

MEDIÇÕES DE REFLETÂNCIA LUMINOSA TOTAL, DIRETA E DIFUSA EM AMOSTRAS PLANAS

Cláudio Vicente Souza¹, Hans Peter H. Grieneisen², Ivo Ázara¹, André Sardinha¹, Giovanna Borghi¹, Iakyra Borrakuens Couceiro³

¹ Inmetro, Laboratório de Radiometria e Fotometria, Duque de Caxias, Brasil, laraf@inmetro.gov.br

² Inmetro, Laboratório de Interferometria, Duque de Caxias, Brasil, hpgrieneisen@inmetro.gov.br

³ Inmetro, Divisão de Metrologia Óptica, Duque de Caxias, Brasil, ibcouceiro@inmetro.gov.br

Resumo: A implantação do sistema de calibração de refletância luminosa de superfícies planas no Inmetro é descrita neste trabalho. O procedimento de medição está baseado em uma esfera integradora com 50 cm de diâmetro e na rastreabilidade fornecida por uma placa de referência calibrada. Este sistema permitirá realizar serviços relacionados às superfícies refletoras das luminárias fabricadas no país.

Palavras chave: refletância luminosa, iluminação, economia de energia, esfera integradora, metrologia óptica.

1. INTRODUÇÃO

A iluminação de forma geral, pública ou de interiores, teve avanços tecnológicos muito significativos que vão desde a utilização de iluminação a combustível até a amplamente usada iluminação elétrica, e nos últimos anos a substituição de lâmpadas incandescentes para fluorescentes e fluorescentes compactas, além das novas tecnologias com LEDs e OLEDs.

A indústria nacional tem se adaptado a essas mudanças e produzido lâmpadas e luminárias tanto para o mercado interno quanto para exportação e para isto tem procurado melhorar a qualidade desses produtos. Em relação às luminárias, têm sido realizados no Inmetro ensaios fotométricos para avaliar a sua distribuição luminosa e o seu rendimento óptico e energético. Um ensaio essencial à melhoria do produto é o relacionado à avaliação da qualidade das superfícies refletoras usadas nas luminárias. A figura 1 apresenta uma superfície refletora utilizada em uma luminária pública.

Para atender esta demanda da indústria nacional, o Inmetro desenvolveu uma metodologia de medição de superfícies refletoras. A figura 2 apresenta alguns tipos dessas superfícies (chapas de alumínio) que os fabricantes de luminárias utilizam nas partes refletoras de seus produtos.

As medições de refletância têm efeito sobre a qualidade da iluminação, a competitividade do produto nacional e a economia de energia. Os resultados apresentados são fruto de projeto desenvolvido no Laboratório de Radiometria e Fotometria do Inmetro. Foi estudada e implantada a

metodologia para a medição de refletância luminosa total, direta e difusa de superfícies planas, de acordo com as recomendações da CIE 130 [1] e com o manual do fabricante do sistema de medição de refletância [2].



Fig. 1. Corpo Refletor em uma Luminária Pública

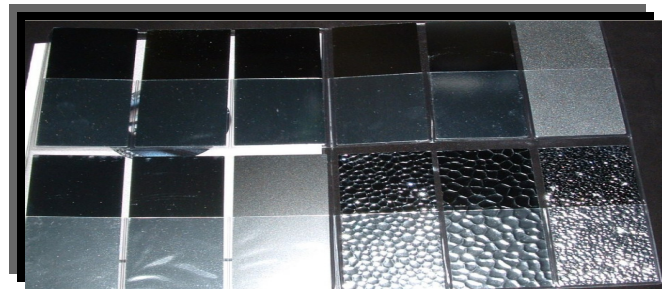


Fig. 2. Amostras de Chapas de Alumínio para Medição de Refletância

2. DEFINIÇÕES

2.1. Refletância Luminosa Total (ρ_x)

A refletância luminosa total é uma grandeza adimensional que corresponde à razão entre o fluxo luminoso refletido ($\Phi_{v,R}$) e o fluxo luminoso incidente ($\Phi_{v,i}$) sobre uma superfície. A equação (1) representa a definição de refletância luminosa total, onde $\Phi_{e,\lambda}$ é a distribuição espectral do iluminante.

$$\rho_x = \frac{\Phi_{v,R}}{\Phi_{v,i}} = \frac{\int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} * \rho_x(\lambda) * V(\lambda) * d\lambda}{\int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} * V(\lambda) * d\lambda} \quad (1)$$

2.2. Refletância Luminosa Direta (ρ_r)

A refletância luminosa direta corresponde à razão entre a parcela do fluxo luminoso refletido de maneira especular e o fluxo luminoso incidente sobre a superfície.

2.3. Refletância Luminosa Difusa (ρ_d)

A refletância luminosa difusa corresponde à razão entre a parcela do fluxo luminoso refletido de maneira não especular e o fluxo luminoso incidente sobre a superfície.

As definições acima indicam que a refletância luminosa total (ρ_x) de uma superfície é igual a soma da refletância luminosa direta (ρ_r) e da refletância luminosa difusa (ρ_d), conforme a equação (2).

$$\rho_x = \rho_r + \rho_d \quad (2)$$

3. MÉTODO DE MEDIÇÃO

O sistema de calibração para as medições de refletância luminosa foi realizado com uma esfera integradora de 50 cm de diâmetro, que permite a caracterização de amostras com no mínimo 5 cm na menor dimensão.

O Laboratório de Radiometria e Fotometria do Inmetro, onde são feitas as medições de refletância, possui mecanismos que controlam a poeira no ambiente, a temperatura, a umidade, e ambientes com superfícies pretas que diminuem quantidade de luz espalhada. Todas essas condições presentes ao mesmo tempo possibilitam um adequado controle sobre o processo de medição e contribuem para a confiabilidade dos resultados.

A rastreabilidade do sistema de medição é dada por uma placa de referência, calibrada espectralmente no Laboratório de Colorimetria e Espectrofotometria do Inmetro.

A Esfera para Medição de Refletância e Transmitância utilizada pelo Laboratório de Radiometria e Fotometria do Inmetro é um equipamento, em acordo com a norma DIN 5036 [3], a norma ISO 5740 [4] e a publicação CIE 38 [5], que permite realizar medições de refletância luminosa e transmitância luminosa em materiais com superfície plana, utilizados em luminárias, para iluminação geral, e outras aplicações. Associados à esfera existem: três fontes de iluminação (uma delas específica para a medição de refletância luminosa e as outras para transmitância luminosa), uma placa padrão de refletância luminosa, um espelho e um fotômetro (projetado especificamente para utilização juntamente com a esfera integradora de 50 cm). Na figura 3 temos um exemplo de uma placa padrão e um espelho.

Além desses equipamentos foi utilizado um nanovôltemetro digital para melhorar a resolução da leitura e um computador onde é feita aquisição e tratamento de dados através de um programa desenvolvido na plataforma

Labview. A figura 4 apresenta os principais componentes do sistema.

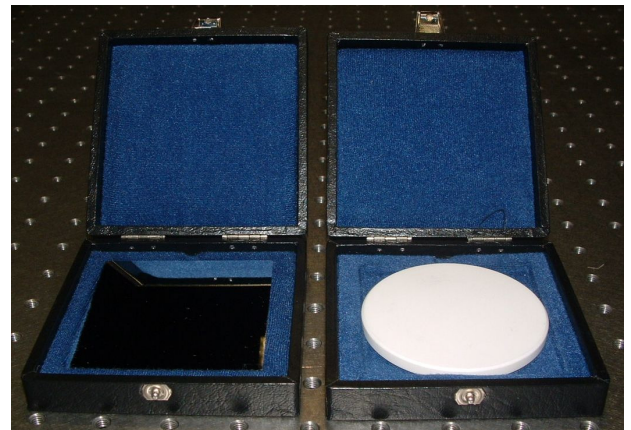


Fig. 3. Exemplo de um espelho e uma placa padrão respectivamente

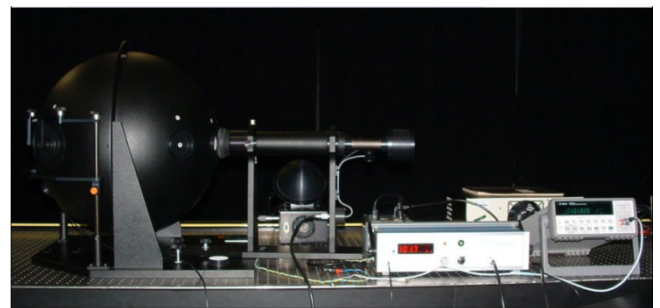


Fig. 4. Sistema constituído de esfera integradora, fonte luminosa, fotômetro e nanovôltemetro

Quando ocorre a incidência contínua de luz no interior de uma esfera integradora, suas múltiplas reflexões produzem uma iluminância uniforme na superfície interna, que é medida por um detector fotométrico instalado nessa superfície. Utilizando-se um feixe estreito de luz e sendo variada a refletância luminosa no local de incidência da luz, obtêm-se respostas no detector que são proporcionais a essas refletâncias luminosas. Assim, dispondo de um padrão com refletância luminosa conhecida, pode-se fazer duas leituras, uma com o padrão e outra com a amostra, e as indicações do fotômetro serão proporcionais às refletâncias luminosas. Padrão e amostra são utilizados simultaneamente, alternando-se entre as portas 1 e 2, conforme mostradas na figura 5, de modo a evitar a alteração na constituição da superfície interna da esfera.

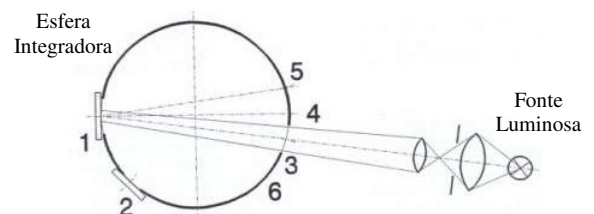


Fig. 5. Diagrama do sistema para medição de refletância luminosa

A refletância luminosa pode ser expressa a partir da equação (3).

$$\rho_x = \rho_N \frac{E_x}{E_N} \quad (3)$$

Onde:

ρ_x = refletância luminosa da amostra;
 ρ_N = refletância luminosa do padrão;
 E_x = leitura correspondente à amostra;
 E_N = leitura correspondente ao padrão.

As medições são realizadas levando-se em consideração a parcela correspondente à luz espalhada, que é subtraída das leituras realizadas no sistema. Isto é, uma pequena parcela da luz proveniente da fonte que não incide diretamente na área de medição.

3.1. Refletância Luminosa Total

Na medição da refletância luminosa total, consideramos na equação (3) a parcela de luz espalhada. Assim a refletância total é expressa na forma da equação (4).

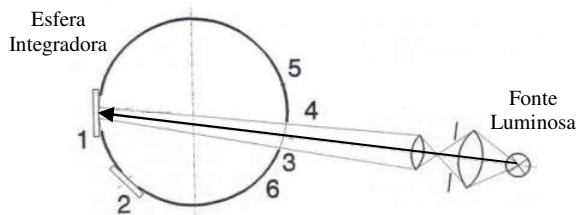
$$\rho_x = \rho_N \frac{E_x - E_f}{E_N - E_f} \quad (4)$$

Onde:

ρ_x = refletância luminosa total da amostra;
 ρ_N = refletância luminosa total do padrão;
 E_N = Sinal medido com o feixe de luz incidente na placa padrão na porta 1 e com a amostra na porta 2;
 E_x = Sinal medido com o feixe de luz incidente na amostra na porta 1 e com a placa padrão na porta 2;
 E_f = Sinal da luz espalhada com a porta 1 aberta e com a placa padrão na porta 2.

A equação (4) servirá de modelo matemático para cálculo da refletância luminosa total e para a estimativa das incertezas associadas.

A seqüência de medição consiste em posicionar o padrão e a amostra de acordo com as três configurações indicadas na figura 6, para as leituras de E_N , E_x e E_f , fazendo para cada uma delas a aquisição de dados pelo computador.



Configuração	Portas						Medições
	1	2	3	4	5	6	
I	N	X	-	+	+	+	E_N
II	X	N	-	+	+	+	E_x
III	-	N	-	+	+	+	E_f

(N) Padrão
(X) Amostra
(-) Porta aberta
(+) Porta fechada

Fig. 6. Seqüência de Medição para Refletância Total

3.2. Refletância Luminosa Difusa

Para a medição da refletância difusa é utilizada na porta 5 uma tampa com orifício (trap), pelo qual sai a parcela de reflexão direta, correspondendo agora a leitura do fot metro   reflexão difusa. Na porta 1 é instalado o espelho para ajustar o ângulo de incidência do feixe, de modo que a luz refletida saia pelo trap, e para avaliar a luz espalhada no percurso do feixe luminoso entre a porta 1 e a porta 5. A equa o (5) representa o modelo matemático para a reflexão difusa ρ_d . O  ndice t significa que a leitura é feita com o trap instalado na esfera.

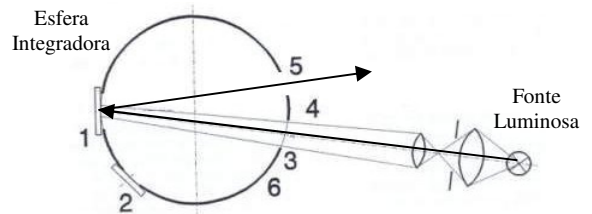
$$\rho_d = \rho_N \frac{E_{xt} - E_{ft} - \rho_x (E_{st} - E_{ft})}{E_{Nt} - E_{ft} - \rho_N (E_{st} - E_{ft})} \quad (5)$$

Onde:

ρ_x = refletância luminosa total da amostra;
 ρ_N = refletância luminosa total do padrão;
 E_{Nt} = Sinal medido com o feixe de luz incidente na placa padrão na porta 1 e com a amostra na porta 2;
 E_{xt} = Sinal medido com o feixe de luz incidente na amostra na porta 1 e com a placa padrão na porta 2;
 E_{ft} = Sinal da luz espalhada com a porta 1 aberta e com a placa padrão na porta 2;
 E_{st} = Sinal da luz espalhada com o feixe de luz incidente no espelho na porta 1 e com a placa padrão na porta 2.

A equa o (5) servirá de modelo matemático para cálculo da refletância luminosa total e para a estimativa das incertezas associadas.

A seq ncia de medição consiste em posicionar o padrão, a amostra e o espelho de acordo com as quatro configura es indicadas na figura 7, para as leituras de E_{Nt} , E_{xt} , E_{ft} e E_{st} , fazendo para cada uma delas a aquisição de dados pelo computador.



Configura�o	Portas						Medi�es
	1	2	3	4	5	6	
I	N	X	-	+	T	+	E_{Nt}
II	X	N	-	+	T	+	E_{xt}
III	-	N	-	+	T	+	E_{ft}
IV	S	N	-	+	T	+	E_{st}

(N) Padrão
(X) Amostra
(-) Porta aberta
(+) Porta fechada
(T) Trap
(S) Espelho

Fig. 7. Seq ncia de Medi o para Refletância Difusa

3.3. Refletância Luminosa Direta

A estimativa da refletância direta é feita pela diferença entre a refletância total e a difusa, conforme transformação na equação 2.

4. RESULTADOS E AVALIAÇÕES

Foi utilizada como amostra uma das chapas de alumínio planas (figura 2) e como referência uma placa padrão branca (figura 3) com refletância luminosa total $\rho_N = 0,863$ (86,3 % $\pm 1,1$ %) com certificado emitido pelo Inmetro.

O valor de cada um dos parâmetros “E” foi calculado através da média de 30 leituras e a estimativa das incertezas foi obtida utilizando-se uma planilha Excel, que foi preparada de acordo com o Guia para Expressão da

Incerteza da Medição [6].

4.1. Refletância Luminosa Total

Nessa etapa foram avaliadas todas as grandezas utilizadas para a determinação do valor da refletância e da sua incerteza. Foi dada atenção especial à reprodutibilidade, pois embora a maior contribuição seja a incerteza da placa padrão, sobre esta não temos controle; então foi estabelecido procedimento para todas as etapas do processo de medição dos parâmetros “E”, inclusive com a definição de marcações de onde se posicionar os itens utilizados nas medições.

A Tabela 1 apresenta o resumo da planilha de incerteza e o resultado final.

Tabela 1. Apresentação dos Resultados da Refletância Luminosa Total

Grandezas	Símbolo	Incerteza padrão $u(x_i)$	Tipo	Graus de liberdade	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza
Refletância total do padrão	ρ_N	5,61E-03	B	∞	1,0766	6,04E-03
Leitura do padrão	E_N	1,80E-05	A	29	-1,0557	-1,90E-05
Leitura da amostra	E_x	1,19E-05	A	29	0,9806	1,17E-05
Leitura da luz espalhada	E_f	1,76E-05	A	29	0,0751	1,32E-06
Reprodutibilidade	X_{rpr}	7,20E-04	A	2	0,9291	6,69E-04

$\rho_x =$	0,929
$v_{eff} =$	13639
$u_c(\rho_x) =$	0,00608
$k =$	2,00
$U(\rho_x) =$	0,012

4.2. Refletância Luminosa Difusa

Nas incertezas padrão apresentadas na Tabela 2, podemos notar que existem três contribuições principais que estão na mesma ordem de grandeza. Uma delas é a incerteza da refletância total do padrão, sobre a qual, conforme mencionado no item anterior, não temos controle; a outra é a reprodutibilidade, que foi determinada através de três

medições independentes realizadas por técnicos diferentes, e a última é a incerteza da refletância total da amostra, que deve ser estimada primeiro.

A Tabela 2 apresenta o resumo da planilha de incerteza e o resultado final.

Tabela 2. Apresentação dos Resultados da Refletância Luminosa Difusa

Grandezas	Símbolo	Incerteza padrão $u(x_i)$	Tipo	Graus de liberdade	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza
Leitura do padrão	E_{Nt}	1,19E-05	A	29	-0,7307	-8,73E-06
Leitura da amostra	E_{xt}	2,31E-05	A	29	0,9823	2,27E-05
Leitura da luz espalhada	E_{ft}	1,82E-05	A	29	0,0304	5,55E-07
Leitura da luz espalhada com espelho	E_{st}	1,89E-05	A	29	-0,2821	-5,33E-06
Refletância total da amostra	ρ_x	6,08E-03	A	13639	0,0008	-4,66E-06
Refletância total do padrão	ρ_N	5,61E-03	B	∞	0,7444	4,18E-03
Reprodutibilidade	X_{rpr}	5,44E-03	A	2	0,6419	3,49E-03

$\rho_d =$	0,642
$v_{eff} =$	11,823
$u_c(\rho_d) =$	0,00545
$k =$	2,25
$U(\rho_d) =$	0,012

4.3. Refletância Luminosa Direta

O resultado da refletância luminosa direta foi obtido por cálculo através da equação (2), ou seja, a diferença entre a refletância luminosa total e a refletância luminosa difusa.

A Tabela 3 apresenta o resumo da planilha de incerteza e o resultado final. Suas duas contribuições de incerteza são combinadas e são resultado das contribuições da refletância luminosa total e difusa medidas anteriormente.

Tabela 3. Apresentação dos Resultados da Refletância Luminosa Direta

Grandezas	Símbolo	Incerteza padrão $u(x_i)$	Tipo	Graus de liberdade	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para incerteza
Refletância total da amostra	ρ_x	6,08E-03	A	13639	1	6,08E-03
Refletância difusa da amostra	ρ_d	5,45E-03	A	11	-1	-5,45E-03

$\rho_r =$	0,287
$v_{eff} =$	59
$u_c(\rho_r) =$	0,00816
$k =$	2,04
$U(\rho_r) =$	0,017

Observando os valores da incerteza padrão dos parâmetros “E” nas Tabelas 1 e 2, constatamos que o sistema apresenta boa estabilidade de medição. Esta estabilidade se deve principalmente ao fato do sistema possuir um segundo detector, responsável pela realimentação do circuito que controla a fonte luminosa.

As incertezas consideradas para estes métodos de medição são provenientes dos sinais do padrão, da amostra, da luz espalhada, do espelho, da reprodutibilidade, todas do Tipo A e aquela proveniente da refletância do padrão, do tipo B.

A Tabela 4 apresenta os valores do catálogo do fabricante e as nossas medidas. Pretendemos realizar uma intercomparação para que seja verificada a compatibilidade dos nossos resultados.

Tabela 4. Refletância difusa e total medida e fornecida pelo fabricante

Refletância	Valores Calculados	Valores do Fabricante
Total	92,9 % \pm 1,2 %	94 %
Difusa	64,2 % \pm 1,2 %	60 % - 67 %

5. CONCLUSÃO

O sistema de calibração de refletância no Laboratório de Radiometria e Fotometria foi desenvolvido e testado.

Essas medições têm efeito direto para os projetistas luminotécnicos e sobre a qualidade da iluminação, visto que se pode conhecer com maior confiabilidade a refletância de diversos materiais tanto em luminárias como nos ambientes em que elas serão utilizadas, pois para a elaboração dos projetos luminotécnicos é necessário conhecer a refletância das superfícies existentes (piso, teto, paredes, móveis etc...).

O trabalho em questão teve o foco inicial para a indústria de iluminação, mas a esfera de refletância poderá ser utilizada para medir refletância de outros tipos de materiais, como tecidos, cerâmicas e tintas, utilizando-se o mesmo método.

Os principais resultados obtidos com algumas amostras de superfície planas existentes no laboratório foram satisfatórios, com incertezas na ordem de 2 %.

Após efetuarmos novos testes com amostras de acabamentos diferentes, adquiridas recentemente, disponibilizaremos este serviço externamente.

REFERÊNCIAS

- [1] Commission Internationale de l'Eclairage, Publicação CIE 130-1998, “*Practical Methods for the Measurement of Reflectance and Transmittance*”.
- [2] LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin – *Manual – Reflectance and transmittance measurement equipment RT 500*.
- [3] Norma DIN 5036-3:1979 – “*Radiometric and photometric properties of materials; methods of measurement for photometric and spectral radiometric characteristic*”.
- [4] Norma ISO 5740:1982, “*Road vehicles -- Rear view mirrors -- Test method for determining reflectance*”.
- [5] Commission Internationale de l'Eclairage, Publicação CIE 38-1977, “*Radiometric and Photometric Characteristics of Materials and their Measurement*”.
- [6] ABNT e Inmetro – Guia para a Expressão da Incerteza da Medição, terceira edição brasileira do “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*”, agosto/2003.