadas de las muestras se muestran en la Tabla 5:

TABLA 5: REFLECTANCIAS ESTIMADAS EN [%] DE LAS MUESTRAS EVALUADAS.

Muestra:	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	CR0	CR1
ρ_h [%] (-20° :+20°)	0.66	1.60	1.35	2.04	1.71	1.19	1.34	4.38	2.91
ρ_h [%] (-70° :+70°)	5.22	12.42	10.53	15.63	13.29	9.83	11.00	33.63	22.45

En el caso particular de la ciudad de San Miguel de Tucumán, para fines de simulación se podría establecer un valor de reflectancia promedio de $\rho_h=12\%$ para los pavimentos asfálticos y del 23% para los de hormigón.

IV.4.-Medición de muestras de calzadas obtenidas en la ciudad de Valladolid, España.

IV.4.1.-Determinación de la reflectancia bidireccional

Se repitió la experiencia descrita en §IV.3., esta vez en las instalaciones del Laboratorio de Iluminación del Departamento de Optica de la Universidad de Valladolid, con muestras de

pavimentos usuales en dicha ciudad. Los resultados obtenidos se pueden ver en las Tablas 6 y 7.

Para esta última experiencia, se utilizó el siguiente equipo (ver Figura 5b):

-**Banco fotométrico:** para mesa óptica, con escala graduada hasta 2 mts. Distancia muestra-iluminante: 2.12mts.

-**Luminancímetro:** Marca Pritchard modelo Spectra 1980B

-**luxómetro:** Graseby Optronics modelo 371

-**Iluminante:** lámpara incandescente halogenada 12V, 50W con reflector dicróico, 3000K, estabilizada.

-**Soporte goniométrico:** Marca Rhino modelo XR Tilting Rotary Carousel, con motor a pasos.

TABLA 6: VALORES REGISTRADOS EN BANCO FOTOMÉTRICO CON INCIDENCIA PERPENDICULAR DE LUZ, EN MUESTRAS DE VALLADOLID.

Muestra	E [lux]	L_0 [cd/m ²]	L_5 [cd/m ²]		L_{15} [cd/m ²]		L_{20} [cd/m ²]		L_{45} [cd/m ²]		L_{70} [cd/m ²]	
			izq.	der.	izq.	der.	izq.	der.	izq.	der.	izq.	der.
M0	1290	26.8	26.7	26.5	26.1	25.9	25.6	25.6	23.0	23.4	18.4	19.5
M1	1300	53	53.0	52.4	50.5	49.7	49.5	48.9	45.3	47.4	35.5	35.7
M2	1300	37.5	37.4	37.0	35.6	33.6	34.8	32.3	28.4	28.5	22.8	25.8
M3	1300	38.9	40.9	37.9	37.4	35.5	36.5	34.7	32.2	30.3	27.0	25.6
M4	1300	36.7	36.7	36.6	36.3	36.1	35.3	35.1	32.7	32.4	25.7	28.0

M0 es una muestra de concreto asfáltico nuevo, sin uso (oscura).

TABLA 7: COEFICIENTES DE DIFUSIÓN DE LAS MUESTRAS EVALUADAS

Muestra:	M0	M1	M2	M3	M4
$\sigma = (L_{20} + L_{70})/2L_5$	0.84	0.80	0.78	0.79	0.85

Respecto de las reflectancias obtenidas, los resultados se pueden apreciar en las tablas siguientes:

TABLA 8: REFLECTANCIAS EN [%] DE LAS MUESTRAS EVALUADAS, APLICANDO (23) a y b.

Muestra:	M0	M1	M2	M3	M4
ρ_h [%] (-20° :+20°)	1.50	2.92	2.04	2.15	2.06
ρ_h [%] (-70° :+70°)	11.69	22.62	14.89	16.02	16.12

TABLA 9: REFLECTANCIAS EN [%] DE LAS MUESTRAS EVALUADAS, APLICANDO (24) a y b.

Muestra:	M0	M1	M2	M3	M4
ρ_h [%] (-20° :+20°)	1.53	3.00	2.12	2.20	2.08
ρ_h [%] (-70° :+70°)	11.53	22.62	16.00	16.60	15.66

TABLA 10: REFLECTANCIAS ESTIMADAS EN [%] DE LAS MUESTRAS EVALUADAS.

Muestra:	M0	M1	M2	M3	M4
ρ_h [%] (-20° :+20°)	1.28	2.41	1.65	1.73	1.76
ρ_h [%] (-70° :+70°)	9.65	18.20	12.44	13.04	13.26

En este caso particular de la ciudad de Valladolid, para fines de simulación se podría establecer un valor de reflectancia promedio de $\rho_h=13\%$ para los pavimentos asfálticos.

IV.4.2.-Determinación del factor de reflectancia en banco fotométrico

Se dispuso de un patrón de reflectancia difusa consistente en una pastilla de material altamente difusor, color blanco mate, modelo RS-1 fabricado por Photo Research Inc. En primer lugar, se dispuso la determinación de la reflectancia del patrón, para lo cual se colocó éste en un soporte ubicado en la misma posición de las muestras, de modo tal de asegurar para el patrón de reflectancia las mismas condiciones de irradiación que las muestras. Bajo esas condiciones, para irradiación perpendicular se

obtuvieron los siguientes valores de iluminancia y luminancia respectivamente:

$$E_B=1320 \text{ lux} ; L_B=395 \text{ cd/m}^2$$

Si consideramos que el patrón de reflectancia es también un patrón de superficie lambertiana, entonces podemos aplicar la relación (10) obteniendo en consecuencia $\rho_B=94\%$ para dicha superficie de referencia.

Si ahora particularizamos la relación dada en (20) para obtener los respectivos factores de reflexión FR de las muestras de Tabla 6, en la siguiente relación:

$$FR = (L_o/L_B) \cdot \rho_B$$

obtenemos finalmente los factores de reflexión de las muestras de pavimentos, según Tabla 11.

TABLA 11: FACTORES DE REFLEXIÓN DE LAS MUESTRAS DE PAVIMENTOS DE LA CIUDAD DE VALLADOLID

Muestra:	M0	M1	M2	M3	M4
FR [%]	6.4	12.6	8.9	9.2	8.7

IV.4.3.-Medición del factor de reflectancia global con reflectómetro

Se midieron tres de las muestras de pavimentos de Valladolid (M1, M2 y M3) con un reflectómetro marca HMS-1200L "Haze Measurement System", según las especificaciones ASTM D1003. Se coloca la muestra en el centro de una esfera integrante, a 45° del eje de incidencia de la luz que penetra por un orificio y proviene de una lámpara incandescente halogenada de 3000K calibrada. La luz reflejada difusamente en la esfera por la muestra iluminada es recogida por un fotodetector de silicio, corregido por

$V(\lambda)$. Con las mismas condiciones de irradiación, se sustituye la muestra con una reflectancia de referencia cuya valor en [%] se conoce y que se incluye en la lectura final del instrumento. Las señales son procesadas por un sistema de procesamiento de señal que arroja como resultado el factor de reflectancia total en [%], según un método de sustitución que compara la señal reflejada en la muestra con la señal reflejada en la pared de la esfera (reflectancia de referencia), arrojando un valor global R [%] de reflectancia (especular + difusa).

Se obtuvieron las siguientes mediciones del factor de reflectancia:

TABLA 12: FACTORES DE REFLEXIÓN OBTENIDOS CON EL REFLECTÓMETRO LABSPHERE

Muestra:	M1	M2	M3
R [%]	12.9	9.6	8.1

IV.4.4.-Análisis de los resultados

Se observa una buena correspondencia entre los resultados obtenidos para el factor de reflectancia R , del orden del 10% (valores de Tabla 12 vs los de Tabla 11), mientras que si efectuamos la

comparación entre las magnitudes correspondientes de FR con las de reflectancia bidireccional BR (Tabla 10), la discrepancia es del orden del 30%. Esto se debe quizás a que la obtención de los FR está fuertemente basada en la reflectancia de referencia, la que no siempre es tan lambertiana como se supone ni tan reflectante como

parece; y englobando el resultado la reflectancia R total (difusa + especular) cuando se usa el reflectómetro con esfera integrante; mientras que con el método de la BR disponemos de un mayor control del ángulo sólido de la radiación reflejada, pudiendo incluso configurarlo según alguna dirección de nuestro interés, obteniendo así el porcentaje de radiación respecto de la incidente, efectivamente reflejado en esa porción del espacio.

Pero lo mejor que podemos destacar es que las muestras mantienen sus características reflectantes entre sí, independientemente del sistema de medición, ya que si comparamos los cocientes $M1/M2$, $M1/M3$ y $M2/M3$ tanto en las reflectancias de Tabla 10 como en los factores de reflexión de Tabla 11 (ambos conjuntos de valores obtenidos en montaje en banco fotométrico), podemos observar que se conserva la correlación entre muestras, ya que $M1$ supera a $M3$ en un 39% en Tabla 10 (BR), mientras que esa correlación es del 37% en los valores de Tabla 11 (FR); y si comparamos $M2/M3$, vemos que $M3$ es un 5% menos reflectante que $M2$ en valores de Tabla 10, siendo ese porcentaje del 4% para los correspondientes valores de Tabla 11. Por otra parte, si efectuamos los cocientes de cada muestra, según Tabla 10 y 11, obtenemos 1.44, 1.398 y 1.42 para las muestras $M1$, $M2$ y $M3$ respectivamente, siendo el promedio 1.42, cifra que se puede asumir como una constante con una desviación estándar del 2.3%. Ese valor constante nos asegura que las diferencias son debidas a que los sistemas de medición son distintos (en el sistema con reflectómetro queda englobada la reflectancia en todas las direcciones, mientras que en el sistema del FR, éste depende de cada dirección) y no por las muestras en sí mismas.

V.-CONCLUSIONES

Se ha logrado configurar una nueva metodología de medición y procesamiento de los resultados que permite conocer la reflectancia de superficies

exteriores urbanas, en alguna dirección preferencial deseada y con apertura del ángulo sólido que realmente puede interesar para alguna aplicación determinada, como por ejemplo en casos de simulación por computadora del flujo luminoso reemitido por un recinto urbano hacia la atmósfera, después de múltiples interreflexiones en las superficies consideradas.

VI.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - Eckert, M. "Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Strassenverkehr", capítulo 3, Verlag Technik Berlin - München, 1993.
- 2 - Commission Internationale de l'Éclairage, "Calculation and Measurement of Luminance and Illuminance in Road Lighting. Publication CIE 30.2-1982/Reprint 1990
- 3 - Arce J., Manzano E., Cabello A.J., Kirschbaum C.F., "Medición de Propiedades de Reflexión de Calzadas mediante Camara CCD". Anales del IV Congreso Latinoamericano de Ingeniería de Iluminación - LUX AMERICA '97. Viña del mar, Chile. Noviembre de 1997.
- 4 - Van Bommel W.J.M., de Boer J.B., "Road lighting". Philips Technical Library, 1980.
- 5 - Kairuz H., "Caracterización y medición de muestras de pavimentos en Argentina", Informe al CONICET, 1987.
- 6 - McCluney R., "Introduction to Radiometry and Photometry", Artech House, Boston, 1994.
- 7 - Gandía S., Meliá J., "La Teledetección en el Seguimiento de los Fenómenos naturales. Recursos Renovables: Agricultura", Curso de Postgrado del Dep. de Termodinámica, Universitat de Valencia, 1996.-
- 8 - Deering D.W., "Field Measurements of Bidirectional Reflectance" en G. Asrar (Editor): "Remote Sensing Application in Agriculture and Hydrology", A.A. Balkema, pp.53-68, Rotterdam, 1980.
- 9 - Kantarovsky A., "Influencia de las Especies Arbóreas en el Alumbrado Público", Instituto de Luminotecnia, Luz y Visión, Universidad Nacional de Tucumán, Marzo 1998.
- 10 - Brown E.A., "Modern Optics", cap.3. pp.111-120, Ed. Reinhold Pub. Corp, 2ª edic., New York, 1966.
- 11 - Murdoch J. B., "Illumination Engineering", pág. 37, cap. 2, Ed. Macmillan, New York, 1985