

# Influência do ângulo de incidência na transmitância de luz natural através de materiais transparentes

*The influence of the incidence angle on the transmittance of natural light through transparent materials*

Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos  
Maurício Roriz

## Resumo

**A** partir de resultados de ensaios espectrofotométricos, vidros e outros materiais transparentes foram agrupados conforme suas curvas de variação da transmitância da luz visível ( $T_v$ ) em função do ângulo de incidência. Foi definido para cada grupo um material hipotético de referência, para o qual se obteve uma equação genérica dessa curva, com parâmetros específicos para cada grupo, possibilitando obter, para esse material, os valores da transmitância da luz visível para qualquer ângulo de incidência. Os valores para os materiais que compõem cada grupo são calculados pela multiplicação dos valores da curva de referência por um coeficiente de ajuste, que no método aqui apresentado é o valor da transmitância para incidência normal do material considerado. A definição de curvas de referência da variação da transmitância com o ângulo de incidência minimiza a necessidade de ensaios para a caracterização ótica de materiais transparentes. Permite a obtenção do valor da transmitância da luz visível, para qualquer ângulo de incidência, de uma grande variedade de espessuras e composições de materiais transparentes, sabendo-se o grupo a que pertencem e o valor da transmitância para a incidência normal. Os dados obtidos por esse método servem como subsídios para os procedimentos de cálculo de disponibilidade de luz natural, nos quais é levado em consideração o ângulo real de incidência da luz sobre o material transparente.

**Palavras-chave:** Material transparente. Iluminação natural. Transmitância de luz visível.

Joaquim Cesar Pizzutti  
dos Santos  
Departamento de Estruturas e  
Construção Civil  
Universidade Federal de Santa  
Maria  
Centro de Tecnologia, Camobi  
Santa Maria - RS - Brasil  
CEP 97119-900  
Tel.: (55) 32208144  
E-mail: joaquim@smail.ufsm.br

Maurício Roriz  
Departamento de Engenharia  
Civil  
Universidade Federal de São  
Carlos  
Rodovia Washington Luís, Km  
235  
São Carlos - SP - Brasil  
CEP 13565-905  
E-mail: m.roriz@terra.com.br

Recebido em 25/01/07  
Aceito em 27/11/07

## Abstract

*Based on spectrophotometric measurements, glasses and others transparent materials were clustered according to their curves of visible light transmittance ( $T_v$ ) variation as a function of the incidence angle. For each group, a hypothetical reference material was defined, for which a generic  $T_v$  equation was obtained, with specific parameters for each group, making possible to calculate for that material the value of  $T_v$  for all light incidence angles. Values for others materials of the group are calculated through the multiplication of the reference curve values by an adjustment coefficient that in the presented method is the value of transmittance for normal incidence of the considered material. The definition of reference curves for transmittance variation with the incidence angle minimizes the necessity of tests for optic characterization of transparent materials. It allows obtaining values of visible light transmittance for any incidence angle of a large variety of thicknesses and compositions of transparent materials, based on the material group and on its transmittance value for the normal incidence. Data obtained through this method can be used for calculation procedures of natural light availability, in which the real angle of light incidence on transparent material is taken into account.*

**Keywords:** Transparent material. Natural illumination. Visible light transmittance.

## Introdução

A crescente preocupação com a eficiência energética, somada à progressiva generalização do uso de materiais transparentes<sup>1</sup> nas vedações das edificações, elevou os níveis de exigência dos consumidores, induzindo notável evolução tecnológica nesses materiais. Assim, vêm aumentando significativamente o número de opções e a variedade de características dos materiais transparentes disponíveis no mercado.

Apesar da consagrada importância do ângulo de incidência da radiação solar para o desempenho térmico e luminoso dos edifícios, esse fato é normalmente negligenciado nos procedimentos usuais de cálculo de luz natural e carga térmica.

Pfrommer *et al.* (1995) comentam que os fabricantes de vidros somente divulgam dados do comportamento desse material para radiação com incidência normal, alertando que tais valores fornecem apenas uma aproximação grosseira dos ganhos de energia quando aplicados a ângulos maiores que 50°.

No cálculo de luz natural disponível em um ponto interno de um ambiente são consideradas três parcelas: a luz proveniente da abóbada celeste (componente celeste); a luz refletida externamente; e a luz refletida internamente.

Para o cálculo da componente celeste, assunto ao qual se refere este trabalho, é necessário identificar a região visível do céu através da abertura, a partir do ponto interno considerado, podendo-se dividir a mesma em parcelas, das quais são obtidas as respectivas posições no céu, associadas aos ângulos de altura e de azimute, suas luminâncias em função do local, tipo de céu, dia do ano e horário do dia, e o ângulo sólido abrangido.

Com esses dados têm-se a intensidade e o ângulo de incidência da luz proveniente de cada uma dessas parcelas sobre a superfície transparente da janela e sobre o plano que contém o ponto interno. A soma da iluminância causada por todas as parcelas do céu visíveis a partir do ponto resulta no valor do total de iluminância sobre o ponto, tendo como fonte a abóbada celeste. A Figura 1 apresenta um exemplo de parcelamento do céu e de distribuição de luminâncias no céu.

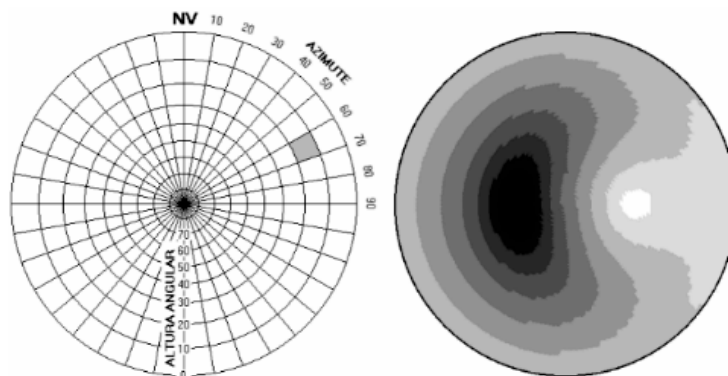
Tendo o valor do ângulo de incidência influência sobre a transmitância da luz visível ( $T_v$ ) do material transparente, um cálculo de ganhos de luz natural que considere esse fato necessita do valor da  $T_v$  para ângulos variados para o tipo de material a ser utilizado. Devido à grande diversidade atual desses materiais, a montagem de uma base de dados desses valores demandaria grande número de ensaios, envolvendo tempo e recursos excessivos, motivo pelo qual ela ainda não está disponível.

Este artigo apresenta um método alternativo para a solução do problema. A partir da observação da existência de grupos de materiais transparentes com padrões similares de variação da  $T_v$  em função do ângulo de incidência, foi identificado um material de referência para cada grupo, e definida a sua curva de variação dos valores da  $T_v$  com o ângulo, partindo de um (1) para incidência normal (0°) até zero para incidência a 90°. Os valores dessa curva de referência podem ser ajustados para um material qualquer do grupo considerado a partir da multiplicação por um coeficiente, que corrige igualmente todos os valores da curva de referência, sendo obtido pela divisão da  $T_v$  do material qualquer pela  $T_v$  do material de referência, ambas para incidência normal. Como o valor da  $T_v$  para incidência normal do material de referência é igual a um (1), o valor desse coeficiente é igual ao valor da  $T_v$  para incidência normal do material qualquer.

A precisão desse processo de cálculo depende da semelhança entre os comportamentos dos materiais de cada grupo, quanto à influência exercida pelo ângulo de incidência sobre a  $T_v$ , pois um único valor de correção deve ser válido para qualquer ângulo.

Na pesquisa de Santos (2002), foram ensaiados em espectrofotômetro 60 tipos de materiais transparentes, obtendo-se a variação das transmitâncias, refletâncias e absortâncias como função do ângulo de incidência. Os dados resultantes permitiram identificar os grupos e os seus respectivos materiais de referência.

<sup>1</sup> Neste artigo o termo "transparente" se refere ao material que transmite a radiação de forma direta - sendo o tipo de material estudado neste trabalho -, enquanto o material translúcido a transmite de forma difusa (SANTOS, 2002).



Fonte: Andrade, 2004

Figura 1 - Exemplo de parcelamento do céu e de distribuição de luminâncias (Cruz Alta, RS, 28 de outubro, 9h00, céu limpo 8/8), em projeção estereográfica

## Metodologia

As transmitâncias para ângulos variados de incidência foram obtidas em espectrofotômetro CARY 5G, equipamento que possui dispositivo para variação no ângulo de posicionamento da amostra em relação ao feixe incidente. A faixa espectral utilizado nas medições foi de 300 nm a 2000 nm, com intervalo de 4 nm. A transmitância da luz visível para os diferentes ângulos de incidência foi calculada utilizando-se apenas os resultados do espectro contido entre 380 nm e 780 nm, fazendo-se a ponderação da curva espectrofotométrica resultante do ensaio, em relação à energia em cada comprimento de onda do espectro solar padrão utilizado, conforme ASTM-E892-87 (ASTM, 1987), e calculando-se a relação entre a radiação solar incidente e a radiação que passa através da amostra, a partir da integração da curva ponderada resultante. Assim, no cálculo da transmitância da luz visível, foi considerada a transmitância para cada comprimento de onda dentro do espectro visível e o percentual de energia em cada um deles dentro da radiação solar padrão.

Para a determinação de grupos de materiais com comportamento semelhante de variação da transmitância da luz visível ( $T_v$ ) com o ângulo de incidência, foi utilizada a análise comparativa da variação da  $T_v$  relativa de cada material para os diversos ângulos ( $T_{vRel}$ ), sendo esta obtida da divisão da  $T_v$  de cada ângulo pela  $T_v$  para incidência normal.

## Análise dos dados

As Figuras 2 a 10 apresentam os gráficos comparativos da variação da  $T_{vRel}$  em função do ângulo de incidência, observando-se a relação entre os diversos materiais e o vidro incolor de 3 mm, material usual de referência. O uso da  $T_{vRel}$  nesses gráficos evidencia o comportamento de variação da  $T_v$  do material em função do seu valor para incidência normal, permitindo a análise comparativa de variação de  $T_v$  com o ângulo, que é o item que define os diferentes grupos. O valor inicial de todos os gráficos (1,0), obtido para a incidência normal, passa a ser o valor-base para a variação da  $T_v$  do material de referência.

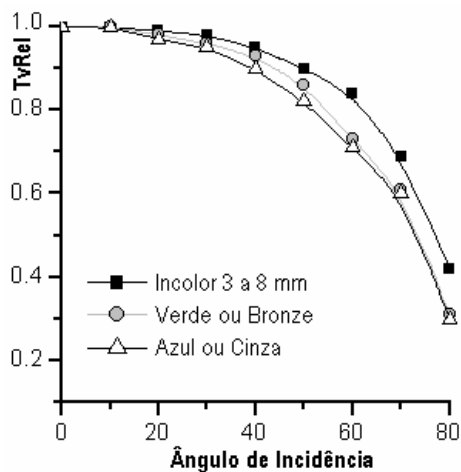


Figura 2 - Vidros comuns: transmitância relativa da luz visível (TvRel) em função do ângulo de incidência

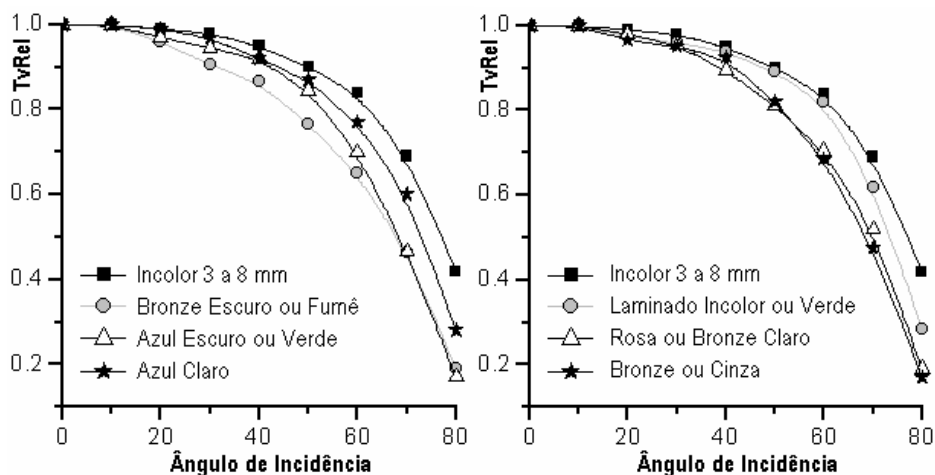


Figura 3 - Vidros laminados: transmitância relativa da luz visível (TvRel) em função do ângulo de incidência

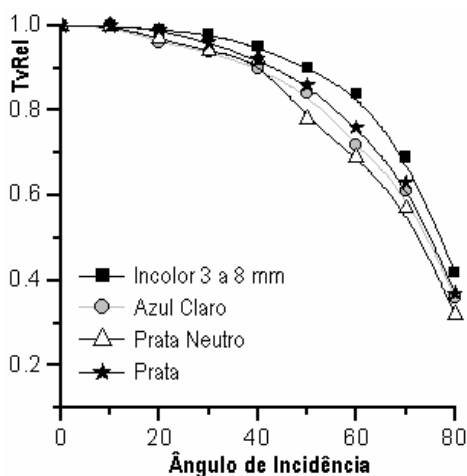


Figura 4 - Vidros laminados refletivos: transmitância relativa da luz visível (TvRel) em função do ângulo de incidência

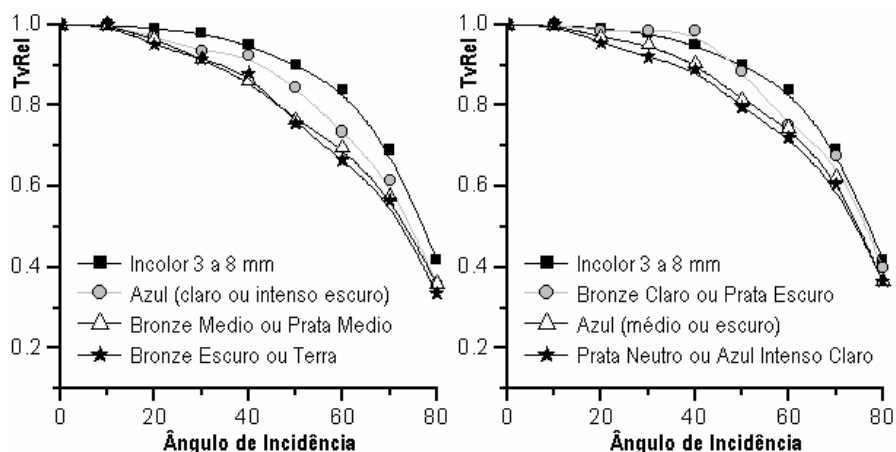


Figura 5 - Vidros refletivos a vácuo Cebrace: transmitância relativa da luz visível (TvRel) em função do ângulo de incidência

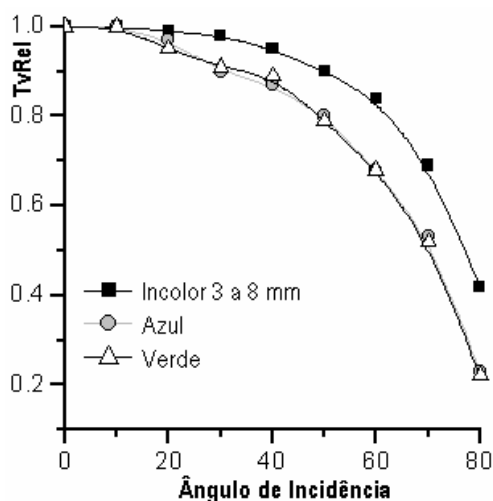


Figura 6 - Vidros refletivos a vácuo Guardian: transmitância relativa da luz visível (TvRel) em função do ângulo de incidência

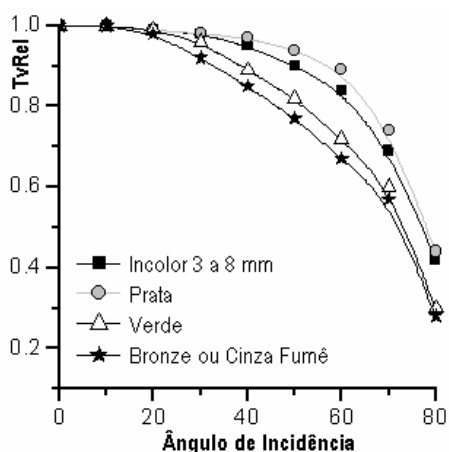


Figura 7 - Vidros refletivos pirolíticos: transmitância relativa da luz visível (TvRel) em função do ângulo de incidência

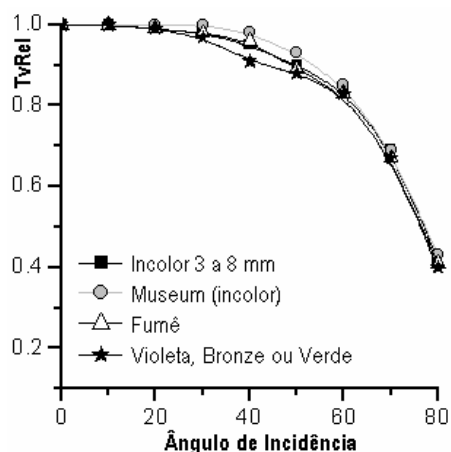


Figura 8 - Películas comuns: transmitância relativa da luz visível (TvRel) em função do ângulo de incidência

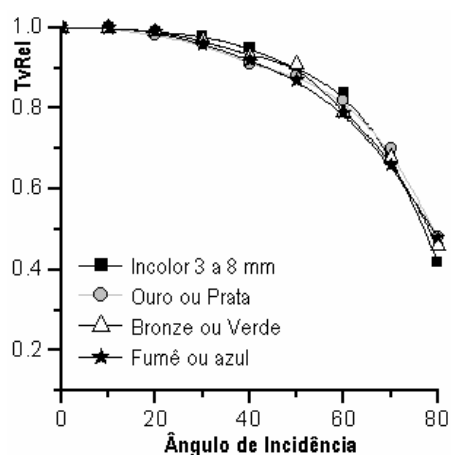


Figura 9 - Películas refletivas: transmitância relativa da luz visível (TvRel) em função do ângulo de incidência

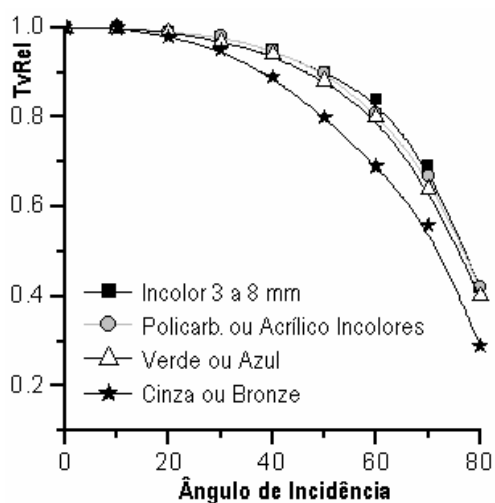


Figura 10 - Policarbonatos e acrílico: transmitância relativa da luz visível (TvRel) em função do ângulo de incidência

Observam-se, na análise desses gráficos, os seguintes comportamentos dos diferentes materiais transparentes analisados:

- (a) o coeficiente de absorção do elemento tem grande importância na variação da sua transmitância, pois com a variação do ângulo de incidência varia também a distância percorrida pelo raio luminoso no interior do material (caminho óptico). Assim, quanto maior a absorvância, maior é a dependência da Tv em relação ao ângulo de incidência;
- (b) no vidro incolor a absorção é reduzida e varia pouco com o ângulo de incidência, podendo a variação de Tv nesse material ser considerada função exclusiva da variação da refletância;
- (c) nos vidros coloridos a Tv diminui proporcionalmente mais rápido que no incolor, devido ao fato citado anteriormente, resultando um modo diferente de variação desse parâmetro;
- (d) com os vidros laminados, formados por camadas de vidros coladas por películas de butiral, ocorre algo semelhante, mas com maior intensidade nos ângulos maiores, especialmente para aqueles com película interna de alta absorção ou compostos de vidros coloridos. Dessa maneira, esses vidros têm um comportamento de variação de Tv diferente dos vidros comuns, possuindo dois padrões entre eles mesmos: os vidros com alta Tv e baixa absorção (incolor, verde, azul-claro); e os demais, que possuem baixa Tv e alta absorção;
- (e) nos vidros laminados refletivos, a variação da Tv é semelhante à apresentada pelos vidros refletivos usados em suas composições;
- (f) os vidros refletivos pirolíticos verde, bronze e cinza-fumê, devido à menor Tv do vidro-base colorido, têm um padrão de variação semelhante ao vidro colorido comum, enquanto o pirolítico prata varia de acordo com seu vidro-base incolor;
- (g) os vidros refletivos a vácuo, Cebrace ou Guardian, têm comportamentos diferenciados de variação de Tv, adotando-se padrões próprios de referência para cada um dos fabricantes;
- (h) películas comuns têm comportamentos de variação do valor de Tv similares aos do vidro incolor usado como substrato;
- (i) películas refletivas comportam-se de modo semelhante ao vidro comum incolor, mas é conveniente a adoção de um material de referência próprio, mais fiel ao comportamento desse grupo de materiais;
- (j) assim como os vidros comuns, os policarbonatos e o acrílico também se dividem entre aqueles que absorvem menos, caso dos policarbonatos incolor, verde e azul e do acrílico

incolor, com padrão similar ao vidro comum incolor, e os que absorvem mais, como os policarbonatos bronze e cinza-fumê, que seguem o padrão do vidro comum colorido; e

(k) assim, entre os 60 materiais ensaiados, foram identificados sete grupos de padrões de variação de Tv com o ângulo de incidência:

Grupo 1: vidro comum incolor, vidro refletivo pirolítico prata, películas comuns, policarbonato claro (incolor, verde e azul) e acrílico incolor;

Grupo 2: vidro comum colorido, refletivo pirolítico escuro (verde, bronze e cinza) e policarbonato escuro (bronze e cinza-fumê);

Grupo 3: vidro laminado claro (incolor, verde e azul-claro);

Grupo 4: demais vidros laminados;

Grupo 5: vidro refletivo a vácuo Cebrace;

Grupo 6: vidro refletivo a vácuo Guardian; e

Grupo 7: películas refletivas.

Os vidros laminados refletivos pertencem ao mesmo grupo do vidro refletivo utilizado em sua composição.

Na definição do material de referência de cada grupo, embora pudesse ser utilizado um dos materiais componentes do grupo, foi adotado um material hipotético de referência, com valores de Tv obtidos a partir dos valores médios para cada ângulo da TvRel de todos os materiais do grupo. Sendo a TvRel calculada como a divisão entre a Tv de cada ângulo e a do ângulo normal, esse procedimento ofereceu as seguintes vantagens:

(a) adoção de curvas de variação de Tv mais representativas, por apresentarem os valores médios de TvRel de diversos materiais com comportamentos semelhantes. Cada material de referência terá valores da Tv com valor máximo de um (1) para incidência normal e mínimo de zero para incidência a  $90^\circ$ ;

(b) o valor 1 simplifica o cálculo do coeficiente de correção para outro material qualquer, pois iguala seu valor à Tv do material qualquer para incidência normal. Esse recurso possibilita o cálculo da Tv para qualquer ângulo e para qualquer material do qual se conheçam apenas a Tv para incidência normal e o grupo do qual faz parte.

Na Tabela 1 é apresentado um exemplo do procedimento para caracterização do material de referência do Grupo 1.

A Tabela 2 indica os valores médios da TvRel para cada grupo, que passam a ser os valores da Tv do material hipotético adotado como referência.

Ângulo	Comum Incolor	Pirólítico Prata	Policarbonatos			Acrílico Incolor	Películas Comuns						TvRel Média	
			Incolor	Verde	Azul		Fumê G20	Fumê G50	Museum	Violeta	Bronze	Verde		
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1	1	0,99	0,97	1	<b>0,99</b>	
30	0,98	0,98	0,98	0,96	0,97	0,97	0,98	0,99	1	0,96	0,95	0,99	<b>0,98</b>	
40	0,96	0,97	0,95	0,94	0,94	0,95	0,93	0,96	0,98	0,91	0,90	0,93	<b>0,95</b>	
50	0,90	0,94	0,89	0,88	0,88	0,90	0,85	0,91	0,93	0,91	0,86	0,88	<b>0,90</b>	
60	0,84	0,89	0,82	0,79	0,81	0,80	0,78	0,86	0,85	0,84	0,79	0,86	<b>0,83</b>	
70	0,70	0,74	0,67	0,64	0,64	0,66	0,62	0,69	0,69	0,68	0,65	0,67	<b>0,67</b>	
80	0,41	0,44	0,41	0,39	0,40	0,42	0,37	0,43	0,43	0,41	0,39	0,39	<b>0,41</b>	

Tabela 1 - Valores de TvRel e TvRel média para os materiais transparentes do Grupo 1

Âng	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
0	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1
20	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,96	1
30	0,98	0,95	0,96	0,94	0,94	0,91	0,96
40	0,95	0,89	0,93	0,90	0,91	0,88	0,92
50	0,90	0,81	0,88	0,81	0,81	0,79	0,88
60	0,83	0,70	0,80	0,69	0,72	0,68	0,80
70	0,67	0,58	0,61	0,48	0,61	0,53	0,68
80	0,41	0,29	0,28	0,18	0,36	0,23	0,47

Tabela 2 - Valores médios da transmitância da luz visível (Tv) de cada grupo

A divisão dos 60 materiais ensaiados em sete grupos busca aumentar a precisão do modelo, pois reúne em grupos materiais que têm comportamento semelhante de variação da transmitância da luz visível com o ângulo. Observa-se na Tabela 2 que, principalmente nos ângulos acima de 50°, ocorrem diferenças expressivas entre os valores de Tv dos diferentes grupos, com diferenças máximas de 11% (50°), 15% (60°), 20% (70°) e 29% (80°). Portanto, o nível maior de precisão na consideração de diferentes grupos em um processo de cálculo é função dos ângulos de incidência envolvidos.

A Figura 11 apresenta a variação da Tv dos materiais de referência de cada grupo em função do ângulo de incidência.

Com base nos valores observados (Tabela 2) e através de análise de regressão, foi obtida uma equação genérica (Equação 1), que define a variação da Tv dos materiais de referência dos diferentes grupos em função do ângulo de incidência, sendo “A” o ângulo de incidência em radianos, e “b” e “c” os parâmetros das curvas de regressão apresentados da Tabela 3.

$$Tv = [\cos(A)]^{b(A^c)} \quad (1)$$

A Equação 1 reproduz com boa aproximação os valores medidos das transmitâncias dos 60 materiais para ângulos variados. Conforme indica a Figura 12, a comparação entre 600 valores calculados e medidos apresenta coeficiente de correlação de 0,996 e desvio padrão de 0,027.



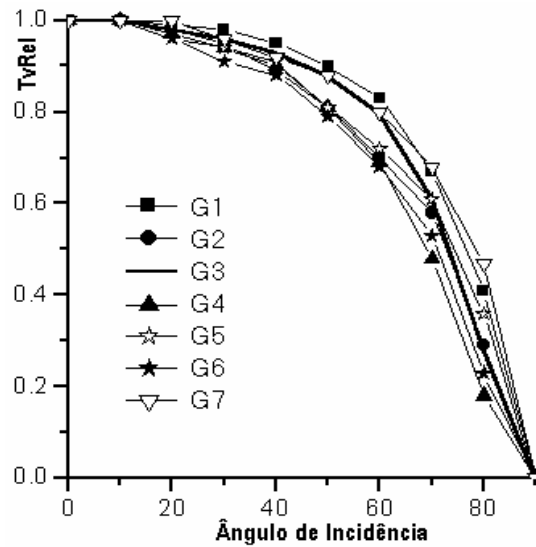


Figura 11 - Curvas de variação da transmitância da luz visível (Tv) dos materiais de referência de cada grupo

Grupo	b	c
1	0,243	2,216
2	0,515	0,568
3	0,357	1,553
4	0,552	1,072
5	0,459	0,719
6	0,549	0,375
7	0,324	0,856

Tabela 3 - Parâmetros para o cálculo da Tv dos materiais de referência, conforme a Equação 1

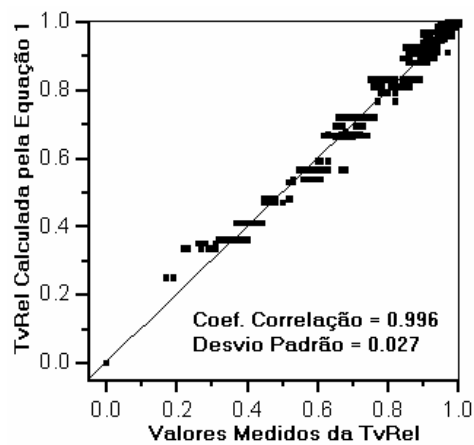


Figura 12 - Correlação entre valores da Tv medidos e calculados pela Equação 1

## Valores da transmitância da luz visível para incidência normal (T<sub>vn</sub>)

Com a utilização da Equação 1 é possível o cálculo da transmitância da luz visível (T<sub>v</sub>) para qualquer ângulo de incidência da radiação solar sobre o material transparente de referência de cada grupo, o que possibilita o cálculo de ganhos de luz natural através desses materiais, considerando o ângulo real de incidência da luz. Para obterem-se os ganhos para outro material qualquer, é necessário o conhecimento de a qual grupo o mesmo pertence e do valor da transmitância para incidência normal.

O número de amostras ensaiadas para a obtenção dos dados deste trabalho é reduzido ante o grande número de opções de materiais transparentes existentes no mercado. Essa diversidade, no entanto, está baseada, principalmente, em variações de espessura, em diferentes combinações entre o material-base e a camada de tratamento superficial ou o tipo de película aderida, ou, ainda, em composições laminadas e de caixilhos múltiplos, que têm origem, em grande parte, nos materiais ensaiados neste trabalho.

As Tabelas 4 a 8 apresentam os valores obtidos de transmitância da luz visível para incidência normal (T<sub>vn</sub>) para diferentes materiais transparentes, e o grupo a que os mesmos pertencem.

A Tabela 4 apresenta os valores de T<sub>vn</sub> para os materiais homogêneos, vidros comuns, policarbonatos e o acrílico incolor.

Na Tabela 5 estão os dados de T<sub>vn</sub> para materiais transparentes com camada metalizada (vidros refletivos) ou película de proteção solar aderida. Dentro desse grupo de materiais, os vidros com tratamento superficial pirolítico foram analisados para diferentes espessuras de seus respectivos

vidros-base, e os vidros com o tratamento refletivo a vácuo ou com películas foram analisados em conjunto com diferentes espessuras de lâminas de vidro-base incolor.

Na Tabela 6 são apresentados os valores de T<sub>vn</sub> dos vidros laminados compostos de duas lâminas de vidro comum, incolor ou colorido, e com a película interna incolor. Os resultados obtidos indicam que, no caso em que ambas as lâminas de vidros são de mesma coloração, os valores somente dependem da espessura total do conjunto do vidro laminado, independentemente da ordem da espessura individual das lâminas que o compõem.

A Tabela 7 apresenta valores para o caso de lâminas de vidro de cores diferentes (vidro misto), sendo analisados os conjuntos com uma lâmina de vidro colorida e a outra incolor, com a película interna incolor. Nesse caso, mantendo-se as respectivas espessuras de cada lâmina, os valores resultantes praticamente independem da ordem das lâminas.

Na Tabela 8 são apresentados os valores para os vidros laminados compostos de duas lâminas de vidro incolor com a película de butiral colorida. Esses valores são específicos para as películas ensaiadas, pois a camada de butiral interior colorida possui um número muito grande de variações, com a combinação das diferentes cores dela, devendo os dados das características óticas resultantes para as películas em cada caso de combinação ser obtidos por ensaios, ou fornecidos pelo produtor da película. Esses dados devem ser fornecidos para a película no interior do conjunto do vidro, ou considerando-se dessa maneira.

Em todas as composições de vidros laminados estudadas é considerada limitação de fabricação de que a relação entre a maior espessura e a menor não deve ultrapassar 1,5. Essa limitação é para evitar quebras que podem ocorrer na autoclavagem.

	Espessura	GRUPO	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm
	COR		T <sub>vn</sub>	T <sub>vn</sub>	T <sub>vn</sub>	T <sub>vn</sub>	T <sub>vn</sub>
Vidros comuns	Incolor	1	0,88	0,87	0,85	0,84	0,83
	Verde	2	0,81	0,74	0,67	0,61	0,55
	Bronze	2	0,74	0,61	0,50	0,42	0,34
	Cinza	2	0,71	0,56	0,45	0,36	0,28
	Azul	2	0,73	0,60	0,50	0,41	0,33
Policarbonatos	Incolor	1	0,86	0,85	0,83	0,82	0,81
	Verde	1	0,79	0,71	0,65	0,58	0,53
	Bronze	2	0,70	0,56	0,45	0,36	0,29
	Cinza	2	0,56	0,36	0,23	0,15	0,10
	Azul	1	0,79	0,72	0,66	0,60	0,55
Acrílico Incolor		1	0,88	0,88	0,88	0,88	0,87

Tabela 4 - Valores de T<sub>vn</sub> de materiais homogêneos - vidros comuns, policarbonatos e acrílico

TIPO VIDRO-BASE	Tratamento Superficial	GRUPO	ESPESSURA DO VIDRO BASE			
			2 mm	4 mm	6 mm	8 mm
			Tvn	Tvn	Tvn	Tvn
Vidro comum incolor	Rp Prata	1	0,42	0,41	0,41	0,40
	Rv Prata neutro	3	0,19	0,19	0,19	0,18
	Rv Prata médio	3	0,14	0,14	0,14	0,13
	Rv Prata escuro	3	0,06	0,06	0,06	0,06
	Rv Bronze neutro	3	0,18	0,18	0,18	0,17
	Rv Bronze médio	3	0,14	0,14	0,14	0,14
	Rv Bronze escuro	3	0,07	0,07	0,07	0,07
	Rv Azul neutro	3	0,40	0,39	0,39	0,38
	Rv Azul médio	3	0,29	0,29	0,28	0,28
	Rv Azul escuro	3	0,19	0,19	0,19	0,18
	Rv Az int médio	3	0,20	0,20	0,20	0,19
	Rv Az int médio	3	0,14	0,14	0,14	0,14
	Rv Az int escuro	3	0,08	0,08	0,08	0,07
	Pe Fumê G20	1	0,27	0,27	0,27	0,26
	Pe Fumê G35	1	0,39	0,39	0,38	0,37
	Pe Fumê G50	1	0,52	0,51	0,50	0,50
	Pe Fumê G75	1	0,70	0,69	0,68	0,66
	Pe Museum	1	0,82	0,80	0,79	0,78
	PeVioleta	1	0,21	0,21	0,21	0,20
	Pe Bronze	1	0,22	0,21	0,21	0,21
	PeVerde	1	0,30	0,29	0,29	0,28
	PeR Prata	7	0,28	0,28	0,27	0,27
	PeR Fumê	7	0,09	0,09	0,09	0,09
	PeR Bronze	7	0,10	0,10	0,10	0,10
	PeR Verde	7	0,10	0,10	0,10	0,10
PeR Ouro	7	0,14	0,14	0,14	0,14	
PeR Azul	7	0,13	0,13	0,13	0,12	
VERDE	Rp Verde	2	0,39	0,36	0,32	0,29
BRONZE	Rp Bronze	2	0,39	0,33	0,27	0,22
C.FUMÊ	Rp Fume	2	0,39	0,31	0,25	0,20

Tabela 5 - Valores de Tvn para materiais transparentes com camada superficial metalizada ou película de proteção solar aderida

Espessura Total	GRUPO	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm
		Tvn	Tvn	Tvn	Tvn
VIDRO COMUM					
Incolor	3	0,84	0,83	0,82	0,80
Verde	4	0,66	0,60	0,54	0,49
Bronze	4	0,50	0,41	0,34	0,28
Cinza-Fumê	4	0,44	0,35	0,28	0,22
Azul	4	0,49	0,40	0,33	0,27

Tabela 6 - Valores de Tvn para vidros laminados compostos de duas lâminas de vidro comum de mesma coloração e a película de butiral incolor

VIDRO COLORIDO	GRUPO	ESPESSURA VIDRO COLORIDO	ESPESSURA VIDRO COMUM INCOLOR		
			4 cm	6 cm	8cm
			Tvn	Tvn	Tvn
VERDE	4	3	0,74		
		4	0,70	0,69	
		6	0,64	0,63	0,62
BRONZE	4	3	0,65		
		4	0,58	0,57	
		6	0,48	0,48	0,47
CINZA FUMÊ	4	3	0,61		
		4	0,54	0,53	
		6	0,43	0,42	0,53
AZUL	4	3	0,64		
		4	0,58	0,57	
		6	0,47	0,47	0,56

Tabela 7 - Valores de Tvn para vidros laminados compostos de uma lâmina de vidro comum incolor e outra de vidro colorido, com a película de butiral incolor

Espeçura Total	GRUPO	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm
Película		Tvn	Tvn	Tvn	Tvn
Verde	3	0,66	0,65	0,64	0,63
Bronze-claro	4	0,53	0,52	0,52	0,51
Bronze-escuro	4	0,29	0,29	0,28	0,28
Fume	4	0,45	0,45	0,44	0,43
Azul-claro	3	0,77	0,76	0,75	0,74
Rosa	4	0,53	0,52	0,52	0,51
Azul-escuro	4	0,48	0,47	0,46	0,46

Tabela 8 - Valores de Tvn para vidros laminados compostos de duas lâminas de vidro comum incolor e a película de butiral colorida

Os valores de Tvn para materiais com espessuras intermediárias entre as que constam nas tabelas podem ser obtidos por interpolação entre os valores existentes.

Para os materiais não apresentados nessas tabelas pode ser adotado o valor da transmitância da luz visível para incidência normal apresentado na literatura ou fornecido pelos fabricantes.

## Conclusões

Foi aqui apresentado um método para facilitar a consideração do ângulo de incidência da luz no cálculo de ganhos de luz natural através de materiais transparentes. Esse método é particularmente inovador pela identificação de grupos de materiais transparentes com comportamento semelhante de variação da transmitância da luz visível (Tv) com o ângulo de

incidência. A média de comportamento dessa variação para os materiais do grupo define a curva de variação de Tv para um material hipotético de referência de cada grupo.

A análise de regressão dessas curvas gerou uma equação genérica, com parâmetros específicos para cada grupo, a qual possibilita obter, para todos os materiais de referência, os valores de Tv para qualquer ângulo de incidência. Os valores de Tv para determinado material são obtidos, para qualquer ângulo, pela multiplicação do valor de sua transmitância da luz visível para incidência normal (Tvn) pelo valor da Tv, para o ângulo desejado, do material de referência do grupo a que ele pertence.

A definição de curvas de referência da variação da Tv com o ângulo de incidência minimiza a necessidade de ensaios necessários à caracterização de determinado material

transparente, que esteja enquadrado dentro dos grupos estabelecidos, o que permite a obtenção do valor da  $T_v$ , para ângulos variados de incidência, de inúmeras opções de espessuras e composições de materiais transparentes, bastando saber-se a que grupo pertencem e obtendo-se por cálculo, ensaio ou na literatura especializada o valor da  $T_v$  para a incidência normal.

A classificação dentro de um dos sete grupos, de um material diferente dos aqui mencionados, é feita observando-se o seu processo de fabricação, os materiais que o compõem e a tonalidade da sua cor.

A influência da consideração do ângulo de incidência no valor de  $T_v$  no cálculo de disponibilidade de luz natural está relacionada diretamente a dois fatores: ao ângulo de incidência da luz proveniente da abóbada celeste, que depende da posição do ponto considerado dentro do ambiente; e às luminâncias das parcelas de céu visíveis a partir do ponto, definidas pela posição do ponto, local, tipo de céu, dia do ano e horário do dia.

## Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM Standards. **E892-87**. Standard Tables for Terrestrial Solar Spectral Irradiance at Air Mass 1.5 for a 37° Tilted Surface, 1987.

ANDRADE, M. S. STÜRMER. **Avaliação dos métodos de cálculo de iluminação natural através de aberturas zenitais**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

PFROMMER, P.; LOMAS, K. L.; SEALE, C.; KUPKE C. The radiation transfer through coated and tinted glazing. **Solar Energy**, v. 54, n. 5, p. 287-99, 1995.

SANTOS, J. C. P. **Avaliação do desempenho térmico e visual de materiais transparentes frente à radiação solar**. 2002. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.