

COMPORTAMENTO ÓPTICO DE VIDROS E PELÍCULAS DE PROTEÇÃO SOLAR E SUA RELAÇÃO COM O CONFORTO AMBIENTAL

OPTICAL BEHAVIOR OF GLASSES AND SUN PROTECTION FILMS
AND THEIR RELATIONSHIP WITH ENVIRONMENTAL COMFORT

Regis de Castro Ferreira

Engenheiro Agrônomo. Professor Associado da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás (UFG) – Goiânia (GO), Brasil.

Elza Glauce Pereira da Silva Alves

Engenheira Civil. Mestre em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da UFG – Goiânia (GO), Brasil.

Endereço para correspondência:

Regis de Castro Ferreira –
Universidade Federal de Goiás,
Escola de Agronomia – Avenida
Esperança, s/n – Campus
Samambaia – 74690-900 – Goiânia
(GO), Brasil – E-mail: rcastro@ufg.br

RESUMO

Superfícies transparentes merecem especial atenção quando se trata do conforto ambiental de edificações, pois são elementos vulneráveis a ganhos de calor, principalmente em regiões tropicais. O presente trabalho teve como objetivo propor indicativos para o emprego apropriado de vidros e películas de proteção solar para sua correta especificação, visando menor consumo energético e melhor conforto ambiental em edificações. Para tal, foram avaliadas as propriedades espectrais de vidros e películas por técnica espectrofotométrica e determinados os parâmetros de controle de ganho de carga térmica, a saber: fator solar (FS), ganho de calor solar (GCS), razão visível/infravermelho e coeficiente de sombreamento (CS). Os resultados mostraram que, para a correta escolha e especificação das superfícies transparentes, deve ser analisado o parâmetro GCS. Sugere-se, ainda, associar à essa análise valores de transmissão (τ) no espectro visível acima de 30%.

Palavras-chave: fechamentos transparentes; ganho de carga térmica; eficiência energética.

ABSTRACT

Transparent surfaces deserve special attention when it concerns the environmental comfort of buildings, since these elements are vulnerable to heat gains, mainly in tropical regions. The spectral properties of glasses and solar films were analyzed using the spectrophotometric technique. From the experimental data and from the established conditions of the thermal charge for tropical latitudes, we determined the gain control parameters for solar heat of transparent surfaces, such as: solar factor (SF), solar heat gain (SHG), visible/infra-red ratio and shading coefficient (SC). This study aimed to propose indicatives for the appropriate use of glazing and solar protection films for correct specification, targeting the lower energy consumption and better environmental comfort in buildings. From the analysis of the results, we proposed indicatives for the appropriate employment of the transparent surfaces analyzed for their correct specification, in order to achieve smaller energy consumption and better thermal comfort.

Keywords: transparent closings; thermal load gain; energy efficiency.

INTRODUÇÃO

Envelopes de construções altamente envidraçadas se tornaram muito populares entre os arquitetos e as empresas de construção ao longo das últimas décadas, e fachadas transparentes têm sido amplamente adotadas em diferentes tipos de edifícios, independentemente da tipologia climática local. Como consequência, a eficiência energética e o conforto ambiental internos são deficientes nesses edifícios. Superaquecimento no verão e perda excessiva de energia no inverno, bem como desconforto térmico e reclamações, pelos ocupantes, acerca de brilho, são alguns dos problemas que são frequentemente encontrados (GOIA; PERINO; SERRA, 2013; OU, 2014).

Em regiões de clima quente, o principal problema das fachadas envidraçadas é o aquecimento das edificações devido ao ganho excessivo de carga térmica decorrente da incidência da radiação solar (CETINER & ÖZKAN, 2005). Esta caracteriza-se pela transferência de energia por meio de ondas eletromagnéticas emitidas pelo Sol, da qual uma parte é interceptada pelo sistema Terra-atmosfera e convertida em outras formas de energia, como, por exemplo, calor e energia cinética da circulação atmosférica (PINATTI & SICHIERI, 1999). A quantidade de radiação solar que atinge a camada da atmosfera é, em média, de 1.353 W/m^2 (constante solar).

Embora a atmosfera seja muito transparente à radiação solar incidente, somente cerca de 25% penetra diretamente na superfície da Terra sem nenhuma interferência da atmosfera, constituindo a radiação direta. O restante é ou refletido de volta para o espaço, absorvido ou espalhado em volta até atingir a superfície da Terra ou retornar ao espaço (Figura 1). Assim sendo, o que determina se a radiação será espalhada, absorvida ou refletida de volta depende, em grande parte, do comprimento de onda da energia que está sendo transportada, assim como do tamanho e da natureza do material que intervém. O espalhamento constitui-se na dispersão da radiação em todas as direções — para cima, para baixo e para os lados. A reflexão (ρ) é um caso particular de espalhamento. A radiação difusa é constituída de radiação solar, que é espalhada ou refletida de volta para a Terra, sendo responsável pela claridade do céu durante o dia e pela iluminação de áreas que não recebem iluminação direta do Sol. Por outro lado, é pela absorção (α) que a radiação é convertida em calor. Já o espalhamento e a ρ simplesmente mudam a direção da radiação (GRIM, 2015).

A Figura 2 mostra o espectro da radiação solar que atinge a superfície da Terra para o caso do Sol no zênite (altura=90°) (curva inferior), com o espectro da radiação solar incidente no topo da atmosfera (curva superior). A área entre as duas curvas representa a diminuição da radiação devido a:

1. retroespalhamento e α por nuvens e aerossóis e retroespalhamento por moléculas do ar (área não sombreada);
2. α por moléculas do ar (área sombreada).

Devido às superfícies envidraçadas serem transparentes à radiação solar (ondas curtas) e opacas à radiação infravermelha (ondas longas), estas causam aquecimento com consequências imediatas: o desconforto dos usuários e a intensificação do consumo de energia elétrica para o condicionamento artificial do ambiente. A identificação de tais problemas gerou a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias de produção de vidros especiais e películas de proteção solar que buscam os componentes perfeitos: alta transmissão (τ) luminosa (espectro visível); baixa τ de calor (espectro do infravermelho); baixa τ de ultravioleta (UV) (Figura 3), cujo objetivo é buscar a melhoria da eficiência energética (ALUCCI, 2005).

Segundo Ou (2014), outra questão que merece destaque é o problema decorrente de o fluxo energético ser refletido diretamente na cidade. Apesar de os vidros reflexivos impedirem que boa parte da radiação solar atinja o ambiente interno, essa energia refletida pode convergir para o espaço urbano onde a população vive e perturbar a visão humana pelo efeito de mascaramento visual, principalmente em motoristas.

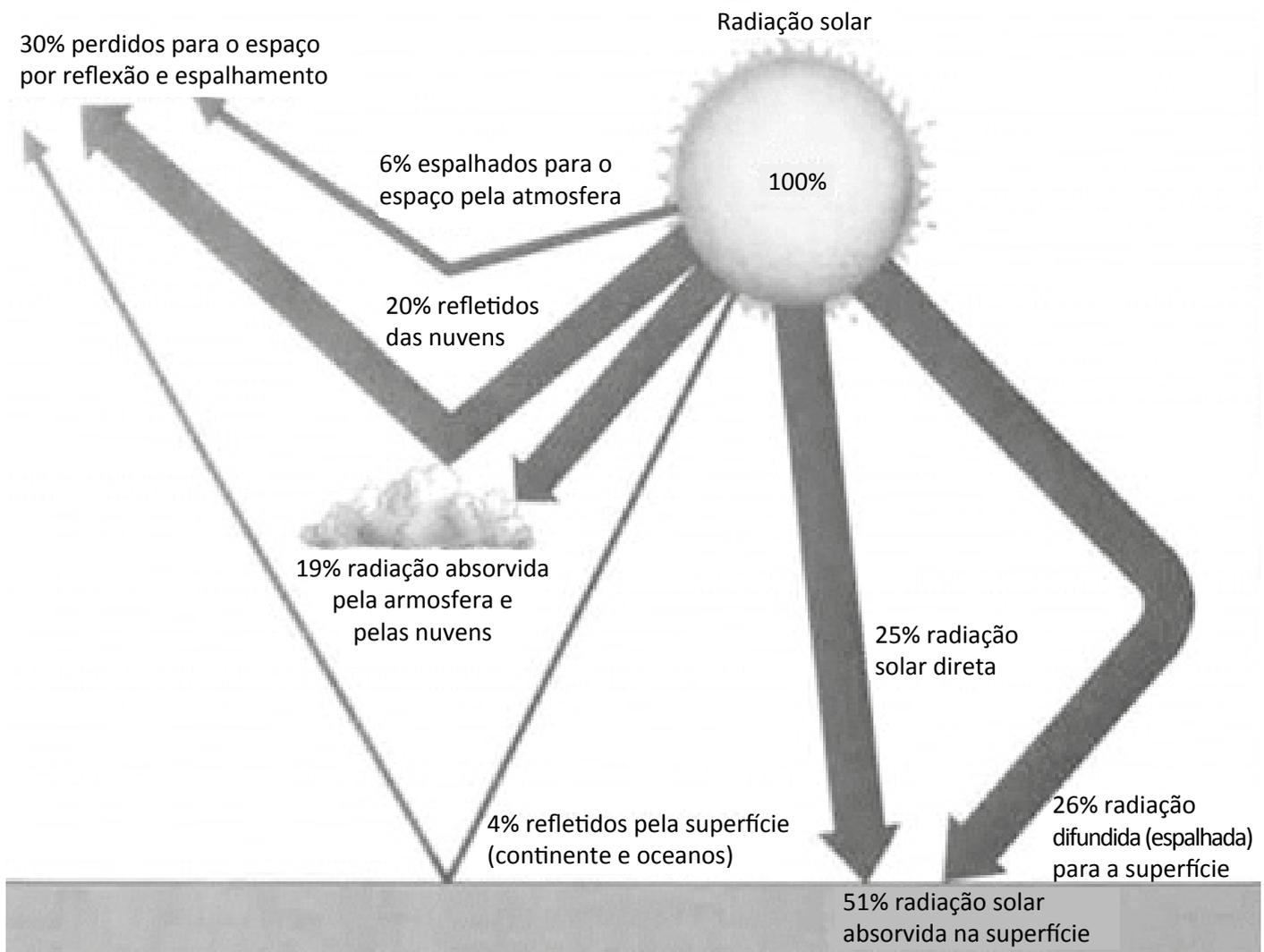
Com o surgimento e desenvolvimento da indústria energética no final do século dezenove, teve início uma significativa alteração das técnicas de projeto e construção das edificações, da postura diante da problemática da adaptação climática. Padrões arquitetônicos foram drasticamente alterados pela possibilidade do uso de energia elétrica para climatização e iluminação (SHALDERS, 2003). Quando se fala em eficiência energética de uma edificação, a busca do conforto térmico é o fator que gera maior demanda do consumo energético e o vidro é o elemento construtivo responsável pelos maiores índices de τ de energia solar (Figura 3). As superfícies transparentes merecem especial atenção quando

se trata do conforto térmico de edificações, pois são elementos vulneráveis a um ganho de calor, principalmente em locais de alta densidade de radiação solar incidente, como é o caso do município de Goiânia (GO).

Algumas variáveis de projeto, tais como a orientação geográfica e as características ópticas dos materiais especificados (vidros), podem, quando mal implantadas, implicar em significativo acúmulo de densidade de energia no interior das edificações, traduzindo-se em desconforto térmico e/ou visual para os usuários. Consideradas como elemento crítico por muitos pesquisadores (JORGE, 1996; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2004; GHISI; TINKER; IBRAHIM, 2005), as aberturas com seus fechamentos transparentes contribuem para

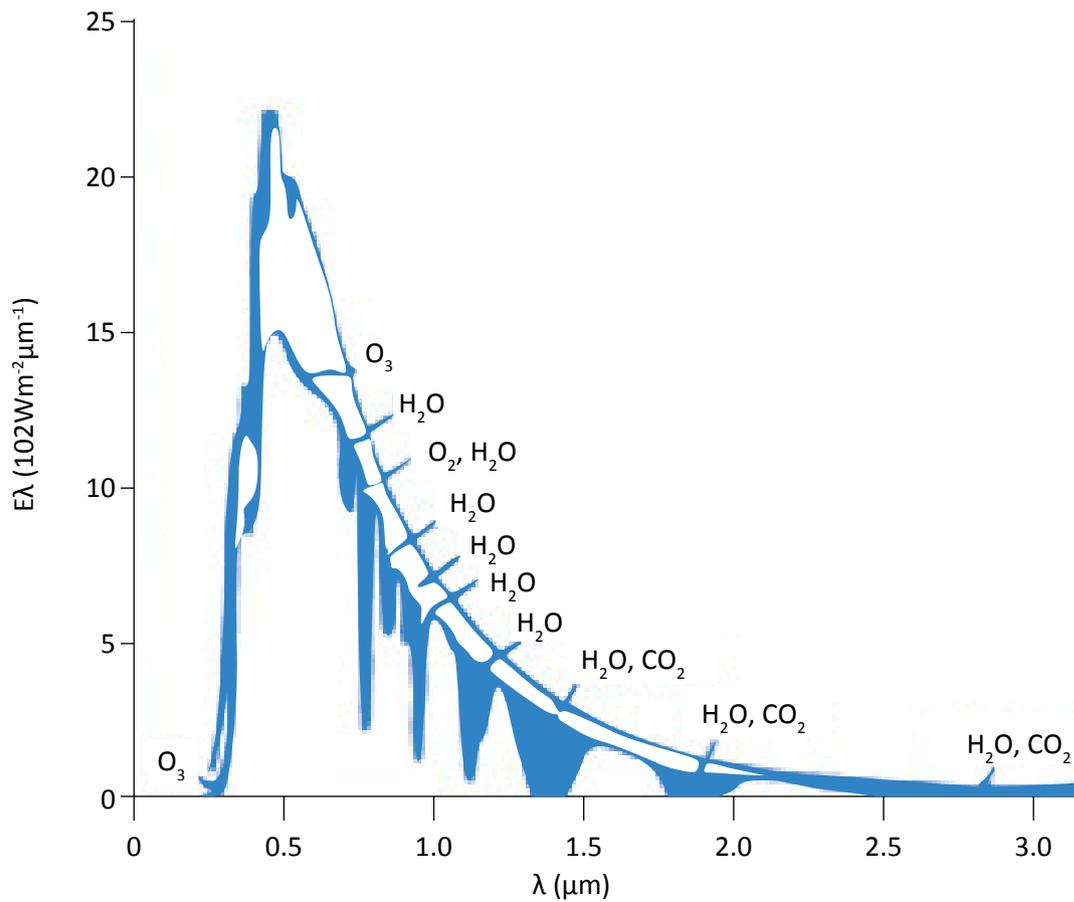
as trocas de energia entre os meios externo e interno da edificação. O ganho de calor ocorre, como visto, pelos mecanismos da radiação direta, difusa e emitida pelo entorno.

Mesmo com o clima pouco favorável ao emprego de fachadas de vidro em regiões tropicais, observa-se seu uso frequente. Assim, torna-se pertinente o estudo das características ópticas dos vidros e das películas de proteção solar utilizados na construção civil, para a correta especificação dos produtos mais adequados para o clima dessas regiões. Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi o de estudar as características ópticas dos vidros e das películas de proteção solar, a fim de fornecer subsídios e indicati-



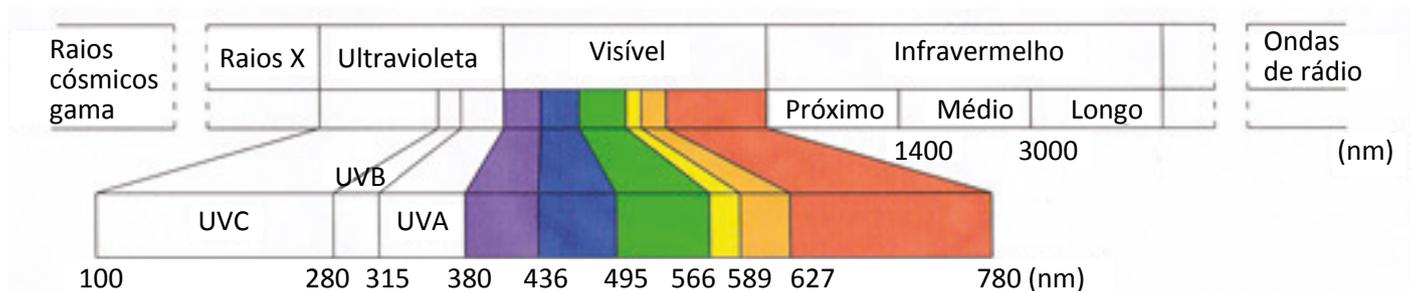
FONTE: GRIM (2015).

Figura 1 – Distribuição percentual da radiação solar incidente.



FONTE: GRIM (2015).

Figura 2 – Espectro da radiação solar no topo da atmosfera (curva superior) e no nível do mar (curva inferior), para atmosfera média e sol no zênite.



FONTE: PEREIRA (2007).

Figura 3 – O espectro eletromagnético.

vos para o seu apropriado emprego, quando se fizer necessária a sua especificação, tendo como premissa

o conforto ambiental e a eficiência energética do ambiente construído.

MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras

As amostras foram separadas em grupos por tipo de material. A Tabela 1 relaciona os dados dos vidros e das películas de proteção solar analisados neste estudo.

Os vidros laminados são comercializados com os termos 108, 114 e 120, valores estes especificados pelos

fabricantes. Os números 8, 14 e 20 representam as porcentagens de luz (visível) que devem ser transmitidas por esses vidros, ou seja, espera-se que esses vidros transmitam no espectro visível (Figura 3) 8, 14 e 20%, respectivamente. Esse termo é conhecido como Índice de Controle de Radiação Solar.

Tabela 1 – Descrição dos vidros e películas estudados.

Tipo de material	Código da amostra	Denominação comercial	Cor	Espessura vidro (mm)
Vidro incolor	VI 3 mm	Comum	Incolor	3
Vidro laminado	LM-01	BS 108	Ouro	3+3
	LM-02	114 VI	Verde	3+3
	LM-03	114 AI	Verde	3+4
	LM-04	120 VI	Verde	4+4
	LM-05	Antélio	Bronze	4+4
Vidro refletivo	RF-01	CEB 120	Azul	4
	RF-02	CEB 130	Bronze	4
	RF-03	CEB 140	Cobre	4
Película de privacidade	PP-01	Intercontrol	G5 – Azul	4
	PP-02	Sun Tek	G5 – Fumê	4
	PP-03	Intercontrol	G20 – Azul	4
	PP-04	Sun Tek	G 20 – Fumê	4
	PP-05	Solar Gard	G20 – Fumê	4
Película refletiva	PR-01	Intercontrol	Fumê	4
	PR-02	Sun Control	Fumê	4
	PR-03	Intercontrol	Prata	4
	PR-04	Sun Control	Prata	4
	PR-05	Solar Gard	Prata	4
	PR-06	Intercontrol	Bronze	4
	PR-07	Solar Gard	Bronze	4

AS PELÍCULAS POSSUEM ESPESSURA DE 0,03 MM, APLICADAS EM VIDROS INCOLORES.

Análise espectrofotométrica

Na análise espectrofotométrica o equipamento fornece como resultados as porcentagens de τ , ρ e α . Os espectrofotômetros possuem microcomputador eletrônico embutido, que facilita a operação, a obtenção dos resultados e a troca automática das lâmpadas durante a operação de medição. Todas as amostras foram ensaiadas no intervalo de comprimento de onda entre 290 e 1.800 nm, seguindo os procedimentos da *American Society for Testing Materials* (ASTM, 2012). Essa norma indica um intervalo de ensaio aproximado em torno de 300 a 2.500 nm. Devido à falta de disponibilidade de equipamento que cobrisse todo esse espectro na época dos ensaios e tendo em vista que os comprimentos de ondas superiores a esses valores atingem de forma bastante reduzida a superfície terrestre, pois são absorvidos pelos vapores de água e dióxidos de carbono presentes na atmosfera, assumiu-se o intervalo de 290 a 1.800 nm para as análises. Por outro lado, os comprimentos de ondas inferiores a 290 nm são absorvidos pela camada de ozônio existente na atmosfera. Foram feitas subdivisões, caracterizando as regiões do UV (290 a 380 nm), do visível (380 a 780 nm) e do infravermelho (780 a 1.800 nm). Devido à referida disponibilidade dos equipamentos e à limitação destes em cobrir toda a faixa do espectro desejada, as análises espectrofotométricas desenvolveram-se em três etapas: primeira etapa — foi analisada a transmitância (modo τ) em espectrofotômetro pertencente ao Centro de Pesquisas em Alimentos

(CPA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), em Goiânia, modelo Lambda 25, marca Perkin Elmer, cuja leitura limita-se a 1.100 nm. Portanto, o espectro lido foi de 290 a 1.100 nm; segunda etapa — foram realizadas análises espectrofotométricas de transmitância, em espectrofotômetro do Laboratório Nacional do Ministério da Agricultura em Goiás (LANAGRO), Goiânia, modelo Nir 900, da Femto, que permitia leituras somente a partir de 1.100 nm; assim sendo, o espectro lido foi de 1.100 a 1.800 nm; e terceira etapa — foram realizadas as análises espectrofotométricas de reflectância (modo ρ) no Instituto de Física “Gleb Wataghin” da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). O aparelho utilizado foi o modelo Lambda 9, da Perkin Elmer. O intervalo de leituras foi de 290 a 1.800 nm. A utilização desse terceiro aparelho se justificou pela limitação dos demais em proceder leituras no modo ρ .

Após a preparação das amostras (corte e polimento dos vidros, e aplicação das películas nos vidros transparentes) e a regulagem do espectrofotômetro, as leituras foram obtidas em porcentagem de transmissão e reflexão. As amostras foram dispostas horizontalmente ao plano da normal (0°), com o feixe da radiação incidindo perpendicularmente às amostras. É nesta posição, ou seja, raios solares incidindo perpendicularmente à superfície, que ocorre a maior transmissão dos raios solares, situação mais crítica para a análise dos parâmetros de desempenho térmico dos vidros.

Parâmetros relacionados ao ganho de calor e ao controle solar através de fachadas transparentes

Coefficiente de α

Quando a radiação solar (I_g) incide sobre uma superfície transparente, parte dela é transmitida diretamente para o interior do ambiente, parte é refletida e parte é absorvida. Parte da radiação absorvida é reirradiada para o exterior e parte é reirradiada para o interior.

Para controlar o ganho de calor através das superfícies transparentes, as porcentagens de τ e ρ são determinadas nos ensaios espectrofotométricos e a porcentagem de α é definida por:

$$I_g = (\alpha \cdot I_g) + (\rho \cdot I_g) + (\tau \cdot I_g) \Rightarrow \alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1)$$

Razão visível/infravermelho

Segundo ASSIS (1998), o vidro ideal para situações de elevada incidência de I_g deve possuir pouca τ no espectro do infravermelho (menor que 30%) e boa τ no espectro visível (acima de 50%), assim, a autora, estabeleceu a razão visível/

infravermelho para esta análise comparativa. Sob o ponto de vista de ganho e perda de calor, devem ser levados em consideração os valores do fator solar (FS), do ganho de calor solar (GCS) e do coeficiente de sombreamento (CS).

A razão visível/infravermelho é uma relação entre a porcentagem de radiação transmitida na região do espectro visível (Vis) e na região espectro do infravermelho (IV).

$$\text{Razão Vis/IV} = \frac{\% \text{Vis}}{\% \text{IV}} \quad (2)$$

Quando as porcentagens de τ forem iguais, o coeficiente é igual a um. Se a τ do espectro visível for

Fator solar

FS é o quociente da taxa de radiação transmitida (τ) através de um componente transparente, sob determinado ângulo de incidência, mais a parcela absorvida (α) e posteriormente reirradiada para o interior, pela taxa da Ig total incidente sobre a superfície externa (ABNT, 2005a). Está relacionado à possibilidade de bloqueio dos raios solares, representando o percentual de radiação possível de ser admitida ao ambiente, quando incidir sobre o material transparente.

$$\text{F.S.} = \tau + (\alpha \cdot U \cdot R_{se}) \quad (3)$$

O R_{se} é a resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície externa de um componente que transfere calor por radiação ou convecção ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$, $R_{se} = 0,04$ ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$) (ABNT, 2005b). O R_{se} é também expresso como $1/h_e$, em que h_e é o coeficiente superficial externo de τ de calor. A transmitância térmica ou coeficiente global de τ de calor do material em estudo (U , em $\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$) quantifica a capacidade de transferência de calor através do material.

Neste estudo, o valor assumido para a transmitância térmica foi de $5,89 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Segundo Santos & Roriz (2012), no instante em que a energia solar incide sobre a superfície de um material transparente, ele passa a absorvê-la e tem a possibilidade de trocá-la instantaneamente, tanto com o exterior como com o interior, através dos processos de radiação e convecção, sendo que a energia absorvida internamente no material migra rapidamente, devido a pequena espessura, para ambas as superfícies. Para que esses dois processos ocorram, as temperaturas nas superfícies dos vidros devem ser superiores às temperaturas internas e externas dos ambientes. Sendo o vidro um material homogêneo e com espessura constante, a transmitância térmica total (U) é dada pela Equação (ABNT, 2005b):

maior, este coeficiente será maior que um. E se a τ na região do infravermelho for maior, o coeficiente será menor que um. Preconiza-se, portanto, materiais cujos índices sejam maiores que um, pois, para as condições climáticas de regiões de alta incidência da radiação solar, seria interessante admitir luz e re- futar o calor. Para completar essa análise, deve-se procurar um material que possua boa τ no espectro visível, possibilitando o aproveitamento da iluminação natural.

$$U = \frac{1}{R} \quad (4)$$

Em que: R é a resistência térmica total da lâmina, em $[(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}]$, dada pela seguinte Equação:

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e} \quad (5)$$

Em que: λ é a condutividade térmica do material ($\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$); “ e ” corresponde à espessura do material (m); h_i é o coeficiente superficial interno de τ de calor, $h_i = 7,7 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (ABNT, 2005b); h_e é o coeficiente superficial externo de τ de calor, $h_e = 25,0 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (ABNT, 2005b).

ASSIS (1998) despreza o termo (e/λ) da Equação 5, devido a pequena espessura dos vidros utilizados nas janelas, resultando em pequena resistência térmica.

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \Rightarrow R = \frac{(h_i + h_e)}{(h_i \cdot h_e)},$$

substituindo “ R ” na Equação 4, tem-se:

$$U = \frac{1}{R} \quad (4) \Rightarrow U = \frac{(h_i \cdot h_e)}{(h_i + h_e)} \Rightarrow U = \frac{(7,7 \cdot 25)}{(7,7 + 25)}, \text{ portanto,}$$

$$U = 5,89 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Ganho de calor solar

GCS (ou “q” em W/m^2), ou seja, a τ total da Ig é definida como a soma do FS e a da transferência de calor devida à diferença de temperatura entre o ar do ambiente externo e o ar do ambiente interno. Depende da intensidade de Ig incidente, que por sua vez depende da latitude do local e orientação da fachada. O GCS foi calculado mediante a Equação 6.

$$G.C.S.=FS.(I_g)+U.(t_e-t_i) \quad (6)$$

O cálculo dos ganhos de calor através de um material transparente envolve basicamente três variáveis: (a) a intensidade da Ig incidente; (b) o ângulo de incidência da radiação; e (c) o FS do elemento transparente para o ângulo de incidência no instante considerado (SANTOS & RORIZ, 2012). Frota & Schiffer (2003) especificam dados de Ig incidente sobre planos verticais e

Coefficiente de sombreamento

O coeficiente de sombreamento (CS) é definido como o quociente entre o FS do componente transparente estudado (FS_{V_e}) e o FS de um vidro incolor (FS_{V_i}) de 3 mm de espessura ($FS_{V_i}=0,87$) (ASSIS, 1998).

$$CS=FS_{V_e}/FS_{V_i} \quad (7)$$

horizontais para diferentes latitudes e orientações de fachadas. Os períodos do ano mais críticos em termos de desconforto térmico para a região do município de Goiânia (GO) são os dos equinócios (22 de setembro e 22 de março). As orientações escolhidas para a obtenção do GCS foram as leste e oeste, por serem as que contribuem para uma maior carga térmica devido à Ig para as condições geográficas do município de Goiânia (GO). Foi adotado o valor de Ig incidente de $692 W/m^2$, correspondente às médias de radiação para planos verticais com orientações leste e oeste, respectivamente, para os horários de 8h00 e 16h00 para a latitude de 17° sul (FROTA & SCHIFFER, 2003). Esses valores se aplicam para as análises de todas as amostras. Para a determinação do GCS, foram ainda simuladas situações em que a diferença entre as temperaturas externa e interna assumissem os valores de 0° , 5° , 10° e $15^\circ C$.

Os vidros com baixo CS, ou seja, vidros que promovam baixa necessidade de sombreamento, geram edifícios confortáveis térmica e energeticamente mais eficientes. No entanto, cuidados devem ser tomados, pois, geralmente, um baixo CS está associado a uma baixa transparência à luz natural. Quanto menor for o coeficiente de sombreamento, maior proteção o vidro oferece (MIANA, 2005).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As porcentagens de τ e ρ para cada intervalo do espectro de radiação incidente e os resultados dos parâmetros de controle solar por meio de fachadas transparentes para as amostras dos vidros e das películas de proteção solar ensaiados são apresentados na Tabela 2.

A τ no espectro visível pode ser interpretada dentro do intervalo proposto por ASSIS (1998), em que a τ de luz (TL) é classificada em: $TL<30\%$ — τ luminosa fraca; $30\%<TL<50\%$ — τ luminosa média; e $TL>50\%$ — τ luminosa forte.

Não foram realizados ensaios de ρ para o vidro incolor de 3 mm. O valor adotado para a ρ do vidro incolor de 3 mm foi de 5%, de acordo com Van Straaten (1997) *apud* ASSIS (1998).

De acordo com a descrição das amostras apresentada na metodologia, o vidro laminado 01 (LM-01, laminado ouro) tem fator 108 para o índice de controle da radiação solar, ou seja, 8%; o resultado encontrado na análise foi bem próximo, ou seja, um índice de 8,27%. As amostras laminadas verdes LM-02 e LM-03 são de vidros com fator 114, alcançando, respectivamente, 11,74 e 11,59% de τ no visível, valores que representam 83,85 e 82,78%, respectivamente, do que é especificado comercialmente. Já o vidro laminado verde LM-04 tem fator 120 e alcançou o valor 15,65% para o índice de controle da luz solar, esse valor representa 78,25% de sua especificação. O vidro laminado bronze LM-05 não é classificado por este fator (controle de radiação solar). Constata-se, por sua vez, que apenas o LM-01 atende ao Índice de Controle de Luz Solar especificado comercialmente.

Tabela 2 – Desempenho óptico e parâmetros de desempenho térmico produtos estudados.

Código da amostra ¹	Desempenho óptico dos produtos estudados									Parâmetros de desempenho térmico para radiação solar incidente de 700 W/m ²						
	Transmissão (%)					Reflexão (%)				Absorção total (%)	FS	CS	G.C.S. (W/m ²)			
	UV (%) 290 a 380 nm	Vis (%) 380 a 780 nm	IV (%) 780 a 1.800 nm	Total (%) 290 a 1.800 nm	Razão Vis/IV	UV (%) 290 a 380 nm	Vis (%) 380 a 780 nm	IV (%) 780 a 1.800 nm	Total (%) 290 a 1.800 nm				($\Delta t = 0^{\circ}$)	($\Delta t = 5^{\circ}$)	($\Delta t = 10^{\circ}$)	($\Delta t = 15^{\circ}$)
VI 3 mm	50,35	89,45	86,76	85,31	1,03	-	-	-	5,00	9,69	0,87	1,00	609,0	638,4	667,9	697,3
LM-01	0,05	8,22	6,30	6,43	1,31	26,53	50,03	41,99	43,20	50,37	0,18	0,21	124,6	154,0	183,5	212,9
LM-02	0,02	11,74	7,40	8,11	1,59	6,30	26,42	11,39	15,07	76,82	0,26	0,30	179,9	209,4	238,8	268,3
LM-03	0,02	11,59	7,04	7,83	1,65	6,23	26,22	12,91	16,04	76,13	0,26	0,30	179,9	209,4	238,8	268,3
LM-04	0,02	15,65	8,17	9,67	1,92	5,74	17,07	10,42	11,90	78,43	0,28	0,32	193,8	223,2	252,7	282,1
LM-05	0,05	33,49	45,28	39,46	0,74	7,17	14,16	8,03	9,60	50,94	0,51	0,59	352,9	382,4	411,8	441,3
RF-01	6,14	15,37	17,53	16,28	0,88	11,91	40,40	48,44	44,13	39,59	0,26	0,30	179,9	209,4	238,8	268,3
RF-02	8,31	30,33	22,18	23,51	1,37	17,26	20,94	16,50	17,72	58,77	0,37	0,43	256,0	285,5	314,9	344,4
RF-03	11,58	38,81	30,14	31,33	1,29	17,28	20,33	18,94	19,23	49,44	0,43	0,49	297,6	327,0	356,5	385,9
PP-01	0,39	18,43	82,54	60,66	0,22	6,24	6,39	8,58	7,86	31,48	0,68	0,78	470,6	500,0	529,5	558,9
PP-02	0,67	19,00	82,85	61,04	0,23	6,55	6,42	8,30	7,70	31,26	0,68	0,78	470,6	500,0	529,5	558,9
PP-03	0,45	32,53	80,83	63,25	0,40	6,58	6,50	8,51	7,86	28,89	0,70	0,80	484,4	513,9	543,3	572,8
PP-04	0,14	20,86	83,44	61,90	0,25	6,32	6,97	8,41	7,90	30,20	0,69	0,79	477,5	506,9	536,4	565,8
PP-05	0,26	20,08	82,50	61,06	0,24	4,73	5,44	7,64	6,88	32,06	0,69	0,79	477,5	506,9	536,4	565,8
PR-01	0,06	12,40	15,38	13,68	0,81	5,18	17,62	51,48	39,75	46,57	0,25	0,29	173,0	202,5	231,9	261,4
PR-02	0,03	8,33	13,26	11,16	0,63	5,20	15,64	55,28	41,80	47,04	0,22	0,25	152,2	181,7	211,1	240,6
PR-03	0,48	18,31	11,07	12,36	1,65	6,55	55,40	57,63	53,99	33,65	0,20	0,23	138,4	167,9	197,3	226,8
PR-04	0,37	17,34	11,05	12,08	1,57	6,07	55,42	55,57	52,58	35,34	0,20	0,23	138,4	167,9	197,3	226,8
PR-05	0,72	14,80	6,40	8,29	2,31	34,68	63,88	72,34	67,85	23,86	0,14	0,16	96,9	126,3	155,8	185,2
PR-06	0,09	9,44	16,18	13,44	0,58	4,93	13,71	49,56	37,41	49,15	0,25	0,29	173,0	202,5	231,9	261,4
PR-07	0,03	9,65	12,53	11,02	0,77	4,79	19,75	55,62	43,09	45,89	0,22	0,25	152,2	181,7	211,1	240,6

¹LM-01: LAMINADO OURO, 8% TRANSMISSÃO 6 MM; LM-02: LAMINADO VI VERDE, 14% TRANSMISSÃO 6 MM; LM-03: LAMINADO AI VERDE, 14% TRANSMISSÃO 7 MM; LM-04: LAMINADO VI VERDE, 20% TRANSMISSÃO 8 MM; LM-05: LAMINADO BRONZE (ANTÉLIO) 8 MM; RF-01: REFLETIVO AZUL, 20% TRANSMISSÃO 4 MM; RF-02: REFLETIVO COBRE, 30% TRANSMISSÃO 3 MM; RF-03: REFLETIVO COBRE, 40% TRANSMISSÃO 4 MM; PP-01: PELÍCULA DE PRIVACIDADE G5, AZUL, INTERCONTROL; PP-02: PELÍCULA DE PRIVACIDADE G5, FUMÊ, SUN TEK; PP-03: PELÍCULA DE PRIVACIDADE G20, AZUL, INTERCONTROL; PP-04: PELÍCULA DE PRIVACIDADE G20, FUMÊ, SUN TEK; PP-05: PELÍCULA DE PRIVACIDADE G20, FUMÊ, SOLAR GARD; PR-01: PELÍCULA REFLETIVA, FUMÊ, INTERCONTROL; PR-02: PELÍCULA REFLETIVA, FUMÊ, SUN CONTROL; PR-03: PELÍCULA REFLETIVA, PRATA, INTERCONTROL; PR-04: PELÍCULA REFLETIVA, PRATA, SUN CONTROL; PR-05: PELÍCULA REFLETIVA, PRATA, SOLAR GARD; PR-06: PELÍCULA REFLETIVA, BRONZE, INTERCONTROL; PR-07: PELÍCULA REFLETIVA, BRONZE, SOLAR GARD.

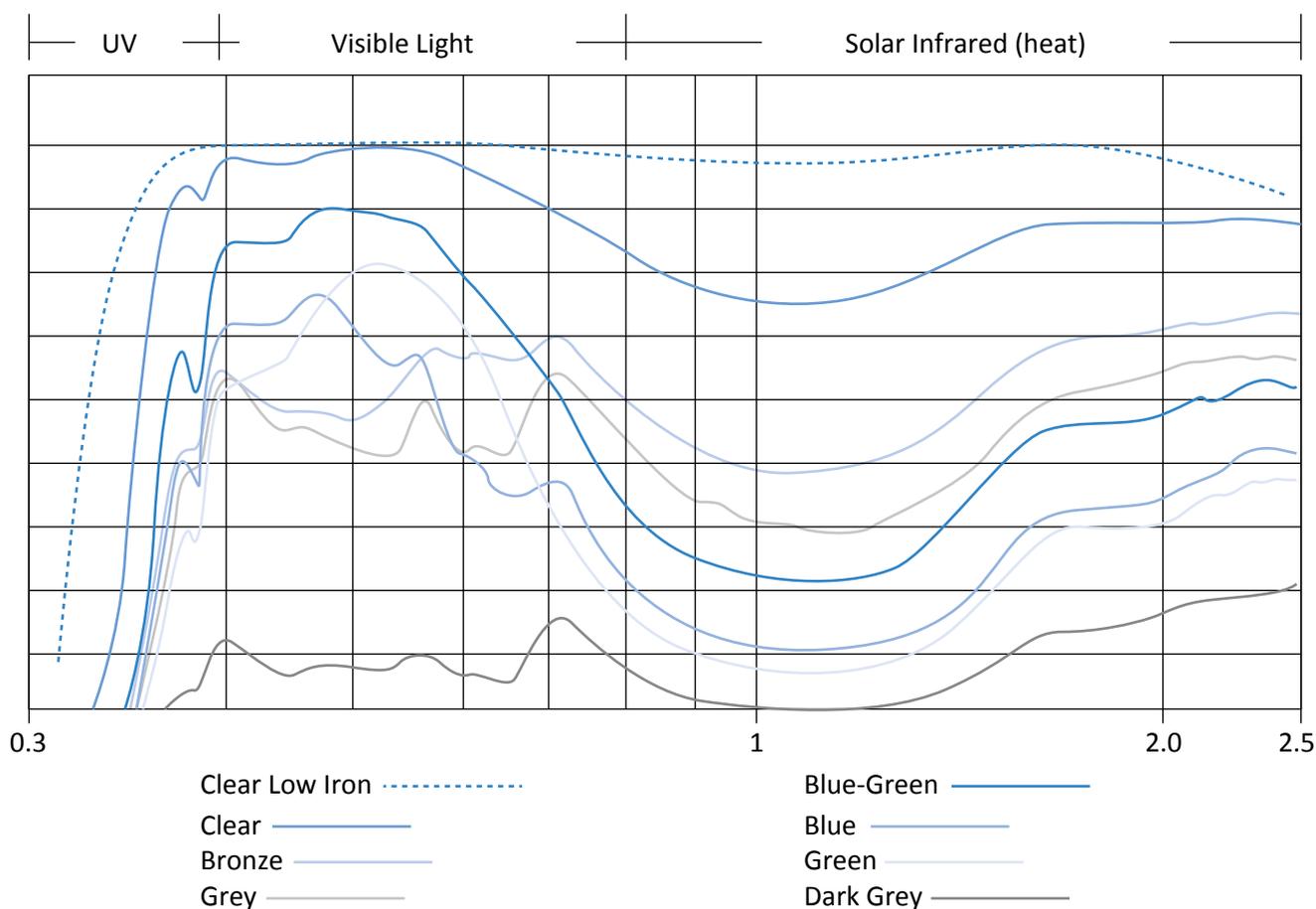
A Tabela 2 mostra que nenhum dos produtos estudados apresentou τ luminosa dentro do espectro visível considerada forte ($TL > 50\%$), conforme ASSIS (1998). Apenas 4 das 20 amostras promoveram τ considerada média no espectro visível, ou seja, 20% das amostras.

Para que um produto transparente possa ser considerado ideal para regiões de alta incidência de radiação solar, deve-se associar um alto coeficiente de ρ nos espectros UV e infravermelho com uma baixa ρ no espectro visível, ou seja, refletir o calor e admitir luz (ARSENAULT, 2015) (Figura 4). Partindo-se dessa premissa, as películas refletivas foram os únicos produtos que atenderam a essa condição, excetuando-se as películas pratas.

Os gráficos que ilustram o comportamento espectrofotométrico das amostras analisadas foram obtidos a partir dos dados fornecidos pelos espectrofotômetros nos ensaios de τ e ρ para ângulo de incidência da radiação de 0° em relação à normal.

A Figura 5 apresenta as curvas de τ (comportamento espectrofotométrico) dos vidros laminados, dos vidros refletivos, das películas de privacidade e das películas refletivas, comparando seus respectivos desempenhos com o do vidro incolor de 3 mm.

Observa-se que o melhor resultado dentre os vidros laminados foi atingido pela amostra LM-04 (laminado verde, 8 mm, 20% de τ), apresentando a maior razão Vis/IV: 1,92. O LM-04 bloqueou o UV e apresentou baixa τ do infravermelho (8,17%), configurando-se em



FORTE: ARSENAULT (2015).

Figura 4 – Percentagem de transmitância de vidro típicos e coloridos.

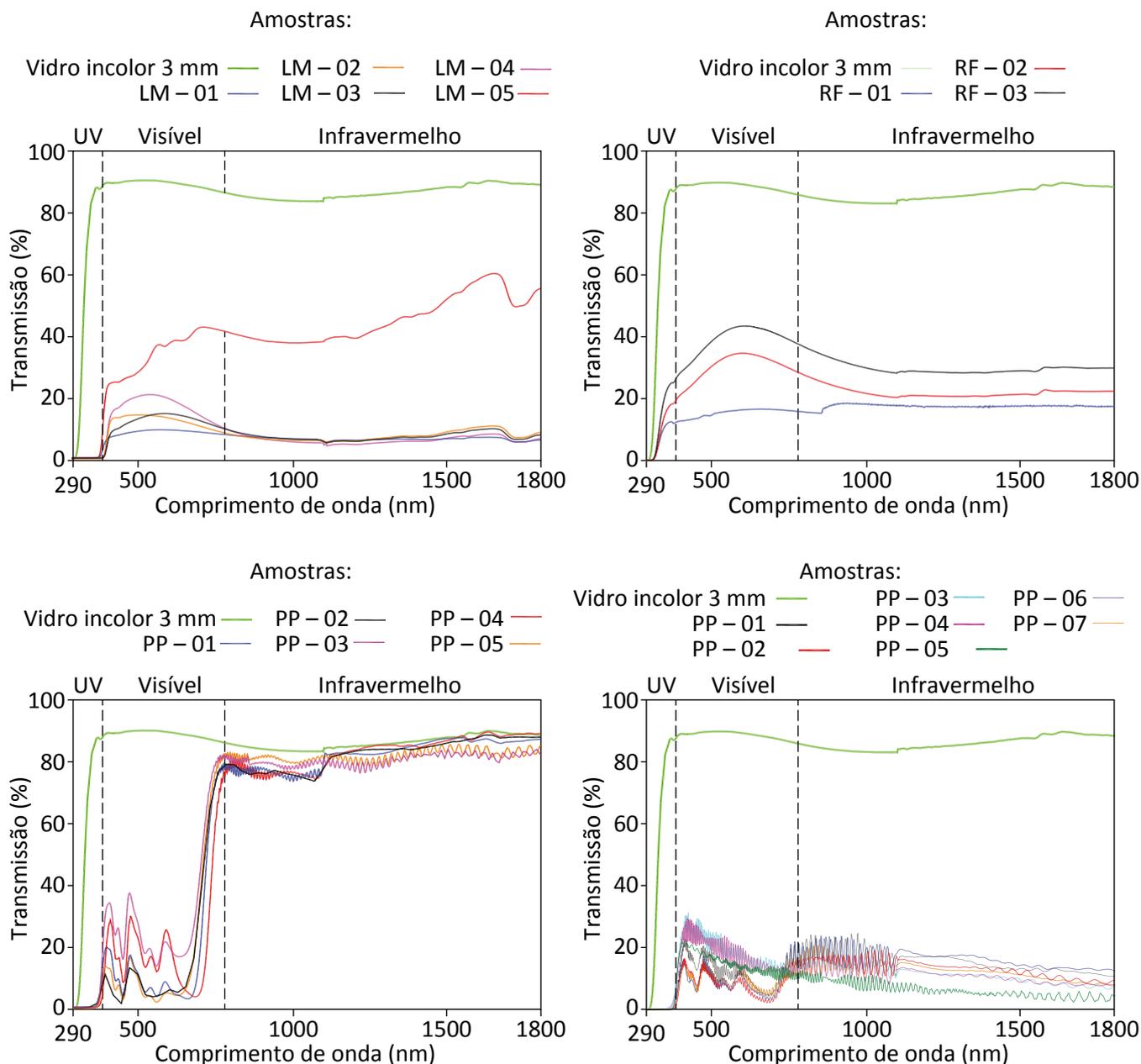


Figura 5 – (A) Comparação de desempenho do vidro incolor com vidros laminados, (B) comparação de desempenho do vidro incolor com vidros refletivos, (C) comparação de desempenho do vidro incolor com as películas de (privacidade) e (D) comparação de desempenho do vidro incolor com as películas refletivas (conforto).

uma situação ideal sob o ponto de vista do conforto térmico. Contudo, apresentou uma baixa porcentagem de τ no espectro visível (15,65%).

O melhor resultado dentre os vidros refletivos foi atingido pela amostra RF-02 (refletivo cobre, 3 mm, 30% de τ), permitindo luminosidade satisfatória (30,33%);

contudo, não bloqueia o UV (8,31%) e possui uma razoável τ no infravermelho (22,18%), alcançando razão Vis/IV de 1,37.

Constata-se que o uso das películas de privacidade, como películas de controle solar, é equivocado, pois estas são inadequadas devido a alta τ no espectro in-

fravermelho (variando de 82,54 a 83,44%) e baixa admissão no espectro visível (de 18,43 a 20,08%). Consequentemente, as películas de privacidade alcançaram os menores valores para a razão Vis/IV, variando entre 0,22 e 0,44%.

Dentre as películas refletivas, o melhor resultado foi alcançado pela amostra PR-03 (refletiva prata, Intercontrol), ou seja, praticamente bloqueou o UV (0,48%) e proporcionou baixa τ no infravermelho (11,07%); contudo, apresentou uma τ no espectro visível abaixo do satisfatório (18,31%).

As películas refletivas (conforto) e não refletivas (privacidade) apresentaram comportamento bastante diferenciado na τ para o espectro do infravermelho. A τ no espectro visível da película G5 é de 18,4%, e da refletiva, de 12,4%. No espectro do infravermelho, a τ da G5 é de 82,5%, e a τ da refletiva, de 15,38%.

A τ total deve ser analisada em conjunto com a ρ , pois baixos valores de τ associados a baixos valores de ρ geram elevados valores de α , que contribuem para o aumento do GCS na edificação por reirradiação. De forma geral, esse comportamento foi constatado nos vidros laminados.

Altos valores de ρ proporcionam menores valores de ganho de calor solar. Na situação ideal, com vistas ao conforto térmico e lumínico, deve-se associar o alto índice de ρ no espectro do IV com uma baixa ρ no espectro do visível.

Baixos índices de α não podem ser considerados como satisfatórios isoladamente, exemplos são as películas de privacidade, que apresentam baixos índices de α e altos de τ . As películas de privacidade, dentre os produtos estudados, alcançaram os maiores valores de GCS (Tabela 2).

Os parâmetros α e FS foram usados para a determinação do GCS para as condições fixadas na metodologia (latitude, orientação da fachada, época do ano e horários). Por meio do GCS é possível quantificar a carga por Ig que a superfície transparente agrega por metro quadrado de esquadria em uma edificação (Tabela 2).

Considerando um Δt de 10°C, observa-se que os menores valores do GCS foram alcançados pelos vidros laminados e pelas películas refletivas. A película PR-

05 (refletiva prata da Solar Gard) e o vidro LM-01 (laminado ouro, 6 mm, 8% de τ) alcançaram os menores GCS com 96,9 e 124,0 W/m², respectivamente; enquanto o GCS do vidro incolor de 3 mm foi de 609,0 W/m². Os valores dos GCSs da película refletiva prata (PR-05) e do vidro laminado (LM-01) corresponderam, respectivamente, a 15, e 20,4% do GCS do vidro incolor de 3 mm.

Resultados semelhantes foram obtidos por Zófoli *et al.* (2012) analisando a influência da Ig que penetra pelos fechamentos transparentes no consumo de energia para climatização de edifícios de escritório na cidade de Santa Maria (RS). De acordo com os autores, dentre os valores obtidos nas simulações, o vidro comum incolor (FS de 85%) atingiu maiores consumos energéticos ao ser especificado e o vidro laminado refletivo prata escuro (FS 29%) foi o que promoveu menores consumos totais.

Os valores de GCS variaram de 155,8 W/m² a 536,4 W/m², respectivamente, para a película refletiva prata e películas fumê (Figura 6). A partir destes resultados percebe-se a grande importância da correta especificação desses materiais diante da diminuição do consumo energético visando o resfriamento interno de edifícios. Andreis, Besen e Westphal (2014), estudando o desempenho energético de fachadas envidraçadas para diferentes climas brasileiros, encontraram menor consumo energético naquelas revestidas por vidros laminados e vidros duplos, respectivamente, para climas mais quentes e mais amenos. Quanto aos últimos, Cetiner & Özkan (2005) alertam para a necessidade de se avaliar a relação custo-benefício de sua aplicação, pois a economia obtida na conta de energia poderia ser revertida para investimento na especificação de um fechamento transparente de melhor custo e eficiência.

Por fim, conclui-se que o uso dos vidros refletivos promove um menor GCS. Isso mostra que o uso desses vidros pela arquitetura é bastante pertinente quando se trata da redução da entrada de calor no interior das edificações, principalmente em locais de clima quente, como o município de Goiânia. Porém, não se pode esquecer de que a refutação do calor transmitido pelos vidros pode implicar, também, na diminuição da luz natural nos ambientes, comportamento não adequado sob o ponto de vista do conforto ambiental.

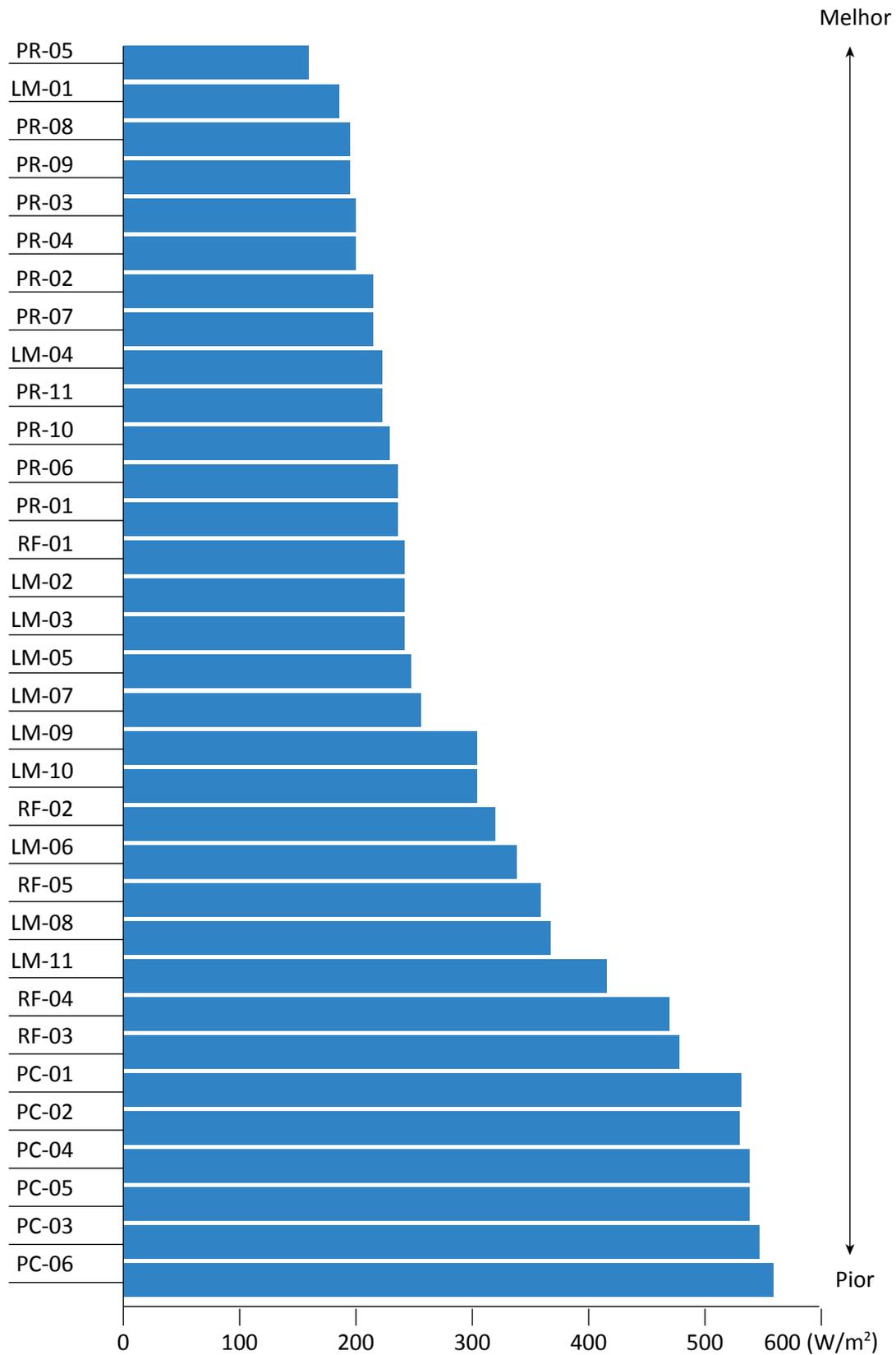


Figura 6 – Ganho de calor solar para o total de amostras ensaiadas.

CONCLUSÕES

Os vidros laminados atenderam a proposta quanto ao desempenho do Índice de Controle de Luz Solar para τ de luz visível fornecido pelos. A baixa transmissão de infravermelho (calor) não garante um desempenho ideal do ponto de vista do conforto térmico, pois eles alcançaram elevados índices de α ; tal energia, ao ser reirradiada para o interior, pode causar aquecimento excessivo e, conseqüentemente, desconforto.

É comum a venda das películas de privacidade para o controle de ganho de calor. Contudo, seu uso para esse fim é equivocado, pois as películas de privacidade promovem alta τ no espectro infravermelho. Essas películas alcançaram uma atenuação satisfatória da I_g incidente apenas em comparação com os vidros incolores.

As películas refletivas alcançaram baixa τ nos espectros visível e infravermelho (calor), bloquearam os raios UV e sua forte característica foi o elevado valor de ρ , diminuindo a α e o GCS. São boas opções para serem empregadas em locais de clima quente, em recuperação de fachadas envidraçadas em que se deseja a melhora do desempenho térmico com agilidade e custo relativamente menor, quando comparado ao emprego de um vidro laminado e sem o inconveniente da eventual troca da esquadria.

Enfim, os resultados mostraram que, para a correta escolha e especificação de um vidro ou uma película de proteção solar, com vistas ao conforto térmico e eficiência energética, deve ser analisado o parâmetro de GCS e a Razão Vis/IV. Sugere-se, ainda, associar a esta análise valores de τ no espectro visível acima de 30%.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15220-1*. Desempenho Térmico de Edificações Parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a. 8p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15220-2*. Desempenho Térmico de Edificações Parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b. 34p.
- ALUCCI, M. P. *Banco de Dados: Características Térmicas, Luminosas e Acústicas de vidros, Plásticos e Translúcidos*. 2005. Disponível em: <<http://www.usp.br/fau/deptecnologia/docs/bancovidros.pdf>> Acesso em: 29 out. 2005.
- ANDREIS, C.; BESEN, P.; WESTPHAL, F. S. Desempenho energético de fachadas envidraçadas em climas brasileiros. *In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 15., 2014, Maceió. *Anais...* Maceió: ANTAC, 2014.
- ARSENAULT, P. J. Multiple glass options offer customized ways to suit different building needs. 2015. *In: Glass On Web*. Disponível em: <<http://www.glassonweb.com/articles/article/992/>>. Acesso em: 01 abr. 2016.
- ASSIS, R. M. Caracterização óptica de materiais transparentes e sua relação com o conforto ambiental. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1998.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *ASTM E903*. Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating spheres. West Conshohocken, PA: ASTM, 2012. 17p.
- CETINER, I. & ÖZKAN, E. An approach for the evaluation of energy and cost efficiency of glass façades. *Energy and Building*, v. 37 p. 673-684, 2005.
- FROTA, A. B. & SCHIFFER, S. R. *Manual de Conforto Térmico*. 6ª ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003. 243p.
- GHISI, E.; TINKER, J. A.; IBRAHIM, S. H. Área de janela e dimensões de ambientes para iluminação natural e eficiência energética: literatura versus simulação computacional. *Ambiente Construído*, v. 5, n. 4, p. 81-93, 2005.
- GOIA, F.; PERINO, M.; SERRA, V. Improving thermal comfort conditions by means of PCM glazing systems. *Energy and Building*, v. 60, p. 442-452, 2013.

GRIM, A. B. Radiação solar incidente. In: *Meteorologia*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2015. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-7.html>>. Acesso em: 01 abr. 2016.

JORGE, J. A daylight criterion on solar controls for comparing sky radiance models. *Building and Environment*, v. 31, p. 225-232, 1996.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. *Eficiência energética na Arquitetura*. 2ª ed. São Paulo: PW Editores, 2004. 188p.

MIANA, A. C. *Avaliação de desempenho térmico de brises transparentes: ensaio em células-teste*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

OU, Y. Quantitative study of reflection of sunlight by a glass curtain wall resulting in a visual masking effect. *Applied Optics*, v. 53, n. 29, p. 6893-6899, 2014.

PEREIRA, E. G. S. A. *Caracterização ótica de vidros e películas de proteção solar utilizados na construção civil e Sua relação com o conforto ambiental*. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

PINATTI, A. & SICHIERI, E. P. Indicações sobre a utilização de vidros eletrocromicos com filme de Nb2O5 como proteção solar em edifícios. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2., ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 1999, Fortaleza. ENCAC 99. Fortaleza: ENCAC 99, 1999. v. 2. p. 103-108.

SANTOS, J. P. & RORIZ, M. Influência do ângulo de incidência nos ganhos de calor solar através de materiais transparentes. *Ambiente Construído*, v. 12, n. 1, p. 149-161, 2012.

SHALDERS, A. *Regulamentação de Desempenho Térmico e Energético de Edificações*. Dissertação (Mestrado) – Universidade São Paulo, São Paulo, 2003.

ZÓFOLI, G. R.; SANTOS, J. C. P.; RUSSI, M.; SOARES, R. M. D.; VETTORAZZI, E. Os efeitos da radiação solar sobre os fechamentos transparentes em edifícios comerciais climatizados artificialmente em Santa Maria-RS. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2012, Juiz de Fora. *Anais...* Juiz de Fora: ENTAC, 2012.