XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO VENTO NO FATOR SOLAR DE VIDRO S DE CONTROLE SOLAR MONOLÍTICOS E LAMINADOS

Bruna Just Meller (1); Deivis Luis Marinoski (2); Saulo Guths (3)
(1) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, brunajmeller@outlook.com, Universidade Federal de Santa Catarina.
(2) Doutor, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), deivis.marinoski@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis–SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721-5184
(3) PhD, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, saulo@lmpt.ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas, Florianópolis–SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721-9851

RESUMO
O fator solar de vidros é definido como a fração da radiação solar incidente admitida pelo vidro, tanto a parcela diretamente transmitida como a parcela absorvida e subsequentemente reirradiada para o interior. O fator solar é diretamente influenciado pela velocidade do vento, que afeta as trocas de calor do vidro com o meio externo, que são dependentes dos processos de transferência de calor por convecção e radiação entre as superfícies expostas ao ambiente. Esse trabalho teve como objetivo analisar a influência da velocidade do vento (0 a 10m/s) no fator solar de seis tipos de vidros de controle solar monolíticos (4mm) e laminados (8mm), além de um vidro simples (4mm) de referência. O fator solar foi calculado por meio de simulação computacional no software WINDOW a partir das propriedades ópticas e valores de emitância térmica dos vidros, obtidas em laboratório através de análises espectrofotométricas. Para todos os vidros a elevação da velocidade do vento ocasionou uma diminuição no valor do fator solar devido ao aumento do coeficiente de transferência de calor superficial externo, sendo essa redução mais expressiva em vidros de alta absortância, cuja variação relativa chegou a 40%.
Palavras-chave: fator solar, desempenho térmico, simulação computacional.

ABSTRACT
The solar factor of glazing is the fraction of incident solar radiation admitted through a glass system, both directly transmitted and absorbed and subsequently released inward. Solar factor is directly influenced by the wind speed, which affects the heat exchanges with the external environment, which are dependent of radiative and convective heat transfer between the surfaces exposed to the external environment. The main objective of this work is to analyse the influence of wind speed (0 to 10m/s) in the solar factor of six solar control glasses, monolithic (4mm) and laminated (8mm), and one reference clear glass (4mm). Solar factor was calculated by computational simulation in WINDOW software, using optical proprieties and thermal emittance obtained in spectrometric measurements in laboratory. For all glasses, the increase in wind speed caused a decrease in the solar factor due to the increase in the exterior surface convective heat transfer coefficient, and this reduction was more significant in high absorption glazing, whose relative variation reached 40%.
Keywords: solar factor, thermal performance, computer simulation.

1. INTRODUÇÃO

O Balanço Energético Nacional (EPE, 2017) apresenta dados relativos ao consumo de eletricidade no Brasil para diversos setores. De toda a energia elétrica consumida no país, 51,1% competem aos setores residencial, comercial e público. Desse montante, os edifícios são responsáveis por uma parcela significativa do consumo, afinal as construções demandam energia durante todo seu ciclo de vida.

Grande parte do dispêndio anual de energia elétrica em edificações se destina à manutenção de condições térmicas tidas como ideais (no caso dos climas quentes, se destina à refrigeração), e que essa demanda vem aumentando conforme o crescimento populacional (ZHAI et al., 2013). Dessa forma, no mundo todo, políticas energéticas ligadas a edificações incentivam um melhor desempenho térmico dos edifícios visando à redução da demanda de energia.

O consumo de energia em edificações está relacionado aos ganhos ou perdas de calor pela envoltória da edificação, que, associados à carga interna gerada pela ocupação, pelo uso de equipamentos e pela iluminação artificial, resultam no consumo dos sistemas de condicionamento de ar, além dos próprios sistemas de iluminação e equipamentos (CARLO, 2008). Visto isso, algumas variáveis arquitetônicas, sobretudo da envoltória, têm maior influência sobre as trocas de calor entre espaços internos e externos.

Lamberts, Dutra e Pereira (2014) consideram que as principais trocas térmicas em uma edificação acontecem geralmente nas janelas, claraboias, ou outro elemento transparente da arquitetura, influenciando significativa no desempenho térmico da edificação.

Os elementos predominantes nas aberturas são os vidros ou policarbonatos e, em função da atual variedade desses materiais, uma escolha adequada visando à eficiência energética depende em grande parte do conhecimento das suas propriedades.

O fator solar de uma abertura pode ser entendido como a razão entre a quantidade de energia solar que atravessa uma janela pela quantidade de energia solar que nela incide. Ele é definido como a soma da porcentagem da transmissão solar direta que ocorre através do vidro mais a parcela da energia absorvida pelo vidro e reirradiada para o interior. Autores como Carmody et al. (2004) e Pagliano et al. (2017) consideram que, juntamente com a transmitância térmica, o fator solar é o parâmetro mais importante dos componentes transparentes que afeta o balanço energético em edifícios. O conhecimento do fator solar é fundamental para a minimização do consumo de energia de um edifício e para o correto dimensionamento do sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (KUHN, 2014).

Algumas variáveis ambientais influenciam no valor do fator solar, entre elas a velocidade do vento, que afeta as trocas de calor do vidro com o meio externo. Essas trocas de calor dependem dos processos de transferência de calor por convecção e radiação entre as superfícies expostas ao ambiente e nas cavidades entre vidros, se existentes.

Os coeficientes de transferência de calor na superfície externa (h_o) e interna (h_i) do vidro combinam os efeitos da radiação e da convecção. Esses coeficientes dependem das temperaturas do meio externo e interno, das temperaturas superficiais do vidro nestes meios, das velocidades do vento dentro e fora, próximo à superfície do vidro, e das emitâncias das superfícies envolvidas nas trocas de calor (CARAM ASSIS, 1998).

Um incremento na velocidade do vento acarreta um aumento no coeficiente h_o, que, juntamente com o coeficiente h_i, influenciam no percentual da energia absorvida que irá se transferir para cada uma das faces do vidro. Os processos de convecção dependem basicamente da velocidade do ar junto à superfície da janela. A velocidade do vento pode variar de 0,20 m/s para situações de ar "calmo", ate mais que 29m/s para ventos fortes (ASHRAE, 2017). Já os processos de radiação dependem principalmente da emissividade do vidro e da temperatura das superfícies que trocam calor entre si (ASHRAE, 2017).

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é analisar a influência da velocidade no vento no fator solar de sete tipos de vidros de controle solar, sendo quatro monolíticos e três laminados.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em três etapas principais:

1. Identificação dos elementos de teste (vidros);
2. Determinação das propriedades ópticas e emitância térmica dos vidros em laboratório;
3. Simulação computacional no software WINDOW a partir das propriedades ópticas e emitância térmica obtidas em laboratório.

3.1. Elementos de teste

Para os ensaios, foram utilizados seis amostras de vidros de controle solar, três monolíticos e um laminado, comumente encontrados no comércio para aplicação em janelas. As amostras são visualmente diferentes, em relação a sua aparência, como mostrado na Figura 1. Esse tipo de vidro reduz a quantidade de ganho de calor solar transmitida através do vidro, possuindo um tratamento superficial por meio de um revestimento metálico, imperceptível a olho nu, mas que pode dar um aspecto mais refletivo ou mais escurecido ao vidro (WESTPHAL, 2016). As seis amostras, descritas na Tabela 1, são da fabricante Guardian, com dimensões 7,5 x 7,5 cm.

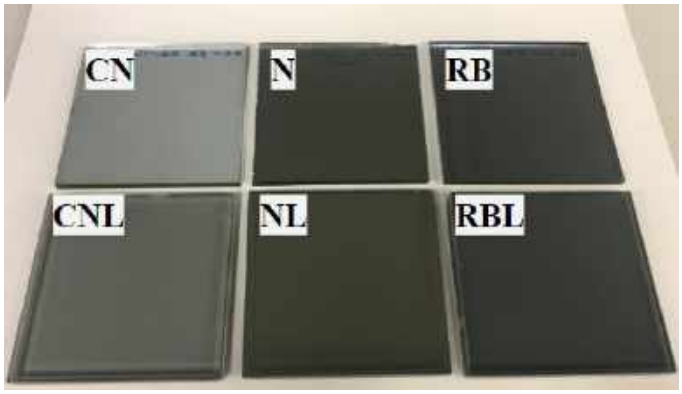

Figura 1 – Elementos de teste com nomenclatura.

Tabela 1 – Descrição dos elementos de teste.

Nome	Nomenclatura	Processo	Espessura total (mm)
Cristal neutro	CN	Monolítico	4
Neutral 14 Clear	N	Monolítico	4
Royal Blue 20 Clear	RB	Monolítico	4
Cristal neutro + película PVB + Incolor 4mm	CNL	Laminado	8
Neutral 14 Clear + película PVB + Incolor 4mm	NL	Laminado	8
Royal Blue 20 Clear + película PVB + Incolor 4mm	RBL	Laminado	8

Os vidros monolíticos são do tipo float, que é um tipo de vidro plano com espessura uniforme e massa homogênea. Para os mesmos monolíticos foi analisado um laminado equivalente. Os vidros laminados são compostos por duas placas de vidro intercaladas por uma película de polivinil butiral (PVB) incolor. A primeira placa (exterior) é um vidro monolítico correspondente aos monolíticos analisados (CN, N e RB) e a segunda placa (interior) é composta por um vidro simples de 4mm.

Além desses seis vidros, um vidro simples (VS) de 4mm de espessura foi adotado como referência.

3.2. Determinação das propriedades ópticas em laboratório

A norma ASTM E903 (2012) propõe a utilização de um espectrofotômetro com esfera integradora para realizar medições de refletância, transmitância e absortância em laboratório. Nessa pesquisa, foi utilizado o espectrofotômetro Lambda 1050 (Figura 2), marca PerkinElmer, que pertencente ao CB3E - Departamento de Engenharia Civil da UFSC, cujas especificações são mostradas na Tabela 2. Com esse aparelho foram aferidas a transmitância e refletância das amostras a partir da radiação eletromagnética aplicada nas faixas ultravioleta, visível e infravermelho próximo.



Figura 2 – Espectrofotômetro Lambda 1050.

Tabela 2 – Especificações do espectrofotômetro Lambda 1050.

Descrição	Especificação
Faixa Espectral	175 – 3300 nm
Fonte de luz	Deutério e Tungstênio
Resolução UV/VIS	≤ 0.05nm
Resolução NIR	≤ 0.20nm

O tratamento dos dados foi realizado em relação ao espectro solar padrão, em que a transmitância e a refletância de cada amostra são obtidas pela relação entre a integral de toda a energia que é transmitida ou refletida, respectivamente, e o total da energia incidente. Cada valor individual obtido do ensaio foi ponderado pelo valor correspondente de energia da radiação solar em seu respectivo comprimento de onda.

Para determinar a emitância, a norma ASTM E1585 (1993) propõe um método de medição e cálculo a partir de medições espectrofotométricas, conforme recomendado pela ISO 15099. Nessa pesquisa, foi utilizado o Espectrofotômetro FTIR Frontier (Figura 3), marca PerkinElmer, equipado com o acessório de refletância especular 10Spec (Figura 4) da PIKE Technologies, também pertencentes ao CB3E.



Figura 3 – Espectrofotômetro FTIR Frontier.



Figura 4 – Acessório de refletância especular 10Spec.

3.3. Simulação computacional

De posse das medições das propriedades ópticas das amostras em laboratório, a estimativa do fator solar para as amostras foi realizada por meio do programa computacional WINDOW (versão 7.6.4), que estima os valores de fator solar por meio de algoritmos de cálculo. O WINDOW é um programa computacional de simulação desenvolvido nos EUA pelo Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) para determinar propriedades térmicas e ópticas de janelas. Esses modelos de cálculo estão em concordância com a NFRC 200 (2017), sendo que a National Fenestration Rating Council (NFRC) certifica o uso do WINDOW no processo de etiquetagem dos seus produtos.

O software permite configurações do usuário em relação a diversos parâmetros, incluindo modelos de cálculo. Na aba "Thermal calculation options" é possível selecionar os procedimentos de cálculo (ISO 15099 ou EN673). Nesse estudo, o modelo térmico de cálculo configurado no software foi o da ISO 15099.

Além disso, algumas considerações e condições de contorno foram especificadas para delimitar a pesquisa:

- Os vidros serão modelados como uma placa sem esquadrias, visando o cálculo do fator solar do centro do vidro. O centro do vidro, ou *center-of-glazing*, é utilizado para se referir às propriedades térmicas ou ópticas nessa área do sistema envidraçado que não é influenciada pelos componentes opacos ou condutores da janela (NFRC 600, 2017);
- Os vidros serão modelados na posição vertical;
- A radiação incidente será normal ao plano de medição.

Na biblioteca "Environmental Conditions" do WINDOW estão disponíveis as condições padrão da NFRC para o cálculo do fator solar em simulações computacionais. No mesmo local, outras condições podem ser adicionadas pelo usuário e utilizadas nas simulações. A Tabela 3 mostra as configurações de temperatura e radiação, que seguirão o especificado na NFRC 200 (2017), norma que trata do cálculo do fator solar e transmitância visível em incidência normal em aberturas.

Tabela 3 – Especificações de temperatura e radiação para a simulação computacional.

Dado de entrada	**Valor**
Temperatura interna	24ºC
Temperatura externa	32ºC
Radiação solar direta	783 W/m2

A norma determina o cálculo do fator solar considerando a velocidade do vento de 2,75m/s, que corresponde a um coeficiente de convecção de 15W/m^{2}K. Nesse estudo, o fator solar foi analisado para a velocidade variando a cada 0,2m/s no intervalo de 0 a 10 m/s, objetivando abranger uma faixa de velocidades comumente observadas. Para isso, foram criadas 50 condições ambientais mantendo as condições de contorno da Tabela 3 e variando a velocidade do vento. O coeficiente de convecção foi calculado automaticamente pelo software conforme os procedimentos da NFRC.

O vidro simples (VS) de 4mm de espessura, utilizado como referência, está disponível na biblioteca de vidros do WINDOW e suas características ópticas são mostradas na Tabela 4. Esse vidro é caracterizado por ter alta transmitância solar e baixa refletância e absortância, transmitindo 85% da radiação incidente.

Tabela 4 – Propriedades ópticas do vidro simples (VS) de 4mm.

Propriedade	Valor
Transmitância solar	0.853
Transmitância visível	0.903
Refletância solar (frente)	0.075
Refletância solar (trás)	0.075
Refletância visível (frente)	0.080
Refletância visível (trás)	0.080
Absortância (frente)	0.072
Absortância (trás)	0.022
Emitância (frente)	0.840
Emitância (trás)	0.840

4. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados da pesquisa, inicialmente mostrando os resultados referentes à caracterização das propriedades ópticas e, em seguida, os valores obtidos de fator solar dos sete tipos de vidros, obtidas pelo software WINDOW, para as diferentes velocidades do vento.

4.1. Propriedades ópticas

Na Figura 5 estão apresentadas as curvas de transmissão e reflexão solares, obtidas pela análise espectrofotométrica conforme descrito no item 3.2, para as faixas UV, visível e infravermelho, já ponderadas pelo espectro solar de referência.

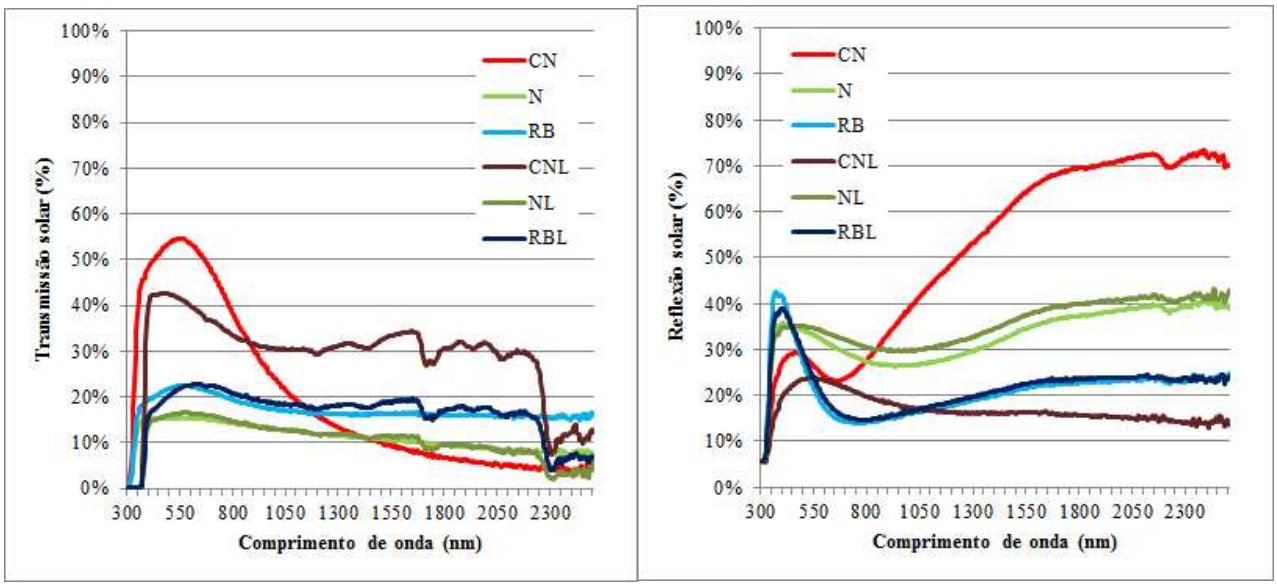

Figura 5 – Curvas de transmitância e refletância solar dos seis tipos de vidros.

Analisando as curvas de transmitância e refletância, nota-se grande semelhança no perfil espectral da transmissão entre os vidros ao longo do espectro para as duplas N/NL e RB/RBL, que são vidros com menor

transmitância em relação ao par CN/CNL. O mesmo pode ser observado em relação à reflexão, onde N/NL e RB/RBL apresentaram comportamento semelhante e, no caso das amostras CN e CNL, o vidro monolítico apresentou grande reflexão na região do infravermelho, diferente do seu semelhante laminado.

A partir das curvas características, realizada a integração para obtenção dos valores de transmitância e refletância, foram obtidas as propriedades ópticas mostradas na Tabela 5 juntamente com os valores de absortância, calculados a partir da transmitância e refletância, e valores de emitância.

Tabela 5 – Propriedades ópticas dos vidros

Propriedade	**Vidros**					
	Monolíticos			**Laminados**		
	CN	**N**	**RB**	**CNL**	**NL**	**RBL**
Transmitância solar	0,376	0,138	0,194	0,346	0,138	0,192
Transmitância visível	0,539	0,154	0,222	0,410	0,163	0,218
Refletância solar (externa)	0,323	0,308	0,207	0,198	0,329	0,214
Refletância solar (interna)	0,341	0,406	0,364	0,107	0,279	0,260
Refletância visível (externa)	0,103	0,325	0,210	0,235	0,344	0,232
Refletância visível (interna)	0,258	0,372	0,306	0,092	0,298	0,261
Absortância (externa)	0,301	0,554	0,599	0,456	0,533	0,594
Absortância (interna)	0,283	0,457	0,442	0,547	0,583	0,549
Emitância (externa)	0,840	0,850	0,840	0,830	0,830	0,850
Emitância (interna)	0,065	0,378	0,550	0,830	0,830	0,850

Os vidros analisados apresentam transmitância semelhante nos pares de monoliticos/laminados, com menor transmitância em relação ao vidro simples (Tabela 4), característica dos vidros de controle solar.

As amostras RB e RBL apresentaram comportamento similar para absorção, em que absorvem aproximadamente 60% da radiação. Já os vidros N, CNL e NL absorvem cerca de 50%, podendo ser caracterizados como vidros de alta absorção. Nesse tipo de vidro, a parcela da energia absorvida e emitida para o interior é mais significativa na composição do fator solar e, consequentemente, são vidros cujo fator solar é mais sensível a variações na velocidade do vento.

4.2. Resultados da simulação computacional

A partir das simulações computacionais executadas no software WINDOW, foram obtidos 50 valores de fator solar para cada tipo de vidro, totalizando 350 dados. A Figura 6 mostra a variação do fator solar em função do aumento da velocidade do vento de 0m/s a10m/s para os seis vidros analisados e para o vidro de referência (VS).

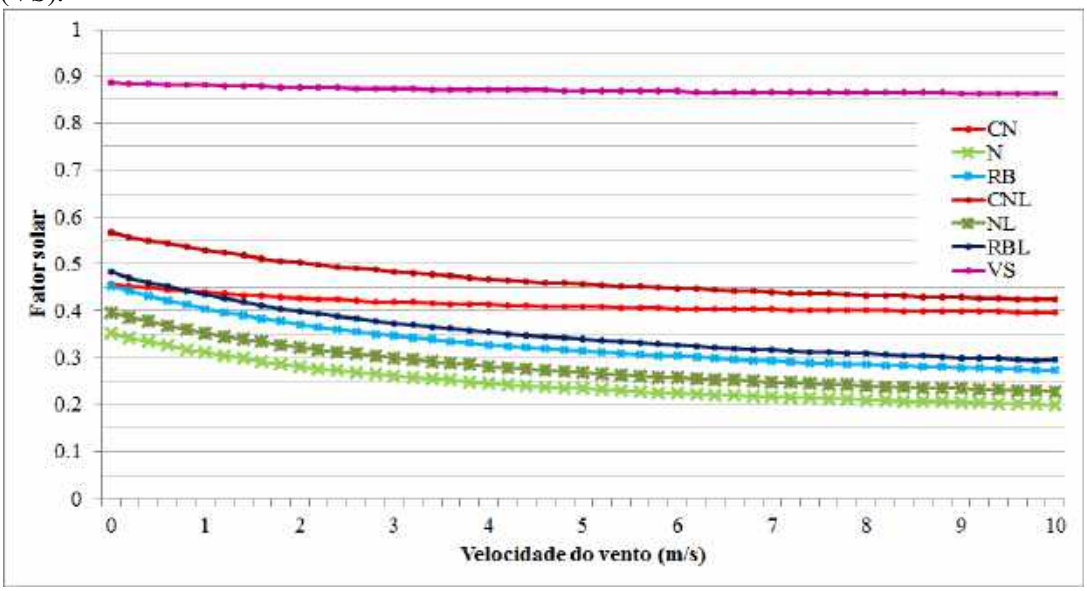

Figura 6 – Variação do fator solar em função da velocidade do vento.

Para todos os vidros observados na Figura 6, a elevação da velocidade do vento ocasionou uma diminuição no valor do fator solar devido ao aumento das trocas de calor por convecção na superfície externa do vidro, evidenciado pelo aumento do coeficiente de transferência de calor superficial externo, que variou de 4 W/m^2K (0 m/s) a 44 W/m^2K (10 m/s).

Considerando as velocidades analisadas, no vidro simples (alta transmitância e baixa absortância) o fator solar variou de 0,886 a 0,864, uma variação absoluta de 0,022. Para essa situação, a partir das condições apresentadas na Tabela 3, o calor transmitido para o interior do ambiente passaria de 693,74W/m^2 para 676,51W/m^2, uma diminuição de cerca de 2%.

Observando apenas as amostras de vidro de controle solar, percebe-se que, de modo geral, os vidros de maior absortância (N, NL, RB e RL) apresentaram comportamentos semelhantes. Já no vidro CN, de menor absortância, tem comportamento semelhante ao VS. A variação absoluta para a amostra CN foi a mais baixa (0,061) entre os vidros de controle solar, o que já era o esperado, visto que o vidro apresenta a menor absortância (0,301), cerca de 35% menor que a sua correspondente laminada (CNL). Em termos relativos, as amostras CN e CNL tiveram variação em torno de 13% e 25%, respectivamente.

Já para os vidros de maior absortância (N, NL, RB e RL), a variação relativa ficou em torno de 40%. A maior variação absoluta no fator solar foi de 0,180, para os vidros RB e RBL, cujas absortâncias são as maiores entre todas as amostras analisadas. Essa grande variação deve-se ao fato de que, em vidros de alta absortância, uma parcela significativa da energia é absorvida pelo vidro, causando o aquecimento do material. Com o aumento da velocidade do vento, as trocas de calor por convecção na face externa do vidro são intensificadas, diminuindo a parcela da energia absorvida pelo vidro que é posteriormente reirradiada para o interior, o que acarreta uma redução do fator solar.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados é possível observar a diminuição do fator solar em função do aumento da velocidade do vento em todos os vidros analisados, sendo essa influência mais expressiva em vidros de controle solar em relação ao vidro simples.

A partir das amostras analisadas, destaca-se a relevância da determinação dos coeficientes de transferência de calor superficiais nas superfícies externas, visto que a sua alteração pode desencadear uma variação relativa do fator solar de até 40%. Para vidros com maior absortância, essa redução do fator solar é mais significativa do que vidros com menor absortância. Entretanto, é válido salientar que as trocas de calor superficiais também estão vinculadas aos processos de radiação. Na face externa, as amostras analisadas apresentam emitâncias semelhantes (Tabela 5), porém, para vidros com diferentes emitâncias a análise deverá ser estendida às trocas de calor por radiação.

Além disso, é válido destacar que essas análises estão associadas às condições de contorno e aos modelos de cálculo propostos pela NFRC e na ISO 15099 empregados no software WINDOW. Uma mudança nesses parâmetros, em formas de estimar dos coeficientes de transferência de calor superficiais e/ou fator solar poderão acarretar resultados distintos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE. **ASHRAE Handbook Fundamentals**. Atlanta: Ashrae, 2017. 1088 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.**ASTM E903-12**: Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres, 2012

_____.**ASTM E1585**: Standard Test Method for Measuring and Calculating Emittance of Architectural Flat Glass Products Using Spectrometric Measurements, 1993.

CARAM ASSIS, Rosana Maria. **Caracterização ótica em materiais transparentes e sua relação com o confortoambiental em edificação**. 1998. 166 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/258051>. Acesso em: 04 dez. 2017.

CARLO, J. C. Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não–Residenciais. 2008. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CARMODY, John et al. **Window Systems for High–Performance Buildings**. Nova Iorque: W. W. Norton & Company, 2004. 400p.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] **Balanço Energético Nacional (BEN) 2017**: Ano base 2016, 2017. Disponível em < https://epe.gov.br>. Acesso em set/2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15099**: Thermal performance of windows, doors and shading devices – Detailed calculations, 2003.

KUHN, Tilmann E.. Calorimetric determination of the solar heat gain coefficient g with steady–state laboratory measurements. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 84, p.388–402, dez. 2014.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R.. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/procel, 2014.

National Fenestration Rating Council. **NFRC 100**: Procedure for Determining Fenestration Product U-factors. National Fenestration Rating Council, 2017.
_____. **NFRC 200:** Procedure for Determining Fenestration Product Solar Heat Gain Coefficient and Visible Transmittance at Normal Incidence, 2017.
_____. **NFRC 600**: Glossary and Terminology. National Fenestration Rating Council, 2017.
PAGLIANO, Lorenzo et al. Improved methods for the calorimetric determination of the solar factor in outdoor test cell facilities. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 153, p.513–524, out. 2017.
WESTPHAL, Fernando Simon. **Manual técnico do vidro plano para edificações**. São Paulo: Abividro, 2016. 182 p.
ZHAI, Y.; ARENS, E.; ELSWORTH, K.; ZHANG, H. Selecting air speeds for cooling at sedentary and non-sedentary office activity levels. **Building and Environment**, v. 122, p. 247–257, 2017.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro durante o período de desenvolvimento deste trabalho.