



IDENTIFICAÇÃO DA ABSORTÂNCIA SOLAR DE SUPERFÍCIES OPACAS A PARTIR DE IMAGENS DIGITALIZADAS

Maurício Roriz (1); Kelen Dornelles (2)

(1) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP. E-mail: m.roriz@terra.com.br

(2) Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. E-mail: kelend@fec.unicamp.br

RESUMO

Em países tropicais, a radiação solar é responsável por importante parcela da carga térmica dos edifícios. O fator que exerce maior influência sobre os ganhos de calor solar da envoltória é a absorptância solar, definida como a razão entre a energia solar absorvida pela superfície e o total da energia solar incidente. A literatura especializada frequentemente menciona uma suposta relação direta entre cores e absorptâncias. Cores, entretanto, são apenas sensações visuais e podem enganar, pois 55% da radiação solar ocorre fora do espectro visível. Assim, uma cor considerada clara pode absorver mais calor do que outra, de aparência mais escura. Os fabricantes de tintas raramente informam sobre as propriedades térmicas de seus produtos. O processo usualmente adotado para identificar a absorptância de uma superfície é medir sua refletância em um espectrofotômetro, recurso de difícil acesso. Este artigo apresenta um método para estimar a refletância de superfícies opacas, suficientemente simples para que possa ser aplicado diretamente pelos projetistas. Foram digitalizadas imagens de um catálogo de tintas e cada cor foi classificada segundo os sistemas cromáticos digitais RGB e HSL. Análises de regressão indicaram fortes correlações entre estes parâmetros e as refletâncias medidas em laboratório.

ABSTRACT

In tropical countries, solar radiation is the main responsible for the thermal load of buildings. The factor with major influence over the solar heat gains of the envelope is the solar absorptance, defined as the reason between the solar energy absorbed by the surface and the total of the incident solar energy. Specialized literature frequently mentions a supposed direct relationship between colors and absorptances. However, colors are visual sensations and they determine mistakes because 55% of the solar radiation occurs out of the visible spectrum. For this reason, a color with clear appearance can absorb more heat than another considered darker. The paints manufacturers rarely inform about the thermal properties of their products. The process usually adopted to identify the absorptance of a surface it is to measure its reflectance through an spectrophotometer, resource of difficult access. This paper presents a method to estimate the reflectance of opaque surfaces, sufficiently simplified that it can be applied directly by the designers. Images of a building paintings catalog were digitalized and each color was classified according to the digital chromatic systems RGB and HSL. Regression analyses indicated strong correlations between these parameters and the measured reflectances in laboratory.

1. INTRODUÇÃO

Do total da energia radiante que incide sobre um corpo, uma parcela é refletida, outra transmitida e outra absorvida. Nos corpos opacos, como a transmitância (ou transparência) é nula, a soma entre absorptância e refletância é igual à unidade, fato que permite determinar qualquer uma dessas propriedades a partir da outra.

Inúmeras pesquisas já demonstraram que as absorptâncias de superfícies expostas à radiação solar são fatores determinantes nas temperaturas que podem ser atingidas por estas superfícies. A figura 1 foi adaptada de Griggs, Sharp e MacDonald (1989) e mostra temperaturas superficiais registradas em coberturas com diferentes absorptâncias. Os revestimentos com alta absorptância também provocam problemas na escala da cidade, sendo uma das causas das chamadas ilhas urbanas de calor (figura 2).

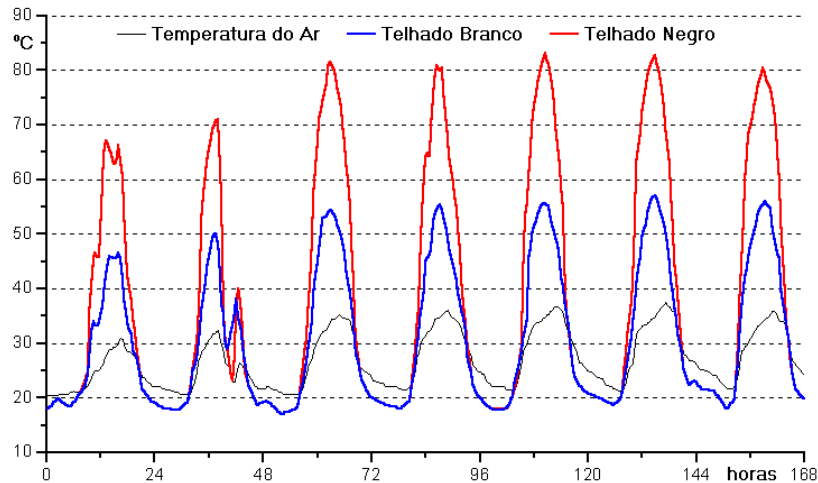


Figura 1: Absortâncias e temperaturas superficiais (adaptado de Griggs et al, 1989)

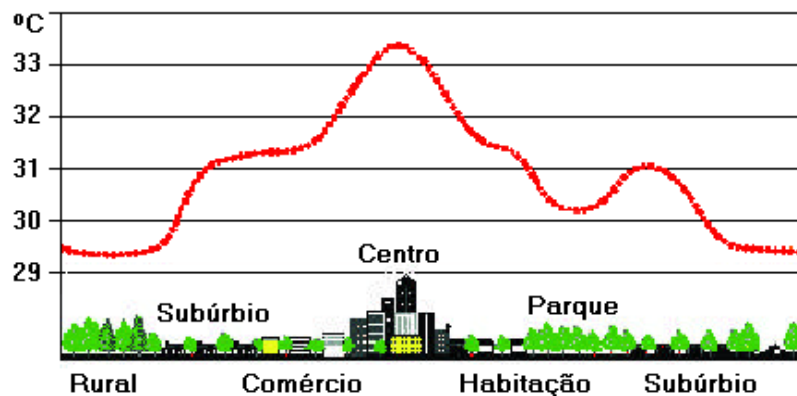


Figura 2: Esquema das ilhas urbanas de calor (adaptado de ESTES et al, 1999)

A equação 1 (AKBARI; LEVINSON; BERDAHL, 1996) é adotada pela ASTM E1980-96 (ASTM: American Society of Testing and Materials) para indicar a relação entre a temperatura de uma superfície, suas refletância e emissividade e as condições ambientais:

$$\alpha \cdot I_g = \varepsilon \cdot \sigma (T_s^4 - T_c^4) + hc (T_s - T_a) \quad [\text{Eq. 01}]$$

α = absorptância solar (para corpos opacos, $\alpha = 1 - \rho$, sendo “ ρ ” a refletância solar da superfície);

I_g = irradiância solar global [W/m^2];

ε = emissividade da superfície;

σ = Constante de Boltzmann = $5.6710\text{E}-8$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$];

T_s = temperatura absoluta da superfície [K], (válida para regime permanente ou pouca inércia);

T_c = temperatura aparente do céu [K];

Ta = temperatura absoluta do ar [K];
 hc = Coeficiente de convecção [W/(m².K)].

Para efeito de avaliação teórica de materiais, a ASTM (1996) estabelece condições ambientais de referência (Tabela 1), que correspondem às horas mais quentes de um dia de verão:

Tabela 1 - Condições ambientais de referência.

Ig	Ta	Tc	hc
1000 W/m²	37 °C = 310 K	27 °C = 300 K	12 W/(m².K)

Para o ambiente de referência, as temperaturas superficiais podem ser estimadas pela equação 2, cujos resultados estão indicados na figura 3:

$$T_s = 310.04 + 82.49 \alpha - 2.82 \sigma - 54.33 \alpha \cdot \sigma + 21.72 \alpha \cdot \sigma^2 \quad [\text{Eq. 02}]$$

Para condições diferentes das adotadas como referência, as temperaturas superficiais são obtidas por iteração da equação 1, conforme exemplo apresentado na figura 4.

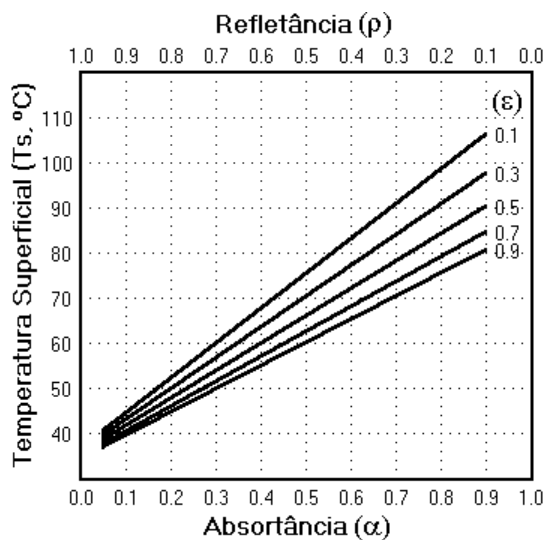


Figura 3: Temperaturas superficiais para as condições indicadas na tabela 1.

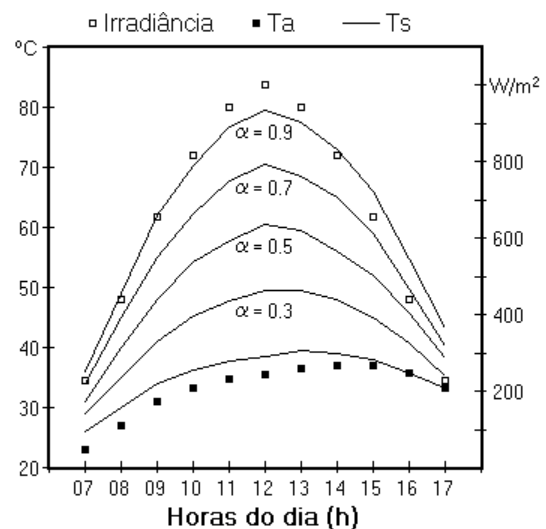


Figura 4: Temperaturas do ar (Ta) superficiais (Ts) para emissividade de 0.9 e ambiente variável.

Como indicam as equações 1 e 2, a absorptância é fator determinante nas temperaturas que ocorrem em qualquer superfície exposta ao sol, como as faces externas das fachadas e coberturas de uma edificação, os revestimentos de pisos em espaços abertos ou as placas receptoras de um coletor de energia solar. Porém, apesar de reconhecer a importância dessa propriedade, a literatura especializada não a tem tratado com a profundidade e o rigor que seriam desejáveis. Nesse sentido, a grande maioria dos autores oferece somente uma pequena relação de absorptâncias, apresentadas em função das cores das superfícies. Embora equivocada, esta simplificação ainda é adotada mesmo em importantes documentos considerados como referência internacional, como é o caso, por exemplo, dos Fundamentos da ASHRAE (2001). Consagrou-se, dessa maneira, o conceito de que a absorptância seria crescente na medida em que as cores fossem mais escuras. Há mais de 300 anos, no entanto, Newton já sabia que as radiações não têm cor. Cores não existem na natureza, são apenas sensações visuais e que podem variar entre diferentes observadores, não sendo indicadores confiáveis das propriedades físicas de um corpo.

2. CORES, ABSORTÂNCIAS E REFLETÂNCIAS

O espectro solar corresponde a uma faixa de radiações em comprimentos de onda desde 300 até aproximadamente 3000nm, abrangendo três regiões: ultravioleta, visível e infravermelho (Figura 5).

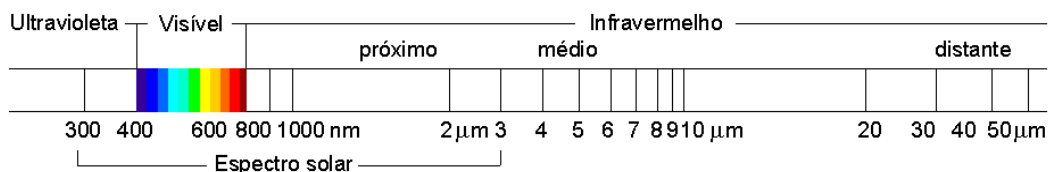


Figura 5: Regiões do espectro solar.

A região visível compreende um intervalo espectral bem definido, que varia de 380nm a 780nm, e é aquele que sensibiliza o olho humano, permitindo a visão dos objetos. Dependendo do comprimento de onda, a luz refletida por uma superfície produz as diferentes sensações de cores (Figura 6).



Figura 6: Espectro visível (nm) e cores percebidas

A intensidade da radiação solar não é constante ao longo do espectro e sua distribuição depende das condições atmosféricas. Para servir de referência, a ASTM (2003), com base em séries de dados medidos, definiu um espectro solar padrão, indicando a intensidade correspondente a cada comprimento de onda. Na figura 7, este padrão é comparado com a curva de sensibilidade do olho humano, que também varia entre diferentes comprimentos de ondas.

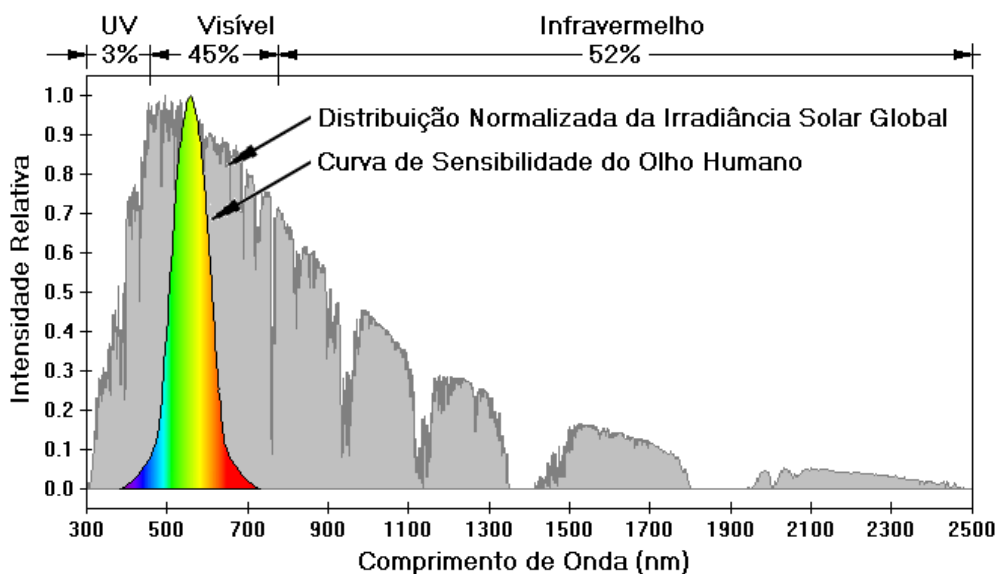


Figura 7: Espectro padrão e sensibilidade da visão humana.

Como a refletância varia em função do comprimento de onda dos raios incidentes, o comportamento óptico de cada superfície pode ser representado por uma curva de distribuição de suas refletâncias ao longo do espectro solar. Uma refletância média pode ser calculada, para um intervalo específico ou para todo o espectro, através da integração da curva. Os raios refletidos na faixa visível são captados pelo olho e provocam as sensações cromáticas. A visão humana, entretanto, percebe apenas uma estreita gama de radiações (Figura 7), motivo pelo qual não proporciona uma informação confiável sobre a refletância ou a absorvância solar de um objeto.

3. REFLETÂNCIA SOLAR DE SUPERFÍCIES PINTADAS

Castro (2002), por meio de um espectrofotômetro, identificou as curvas de distribuição de refletâncias de superfícies de cimento, pintadas com diferentes cores. Para elaboração do presente artigo, os dados

numéricos das refletâncias foram identificados nos gráficos publicados por Castro. A curva de cada cor foi digitalizada em scanner e seus respectivos valores obtidos por meio de leitura digital. Essas curvas (Figuras 8 e 9) são denominadas “assinaturas espectrais” da superfície, pois caracterizam em detalhe o seu comportamento ótico.

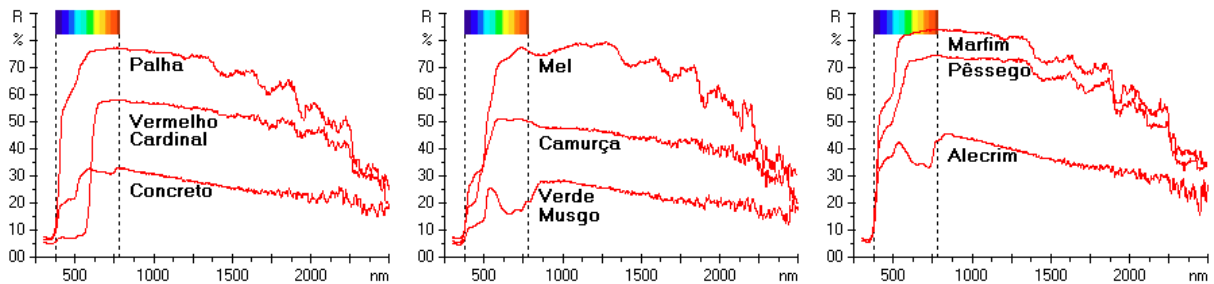


Figura 8: Comportamento espectral de tintas aplicadas sobre argamassa.

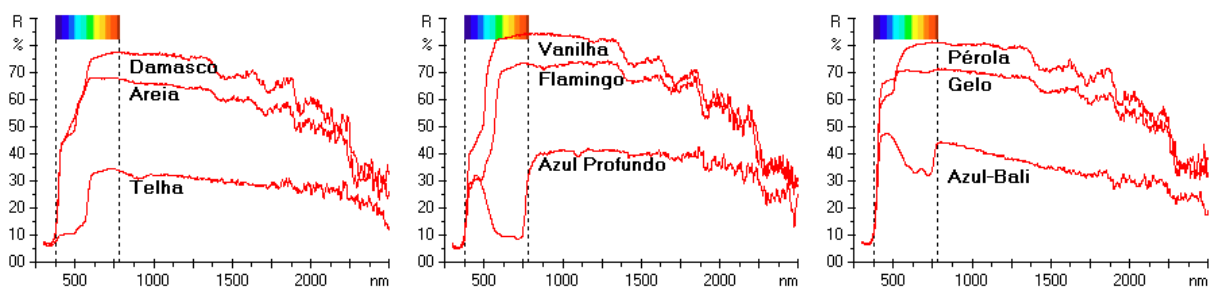


Figura 9: Comportamento espectral de tintas aplicadas sobre argamassa.

Algumas das tintas analisadas ilustram a limitação da visão humana (Figura 10). Embora suas refletâncias totais sejam bastante próximas, a cor “gelo” aparenta ser bem mais clara do que a cor “mel”. Acontece o contrário entre o “vermelho cardinal” e o “azul bali”, que provocam sensações semelhantes de claridade, mas cujas refletâncias diferem em cerca de 10%.

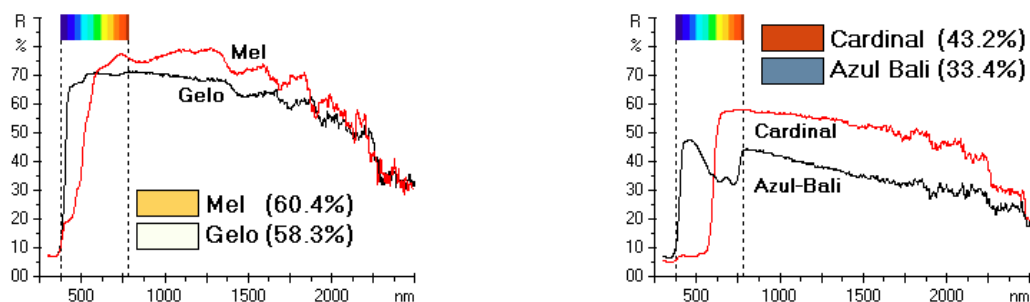


Figura 10: As aparências das cores enganam.

Na continuidade da pesquisa, a partir dos catálogos distribuídos pelo fabricante, as 19 cores foram também digitalizadas em scanner (marca AOC, modelo Spectrum F-1200). Cada uma das amostras foi caracterizada pelos parâmetros dos sistemas cromáticos digitais RGB (Red, Green, Blue) e HSL (Hue, Saturation, Luminance), conforme a tabela 2, que também indica os tons de cinza correspondentes a cada cor, cujos parâmetros R, G e B são iguais entre si e calculados como $0.30R + 0.59G + 0.11B$ da cor respectiva. Dentre as 22 tintas mencionadas por Castro (2002), apenas 19 foram consideradas nessa fase do estudo. Das três cores restantes, duas já não constam do catálogo e outra (branco neve) não ofereceu contraste suficiente para o scanner.

A tabela 3 indica as refletâncias médias calculadas por faixa do espectro, sendo cada valor resultante da integração dos respectivos intervalos das curvas mostradas nas figuras 8 e 9. Os sistemas cromáticos digitais, como RGB, HSL e outros, representam tentativas de se reproduzir, em monitores ou em televisores, sensações visuais semelhantes às provocadas pelos objetos reais. Como nenhum

desses sistemas é perfeito, as cores mostradas nas tabelas 2 e 3 são apenas ilustrativas, podendo ser diferentes dos resultados efetivos das tintas aplicadas sobre paredes.

Tabela 2 - Classificação de 19 cores de tintas pelos sistemas RGB e HSL.




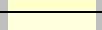









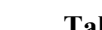

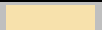


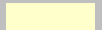
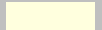

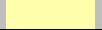











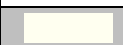

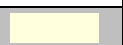




nº	cor	nome comercial	Sistema RGB				Sistema HSL		
			R	G	B	Cinza	H	S	L
1		Alecrim	117	145	127	135	141	19	56
2		Areia	247	225	172	226	42	30	96
3		Gelo	255	255	240	253	60	5	100
4		Mel	255	202	90	206	41	64	100
5		Marfim	255	255	203	249	60	20	100
6		Palha	255	255	222	251	60	12	100
7		Pêssego	255	221	162	225	38	36	100
8		Vanilla	255	255	171	246	60	32	100
9		Flamingo	255	171	120	191	23	52	100
10		Telha	105	11	0	38	6	100	41
11		Azul Bali	110	136	162	131	210	32	63
12		Camurça	195	174	130	175	41	33	76
13		Pérola	255	255	229	252	60	10	100
14		Damasco	255	231	182	233	40	28	100
15		Concreto	106	103	60	99	56	43	41
16		Preto	7	7	5	7	60	28	2
17		Vermelho Cardinal	192	40	20	83	7	89	75
18		Azul Profundo	43	66	115	64	221	62	45
19		Verde Musgo	75	104	57	90	97	45	40

Tabela 3 - Refletâncias médias de cada faixa do espectro.

Tinta	Nº	Cor	Nome	UV	Violeta	Azul	Verde	Amarelo	Laranja	Vermelho	Visível	IV	Total
Acrílica	1		Alecrim	7.4	30.2	37.9	41.1	40.5	37.7	35.8	35.9	34.9	34.0
	2		Areia	7.8	38.5	48.7	59.1	70.5	70.7	68.4	58.5	54.5	53.5
	3		Gelo	7.9	49.9	69.0	70.4	74.4	73.5	70.8	66.1	58.9	58.3
	4		Mel	7.8	18.9	29.2	53.8	73.8	75.0	76.0	55.4	64.1	60.4
	5		Marfim	6.7	44.9	60.0	76.1	86.0	85.5	84.1	72.1	67.6	66.1
	6		Palha	8.0	44.1	62.1	70.2	79.1	79.1	77.3	67.5	61.3	60.5
	7		Pêssego	7.0	38.6	49.8	59.0	73.7	75.1	74.0	61.2	60.9	59.0
	8		Vanilla	6.4	37.0	48.8	71.5	86.2	85.7	84.0	68.6	66.8	64.9
	9		Flamingo	6.6	27.2	31.6	41.4	66.4	72.5	72.9	52.8	61.2	57.6
	10		Telha	6.5	10.0	10.8	13.6	27.0	33.4	34.2	22.4	28.2	26.4
	11		Azul Bali	7.4	37.4	48.4	42.2	37.6	36.1	34.8	37.8	33.7	33.4
	12		Camurça	6.5	26.1	32.8	43.1	53.4	53.0	51.1	42.7	41.4	40.3
	13		Pérola	7.4	47.7	63.4	72.8	82.7	82.6	81.2	70.7	66.4	65.0
	14		Damasco	7.7	38.3	51.9	61.1	75.7	78.0	77.2	63.3	63.2	61.1
	15		Concreto	7.1	18.5	21.9	28.4	34.2	33.6	31.7	27.5	25.1	24.9
	16		Preto	4.4	4.3	4.2	4.0	4.0	4.0	3.9	4.0	4.3	4.2
PVA	17		Vermelho Cardinal	5.3	7.2	7.3	8.3	19.5	40.5	57.3	29.7	48.2	43.2
	18		Azul Profundo	5.8	26.2	30.9	18.7	11.2	10.3	11.8	17.4	36.6	32.0
	19		Verde Musgo	5.2	10.9	13.0	22.3	23.1	19.3	17.5	17.0	22.2	20.7

Os valores acima revelam importantes diferenças entre as refletâncias da faixa visível e as do espectro solar total. Os casos mais significativos são apresentados na tabela 4, indicando o quociente entre ambas (Total/Visível).

Tabela 4 - Relações entre refletâncias (espectro solar total / espectro visível)

Cor da tinta	Gelo	Azul Bali	Palha	Telha	Verde Musgo	Vermelho Cardinal	Azul Profundo
Aparência							
Total / Visível	0.88	0.88	0.90	1.18	1.22	1.45	1.84

Observa-se que as tintas à base de PVA apresentam os maiores quocientes. No caso da tinta Azul Profundo, por exemplo, a proporção chega a 184%. Os valores encontrados reforçam as evidências de que cores não podem ser consideradas como indicadores da absorvância solar.

4. CORRELAÇÕES ENTRE IMAGENS DIGITALIZADAS E REFLETÂNCIAS

Finalmente, procurou-se verificar se as refletâncias poderiam ser estimadas a partir dos parâmetros cromáticos digitais. Sabe-se que, assim como ocorre com as cores, estes parâmetros também correspondem apenas ao espectro visível, mas apresentam sobre aquelas a vantagem de não envolverem a subjetividade das sensações visuais. Além desse aspecto, permitem quantificar cada um dos componentes RGB e HSL, ampliando significativamente o potencial de análise.

Não é original a intenção de estimar refletâncias ou absorvâncias a partir de imagens digitalizadas. Processos com este mesmo objetivo são usuais entre as técnicas de sensoriamento remoto (BACOUR et al., 2002) ou computação gráfica (MARSCHNER, 1998; SCHETTINI e BAROLO, 1996; TOMINAGA e TANAKA, 2000). Com base em arquivo digital de imagens, Farrel et al. (1999) calcularam as refletâncias de tintas em obras de arte.

Assim, por meio de análise de regressão, procurou-se identificar equações que relacionassem as refletâncias medidas em diferentes intervalos do espectro com os parâmetros cromáticos digitais das 19 tintas estudadas.

4.1 Estimativa da Refletância na Faixa Visível (R_v)

Para estimar a refletância no intervalo visível do espectro foi obtida a seguinte equação:

$$R_v = 1.109 + 0.071 R + 0.066 (R+G+B) \quad [\text{Eq. 03}]$$

$$\begin{aligned} \text{Coeficiente de correlação: } R &= 0.99 \\ \text{Desvio padrão} &= 3.2 \end{aligned}$$

R_v = Refletância na faixa visível do espectro (%);

R, G e B = parâmetros do sistema RGB.

4.2 Estimativa da Refletância Solar Total (R_t)

A equação 4 permite estimar a refletância das tintas em relação ao intervalo total do espectro solar:

$$R_t = -9.94 + 0.289 S + 0.093 (R+G+B) \quad [\text{Eq. 04}]$$

$$\begin{aligned} \text{Coeficiente de correlação: } R &= 0.98 \\ \text{Desvio padrão} &= 3.4 \end{aligned}$$

R_t = Refletância no espectro solar total (%);

R, G e B = parâmetros do sistema RGB;

S = parâmetro “saturação” do sistema HSL.

As figuras 11 e 12 indicam as primeiras correlações encontradas entre refletâncias medidas e valores estimados por equações de regressão, baseadas nos parâmetros cromáticos digitais das 19 tintas estudadas.

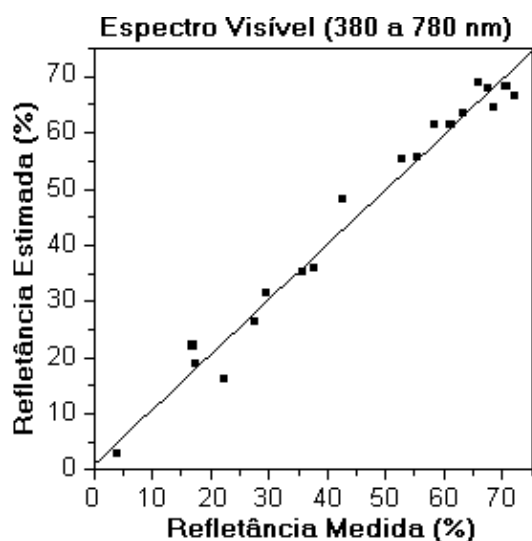


Figura 11: Correlações no espectro visível (equação 3)

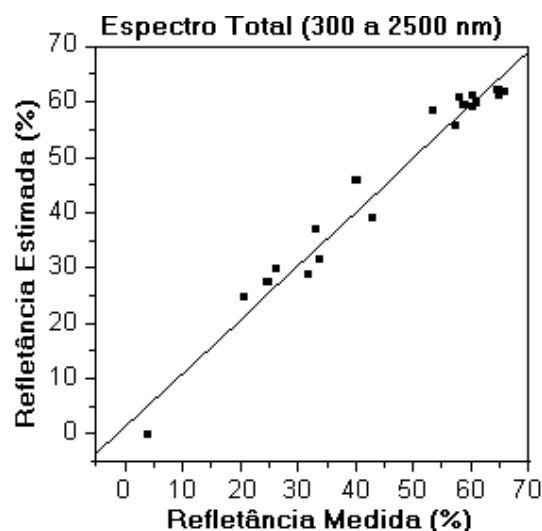


Figura 12: Correlações no espectro total (equação 4)

5. CONCLUSÕES

Foram aqui apresentados os primeiros resultados de uma pesquisa ainda em andamento. Discutiu-se a grande importância que a refletância solar exerce sobre o desempenho térmico de edificações e demonstrou-se que a percepção visual humana não é instrumento adequado para identificar esta propriedade das superfícies. As correlações já encontradas sugerem que o procedimento proposto é viável e que pode ser útil na caracterização ótica de pinturas e revestimentos usados na construção civil. Nas próximas etapas da pesquisa, serão analisadas outras tintas e alguns revestimentos, na busca de melhor compreensão dos fenômenos envolvidos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBARI, H.; LEVINSON, R.; BERDAHL, P. ASTM standards for measuring solar reflectance and infrared emittance of construction materials and comparing their steady-state surface temperatures. ACEEE SUMMER STUDY ON ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS, 1996. **Efficiency and sustainability**. v. 1, p. 1.1-1.9.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E1980-96**, Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces, West Conshohocken, PA, American Society of Testing and Materials. 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G173-03**: standard tables for reference solar spectral irradiances - direct normal and hemispherical on 37° tilted surface. 2003.

ASHRAE. Handbook: Fundamentals 2001, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. 2001

BACOUR, C.; JACQUEMOUD, S.; TOURBIER, Y.; DECHAMBRE, M.; FRANGI, J.P. Design and analysis of numerical experiments to compare four canopy reflectance models. **Remote Sensing of Environment**, n. 79, p. 72-83, 2002.

CASTRO, A. P. A. S. **Análise da refletância de cores de tintas através da técnica espectrofotométrica**. 2002. 183p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2002.

ESTES, M. G.; GORSEVSKI, V.; RUSSEL, C.; QUATTROCHI, D.; LUVALL, J. The Urban Heat Island Phenomenon and Potential Mitigation Strategies. In: NATIONAL PLANNING CONFERENCE, 1999, Seattle. **Proceedings...** Seattle: American Planning Association, 1999.

FARREL, J. E.; CUPITT, J; SAUNDERS, D.; WANDELL, B. Estimating spectral reflectances of digital artwork. In: CHIBA CONFERENCE ON MULTISPECTRAL IMAGING, 1999. Disponível em: <http://white.stanford.edu/users/brian/pdc/ColorChiba.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2005.

GRIGGS, E. I.; SHARP, T. R., MAC DONALD, J. M. Guide for estimating differences in building heating and cooling energy due to changes in solar reflectance of a low-sloped roof. Oak Ridge: **Oak Ridge National Laboratory**, 1989. Disponível em: <http://eber.ed.ornl.gov/commercialproducts/ornl6527.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2005.

MARSCHNER, S. R. **Inverse rendering for computer graphics**. 1998. 163p. Dissertation (Doctor in Philosophy) - Cornell University, Cornell. 1998. Disponível em: <http://www.graphics.cornell.edu/pubs/1998/Mar98.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2005.

SCHETTINI, R.; BAROLO, B. (1996). Estimating reflectance functions from tristimulus values. **Applied Signal Processing**, 1996. v. 3, p. 104-115.

TOMINAGA, S., TANAKA, N. Estimating reflection parameters from a single color image. **IEEE Computer Graphics and Applications**, n. 20, p.58-66, Aug. 2000.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa (Processo nº 04/11092-4).