

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO, BEM-ESTAR E FELICIDADE**

Mariana Cristina Oliveira do Rosário

**DESEMPENHO DOS VIDROS FLOAT, LAMINADO E ARAMADO NO
ESTUDO DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR EM
CÉLULAS-TESTE COM ESCALA REDUZIDA**

**FACULDADE SANTO AGOSTINHO DE ITABUNA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

Mariana Cristina Oliveira do Rosário

**DESEMPENHO DOS VIDROS FLOAT, LAMINADO E ARAMADO NO
ESTUDO DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR EM
CÉLULAS-TESTE COM ESCALA REDUZIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso, em formato de artigo científico, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de especialista pelo curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Educação, Bem-Estar e Felicidade.

**ITABUNA – BAHIA
2021**

R789d

ROSÁRIO, Mariana Cristina Oliveira do

Desempenho dos Vidros Float, Laminado e Aramado no estudo da temperatura e umidade relativa do ar em células-teste com escala reduzida. /Mariana Cristina Oliveira do Rosário, --Itabuna: FASAI, 2021.
22p.

Orientador: Prof.º Dr.º Luciano de Oliveira Souza Tourinho.

Trabalho de Conclusão da Pós-Graduação Lato Sensu em Educação, Bem-estar e Felicidade pela Faculdade Santo Agostinho de Itabuna, BA – FASAI.

1.Vidros.2.Escalas Reduzidas.3.Temperaturas.4.Umidade.

I.Rosário, Mariana Cristina Oliveira do.II.Tourinho, Luciano de Oliveira Souza.

III.Faculdades Santo Agostinho de Itabuna. IV. Título.

CDU:611

FOLHA DE APROVAÇÃO

**DESEMPENHO DOS VIDROS FLOAT, LAMINADO E ARAMADO NO
ESTUDO DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR EM
CÉLULAS-TESTE COM ESCALA REDUZIDA**

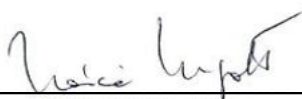
Mariana Cristina Oliveira do Rosário

Aprovado em 02 de março de 2021

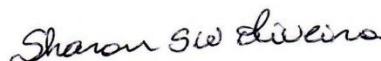
BANCA EXAMINADORA



Dr. Luciano de Oliveira Souza Tourinho
Faculdade Santo Agostinho de Itabuna



Me. Mércia Margotto
Faculdade Santo Agostinho de Itabuna



Me. Sharon Shyrley Weyll
Faculdade Santo Agostinho de Itabuna

RESUMO

No estudo do conforto térmico, a escolha adequada dos materiais e componentes construtivos é muito importante, tendo em vista que eles atuam como mecanismo de controle das variáveis climáticas, cuja função é atender às necessidades térmicas e lumínicas dos ambientes nas edificações. Na construção civil, o vidro é um dos materiais que pode favorecer o aquecimento interno nos ambientes das edificações causando o efeito estufa. Isso ocorre porque sua transparência permite a passagem da radiação solar e possibilita a criação de um microclima no ambiente. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho consistiu em analisar o comportamento da temperatura e umidade relativa do ar em células-teste, construídas em escala reduzida de 1:10. Para isso, foram investigados com as células-teste três tipos de vidro, sendo estes do tipo *float*, laminado e aramado. Os vidros foram instalados como elementos de vedação transparentes (janelas), onde a passagem da luz solar permitiu analisar o comportamento da temperatura e umidade relativa do ar no interior das células-teste. Posteriormente, os valores de temperatura e umidade coletados no período de três dias, foram comparados entre os diferentes tipos de vidros utilizados. Os dados coletados foram analisados por meio de um modelo físico teórico que considera a interação da radiação solar com os vidros. As propriedades térmicas e ópticas desses materiais estão relacionadas à absorvância e transmitância dos raios solares e, conseqüentemente, às variações nas temperaturas e umidades internas dos ambientes das edificações. A peculiaridade desta pesquisa consiste no estudo de ganho de calor e desempenho térmico dos vidros em células-teste com escala reduzida. Os resultados obtidos sugerem uma viabilidade de realização desse tipo de estudo em células-teste com escala reduzida, sendo constatados diferentes valores de temperatura e umidade em função do tipo de vidro utilizado.

Palavras-chave: vidros, escala reduzida, temperatura, umidade, conforto térmico.

ABSTRACT

In the study of thermal comfort, the proper choice of materials and construction components is crucial, considering that they act as a mechanism for controlling climatic variables, whose function is to meet the thermal and lighting needs of the environments in buildings. In civil construction glass is one of the materials that can favor internal heating in building environments, causing the greenhouse effect. The fact is that its transparency allows the passage of solar radiation and allows the creation of a microclimate in the room. In this sense, the objective of this work was to analyze the behavior of temperature and relative humidity of air in test cells, built on a reduced scale of 1:10. For this purpose, three types of glass were investigated with the test cells, which are float, laminated, and wired. The glasses were installed as transparent sealing elements (windows), where the passage of sunlight allowed the analysis of the temperature and relative humidity of the air inside the test cells. Afterward, the values of temperature and humidity collected in the period of three days were compared between the different types of glasses used. The collected data were analyzed using a theoretical physical model that considers the interaction of solar radiation with glasses. The thermal and optical properties of these materials are related to the absorbance and transmittance of the sun's rays and, consequently, to the variations in temperatures and internal humidity of the building environments. The peculiarity of this work is the study of heat gain and thermal performance of glasses in test cells with a reduced scale. The results obtained suggest a feasibility of this study in test cells with reduced scale, being observed different values of temperature and humidity depending on the type of glass used.

Keywords: glasses, reduced scale, temperature, humidity, thermal comfort.

1 INTRODUÇÃO

Estudar o espaço construído é estudar suas ações no meio ambiente, na saúde humana e na economia, adotando estratégias de construção que garantam o conforto e a sua sustentabilidade. A Lei de Eficiência Energética, Lei N° 10.295 de 17 de outubro de 2001 (MME, 2009), é um exemplo de que hoje em dia é necessária a preocupação com os mecanismos que promovam a eficiência energética nas edificações construídas no Brasil, não só pelo uso de equipamentos ou sistemas mais eficientes, mas também por meio de projetos

arquitetônicos adaptados ao clima da região. A edificação assume uma maior eficiência energética, quando considera a iluminação natural integrada à artificial, o uso de ventilação natural com orientação e forma planejadas, proteções solares corretas e especificação criteriosa de materiais de acabamento (especialmente na envoltória da edificação).

Existem diversos tipos de vidros disponíveis no mercado para a comercialização e aplicação na construção civil. Essa diversidade visa a atender demandas térmicas, lumínicas e estéticas, o que dificulta a escolha dos materiais pelos profissionais, que devem levar em conta para o conforto do ambiente, as necessidades técnicas. O desenvolvimento de áreas envidraçadas necessita de materiais que controlem efetivamente a transmissão da radiação solar no interior das edificações, favorecendo um maior conforto térmico ao ambiente (CARAM, 1996).

Segundo Lamberts, *et al* (2013), os fatores climáticos atuam diretamente no conforto do espaço construído, pois a radiação solar, a temperatura, a umidade, os ventos e as precipitações são as variáveis que determinam as características gerais de uma região. A radiação solar é a energia recebida pela Terra, através de ondas eletromagnéticas originadas no Sol, nas seguintes proporções: ultravioleta (7%), visível (47%) e infravermelho (46%) (DUFFIE & BECKMAN, 1980). Podem ocorrer variações destas proporções dependendo das condições atmosféricas, como na presença de vapor d'água e nebulosidade, por exemplo. Essa radiação é responsável pelos processos que influenciam elementos meteorológicos, como temperatura, pressão, vento, chuva e umidade. Esses elementos são específicos a um determinado local ou região.

A umidade é o termo utilizado para representar a quantidade de vapor de água na atmosfera e é a variável climática mais estável ao longo do dia. Por outro lado, a temperatura é o fator climático de mais fácil medição e a mais conhecida. Ela está fortemente relacionada à incidência da radiação solar, constituída de um espectro cujos comprimentos de ondas variam do infravermelho ao ultravioleta. Ao incidir na superfície de um material transparente, como o vidro, a resposta do material é diferente para os diversos comprimentos de onda.

Neste trabalho, o interesse está na investigação do conforto térmico dos ambientes, de acordo com os tipos de vidros utilizados nos fechamentos de vãos de janelas, considerando as diferenças entre as temperaturas e umidades do ar externa e interna às edificações, para cada tipo de vidro utilizado. O objetivo é apresentar informações que possam contribuir para uma escolha adequada desses materiais, uma vez que o vidro é um elemento construtivo que age como filtro seletivo, permitindo ou impedindo o fluxo de calor para o ambiente.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MONTAGEM DAS CÉLULAS-TESTE: EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS

O método adotado baseia-se na análise de três tipos de vidros disponíveis para a comercialização e emprego em edificações, quais sejam, o *float* (comum), o laminado e o aramado. Foram realizadas medições para determinar as condições térmicas dos ambientes nas edificações em que os vidros são utilizados, a partir da implantação de células-teste, construídas em um terreno localizado no Bairro Doutor João Alves, na cidade de Montes Claros - MG. Para a coleta de dados foram utilizadas três células-teste na escala reduzida de 1:10. O comportamento da temperatura e da umidade do ar no interior das células-teste foi monitorado, sendo os valores comparados em um período de observação de três dias.

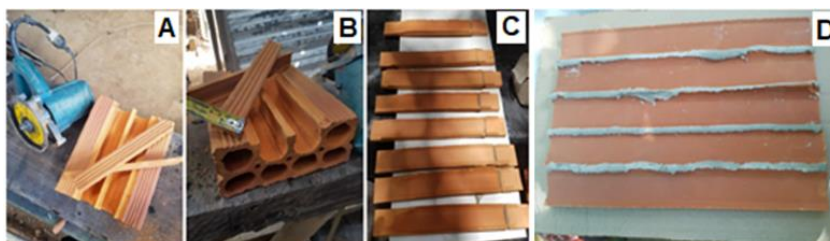
O projeto executivo das células-teste foi concebido com base nas observações de referência contidas na cartilha do Programa Minha Casa, Minha Vida. A cartilha, disponibilizada pelo governo federal do Brasil, apresenta, em escala de tamanho real (escala 1:1), recomendações para habitações de famílias com diversas faixas de renda. Neste trabalho, considerou-se as especificações residenciais para famílias com renda de até 3 salários mínimos, que se enquadram na tipologia 1, ou seja, casa térrea com 35 m², com altura de pé direito de 2,50 m, exceto na de cozinha e banheiro, que nesse caso é de 2,20 m.

A partir das especificações da cartilha, foi possível estimar as dimensões das células-teste em escala reduzida, as quais foram construídas tendo como base a previsão do mobiliário no projeto arquitetônico do dormitório de casal. Neste caso, o ambiente escolhido, com base em escala real, teria 3,26 m × 2,76 m por 2,90 m de altura (2,50 m do pé direito + 0,40 m da platibanda do telhado).

As células-teste, construídas na escala reduzida (1:10), foram posicionadas com distanciamento suficiente entre elas para que não houvesse sombreamento das paredes, garantindo as mesmas condições de implantação para todas as células. Além disso, esse procedimento facilitou a montagem do circuito para coleta de dados.

Para construir as células-teste foi necessária a realização de cortes em tijolos cerâmicos de vedação. Os tijolos foram cortados com o auxílio de uma serra com disco circular diamantado, sendo confeccionadas três células com dimensões de 0,326 m × 0,276 m por 0,29 m de altura, com 9 mm de espessura de parede. A cobertura dos telhados das células-teste foi feita com telha de fibrocimento, com inclinação de 10%, cujas dimensões foram 0,296 m × 0,246 m com 3 mm de espessura. Na Figura 1 estão ilustradas algumas etapas para a montagem das paredes das células-teste, onde podem ser observados alguns pedaços dos tijolos cortados no sentido longitudinal, sendo estes pedaços posteriormente selecionados e juntados com argamassa para a obtenção das paredes com espessura de 9 mm.

Figura 1: Montagem das paredes das células-teste: (A) realização de cortes nos tijolos cerâmicos, (B) aferição das dimensões dos pedaços cortados, (C) seleção dos pedaços com dimensões semelhantes, (D) montagem da parede da célula-teste por meio da união dos pedaços com argamassa.



Fonte: Imagem elaborada pelos autores. 2021.

Nas células-teste foram feitas aberturas de janela com dimensões de 0,12 m × 0,11 m, sendo o peitoril de 0,11 m. Essas medidas correspondem, em escala reduzida de 1:10, às medidas padrão de janelas disponíveis no mercado, em escala real de 1:1. Para cada célula-teste foi utilizado um tipo de vidro diferente. Os vidros foram fixados em uma moldura de madeira, evitando aberturas de ventilação para o interior das células-teste. Nesta pesquisa, as aberturas

das janelas foram feitas para a face Oeste. Nas células-teste também foram feitas aberturas para os vãos das portas de madeira MDF, revestidas na cor branca, com dimensões aproximadas de 0,08 m × 0,21 m × 6 mm. Neste caso, as aberturas dos vãos das portas estavam para a face Leste.

Os três vidros utilizados como janelas eram incolores, planos e possuíam dimensões aproximadas de 0,11 m × 0,05 m × 3 mm de espessura. Essas dimensões foram obtidas com base nas escalas em tamanho real (1:1), que seriam de 1,19 m × 0,56 m × 3 mm. A escolha dos tipos de vidro foi motivada pelo interesse em realizar um estudo comparativo entre o vidro base (*float*) e os vidros de segurança aramado e laminado. É importante ressaltar que os vidros de segurança são aqueles que minimizam os riscos em caso de acidentes e quebra, ao sofrerem algum impacto. Na Figura 2 são apresentadas as células-teste utilizadas neste estudo.

No interior de cada célula-teste foi instalado um sensor (Figura 3) capaz de coletar dados sobre as variações da temperatura e umidade relativa do ar, permitindo comparar o desempenho térmico entre as células-teste em função do tipo de vidro. Além disso, também foram utilizados sensores para as medidas da temperatura e umidade relativa do ar no ambiente externo. O sensor interno, instalado em um suporte de madeira no centro de cada célula-teste (Figura 3A), é do tipo DHT11, sendo comumente utilizado para registrar dados em estações meteorológicas. Para medidas de temperatura a faixa de detecção do sensor está compreendida entre 0 °C e 50 °C, com um desvio de ± 2 °C. Para medidas de umidade do ar a faixa de detecção está entre 20% a 90%, com um desvio de $\pm 5\%$ (AOSONG, 2021). As dimensões do sensor interno eram de 15,5 mm × 12 mm × 5,5 mm, com entrada de tensão podendo variar entre 3,3 Volts a 5,0 Volts. Para analisar as condições de temperatura e umidade do ar no ambiente externo foi utilizado outro sensor do tipo DHT11 (Figura 3B).

Figura 2: Apresentação das células-teste com os diferentes tipos de vidro

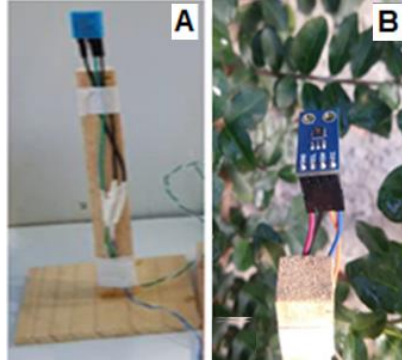


Fonte: Imagem elaborada pelos autores. 2021.

Além de uma fonte de energia elétrica para alimentação dos componentes e cabos para as conexões, alguns dispositivos foram essenciais para a coleta de dados. Um deles foi a placa SD card, com leitor e gravador em cartão de memória. Os dados de temperatura e umidade do ar, coletados em função do tempo, foram gravados em um cartão de memória, a cada intervalo de 10 segundos, 24 horas por dia, durante 03 dias com condições climáticas semelhantes, no mês de janeiro de 2020. Outro dispositivo foi a placa eletrônica de medição de tempo, conhecida como DS3231. Ela fornece datas e horários e possui uma bateria que permite manter os dados

temporais armazenados, de forma precisa, por um longo tempo (MAXIM INTEGRATE PRODUCTS, 2015).

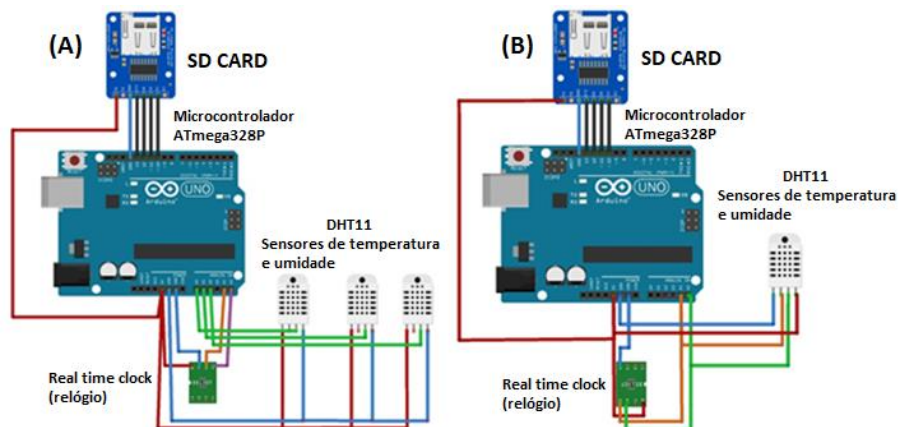
Figura 3: Sensores na base das células teste: (A) Interno e (B) externo.



Fonte: Imagem elaborada pelos autores. 2021.

Nas Figuras 4(A) e 4(B) são apresentados os esquemas das montagens dos sistemas eletrônicos de medição utilizados nas células-teste e no meio externo, respectivamente. Cada montagem contém o microcontrolador conectado aos elementos periféricos: sensores de temperatura e de umidade relativa do ar, placa de captura de dados por meio de um cartão de memória e placa de medição de tempo.

Figura 4: Esquema da montagem do sistema de medição utilizado e instalado nas células-teste (A) e no meio externo (B).



Fonte: Imagem elaborada pelos autores. 2021.

O microcontrolador utilizado (gerenciado por um software escrito em linguagem C) foi o ATmega328P, marca Atmel, que está inserido em uma plataforma de desenvolvimento denominada Arduino Uno, que é de fácil programação (possui versões residentes, simplificadas, dos compiladores C e C++) e manuseio.

2.2 DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO FÍSICO PARA ANÁLISE

A temperatura no interior das células-teste é muito dependente do fluxo de calor entre os ambientes interno e externo, uma vez que elas não possuem fontes internas de calor. Entre os materiais constituintes das células-teste, o vidro é o que mais contribui para o aquecimento interno dos ambientes nas edificações (CASTRO, 2006). A troca de calor entre os ambientes externo e interno através de materiais transparentes é diferente daquela que ocorre através de materiais opacos. A transferência térmica é lenta, no caso de paredes e teto, e mais rápida, no caso dos vidros.

A Figura 5 mostra um esquema ilustrativo do comportamento da energia solar incidente sobre a superfície de uma janela de vidro transparente, instalada em um determinado ambiente. Analisando o esquema nota-se que a energia incidente (I_o), terá uma parte refletida (I_ρ), outra transmitida (I_τ) e outra parte absorvida pelo vidro (I_α). A energia absorvida pelo vidro é reirradiada tanto para o exterior ($I_{\alpha e}$) quanto para o interior do ambiente ($I_{\alpha i}$).

De acordo com a Figura 5, é possível estabelecer algumas relações entre a energia solar incidente na superfície externa do vidro e as energias refletida, transmitida (nas faixas do visível e ultravioleta) e absorvida. A energia incidente (I_o) pode ser calculada pelo somatório das energias refletida (I_ρ), transmitida (I_τ) e absorvida (I_α), de acordo com a Equação 1.

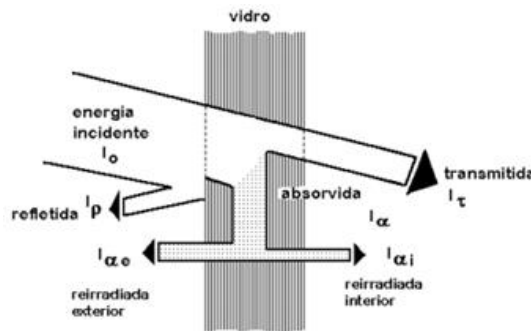
$$I_o = I_\tau + I_\rho + I_\alpha \quad (1)$$

A Equação 1 pode ser reescrita, resultando na Equação 2:

$$1 = \tau + \rho + \alpha \quad (2)$$

onde: $\tau = \text{transmitância} = I_\tau / I_o$, $\rho = \text{refletância} = I_\rho / I_o$ e $\alpha = \text{absortância} = I_\alpha / I_o$.

Figura 5: Esquema ilustrativo do comportamento da energia solar incidente sobre uma superfície transparente. A energia incidente, I_o , terá uma parte refletida, I_ρ , outra transmitida, I_τ , e outra absorvida, I_α . A energia absorvida é reirradiada para o interior, componente $I_{\alpha i}$, e para o exterior, componente $I_{\alpha e}$.



Fonte: Croiset (adaptada- 1970)

De forma análoga, é possível calcular a energia absorvida (I_α) pelo somatório das energias reirradiadas nos ambientes exterior ($I_{\alpha e}$) e interior ($I_{\alpha i}$), de acordo com a Equação 3.

$$I_\alpha = I_{\alpha i} + I_{\alpha e} \quad (3)$$

A energia que atravessa o vidro provoca iluminação e aquecimento do ambiente interno, ocasionando efeito estufa. Por outro lado, a energia absorvida pelo vidro contribui para o aumento da temperatura nas superfícies interna e externa.

No caso das paredes e teto, a troca ocorre por condução entre as superfícies interna e externa. As superfícies aquecidas, tanto das paredes quanto das janelas, tendem a entrar em equilíbrio térmico, principalmente por convecção, com os meios os quais estão em contato.

O processo de irradiação é importante para o rápido equilíbrio térmico entre as superfícies do ambiente interno, uma vez que o fluxo radiante é proporcional à quarta potência da temperatura, conforme a lei de Stefan Boltzmann (INCROPERA et al., 2008). Os processos predominantes de transmissão de calor, no caso dos ambientes fechados com vidro, são a convecção e a condução. A convecção obedece a lei de Newton e a condução obedece a lei de Fourier (OLIVEIRA, 2015).

No caso unidimensional, considerando a direção x , a lei de Fourier para a condução de calor assume a forma seguinte, descrita pela Equação 4 (INCROPERA et al., 2008):

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

onde: $\dot{q}$ = a taxa de transferência de calor por unidade de área (W / m^2), $\frac{dT}{dx}$ = variação da temperatura com a posição x ou gradiente de temperatura em uma dimensão (K/m) e λ = condutividade térmica do material ($W / m \cdot K$).

Na Figura 6 é apresentado o processo de transferência de calor através de uma placa plana, de área A e condutividade térmica λ . Nesse caso, admite-se um processo de condução no regime estacionário, com distribuição linear de temperatura. Logo, a transferência de calor em uma placa plana de espessura Δx pode ser expressa pela seguinte Equação 5:

$$\dot{Q} = A \cdot \dot{q} \quad (5)$$

onde: $\dot{Q}$ = taxa de transferência de calor (W), A = área da superfície.

Para analisar o fluxo de calor, é possível reescrever a Equação 5, utilizando a lei de Fourier, para a forma representada na Equação 6:

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot A = A \frac{\lambda}{\Delta x} \Delta T = AU \Delta T \quad (6)$$

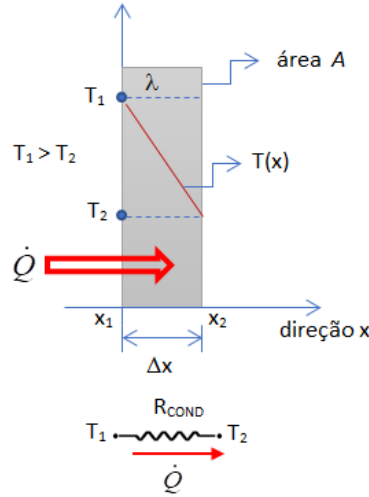
onde: $U = \frac{\lambda}{\Delta x}$ = coeficiente global de transmissão de calor ($W / m^2 \cdot K$).

A partir da Equação 6 também podem ser obtidas as expressões que definem a resistência térmica global por unidade de área ($\bar{R}$), em K/W , e a resistência global (R), em Km^2/W , conforme mostra as Equações 7 e 8, respectivamente.

$$\bar{R} = \frac{1}{AU} = \frac{1}{A} \frac{\Delta x}{\lambda} \quad (7)$$

$$R = \bar{R}A = \frac{1}{U} = \frac{\Delta x}{\lambda} \quad (8)$$

Figura 6: Esquema do processo de transferência de calor em uma placa plana. $\dot{Q}$ = taxa de transferência de calor; A = área da superfície; Δx = espessura; T_1 e T_2 são as temperaturas externa e interna, respectivamente, sendo ($T_1 > T_2$). $T(x)$ = distribuição linear de temperatura; R_{COND} = resistência térmica condutiva.



Fonte: Imagem elaborada pelos autores. 2021.

Substituindo a Equação 7 na Equação 3, tem-se a seguinte Equação 9, a qual foi previamente proposta por Moreira (2016):

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\bar{R}} \quad (9)$$

Na Figura 7 é apresentado o processo de convecção, descrito pela Lei de resfriamento de Newton. A partir desta figura é possível estabelecer as seguintes Equações 10 e 11:

$$\dot{Q} = Ah(T_w - T_\infty) \quad (10)$$

$$\Delta T = (T_w - T_\infty) = \frac{1}{Ah} \dot{Q} = \bar{R}_{CONV} \dot{Q} \quad (11)$$

onde: h = coeficiente convectivo [W/m^2K]

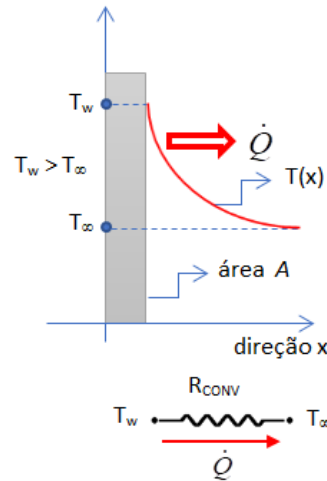
Desta forma, a resistência térmica convectiva por unidade de área ($\bar{R}_{CONV}$), em K/W , é definida pela Equação 12.

$$\bar{R}_{CONV} = \frac{1}{Ah} \quad (12)$$

Já a resistência térmica convectiva R_{CONV} é definida pela Equação 13.

$$R_{CONV} = \bar{R}_{CONV} A = \frac{1}{h} \quad (13)$$

Figura 7: Transferência de calor, $\dot{Q}$, por convecção, entre uma das faces de uma placa condutora plana, de área A , espessura Δx , temperatura T_w , e um meio fluido de coeficiente convectivo h e resistência térmica R_c , à temperatura T_∞ .

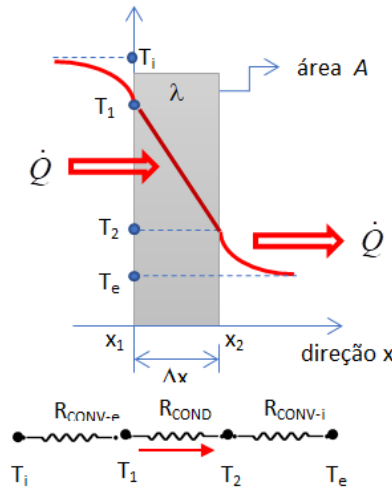


Fonte: Imagem elaborada pelos autores. 2021.

Na Figura 8 é apresentado um esquema representativo onde são considerados os processos de condução e convecção nas duas faces da placa. Desta forma, a resistência térmica global (soma das resistências térmicas da placa e dos meios fluidos) pode ser obtida por meio da Equação 14.

$$\Delta T = T_i - T_e = \frac{1}{A} \left(\sum_j R_j \right) \dot{Q} = \frac{1}{A} (R_{CONV,i} + R_{COND} + R_{CONV,e}) \dot{Q} \quad (14)$$

Figura 8: Processos de condução e convecção através de uma placa condutora: Δx = espessura; A = área de cada face em contato com os meios fluidos interno (à temperatura T_i) e externo (à temperatura T_e); $R_{CONV,i}$ = resistência térmica do meio fluido interno; $R_{CONV,e}$ = resistência térmica do meio fluido externo; R_{COND} = resistência da placa sólida.



Fonte: Imagem elaborada pelos autores. 2021.

A Equação 14 também pode ser reescrita na forma da Equação 15.

$$\dot{Q} = \frac{A \cdot \Delta T}{R_{CONV,i} + R_{COND} + R_{CONV,e}}, \quad \dot{Q} = A \left(\frac{\Delta T}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} \right) = AU \Delta T = \frac{A \Delta T}{R} \quad (15)$$

Portanto, a resistência térmica global será igual a $R = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{d}{\lambda}$ e o coeficiente global de transferência de calor, U , será igual ao inverso de R .

Para coberturas de vidro com espessura fina, da ordem de milímetros, a condução térmica pode ser desprezada. Nesse caso, a resistência térmica global pode ser expressa pela Equação 16, ou ainda, reescrita na forma da Equação 17.

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} = \frac{h_i + h_e}{h_i h_e} \quad (16)$$

$$\frac{U}{h_e} = \frac{h_i}{h_i + h_e} \quad (17)$$

Giovani (1981) relata que a porcentagem da transmissão solar direta que ocorre através do vidro somada à parcela da energia absorvida e reirradiada para o interior é denominada fator solar. O fator solar (FS) pode ser calculado pelo meio da Equação 18.

$$FS = \tau + \alpha(U/h_e) \quad (18)$$

onde: FS = fator solar, τ = transmitância, α = absorvância, U = transmitância térmica total ($W/^\circ C m^2$), h_e = coeficiente superficial externo de transmissão de calor ($W/^\circ C m^2$).

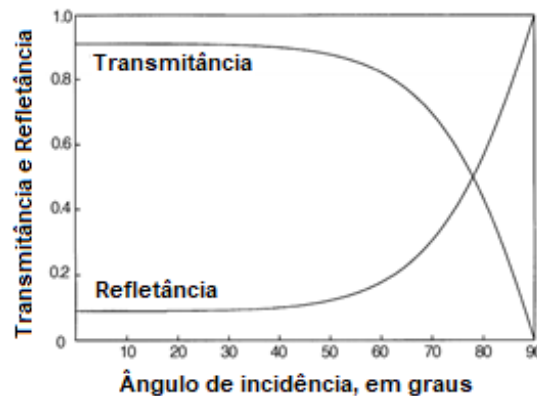
A transmissão através do vidro depende de algumas características, além da espessura. Entre elas se destacam: a forma da superfície, o índice de refração (em torno de 1,5 para vidros comuns), a composição química e o ângulo de incidência da radiação em relação à direção normal à superfície (CASTRO, 2006). Para vidros comerciais com forte seleção espectral a transmitância diminui um pouco para ângulos maiores que 45° e diminui bastante para ângulos superiores a 60° , como pode ser observado na Figura 9, onde transmitância e refletância variam em função do ângulo de incidência (θ).

A adição de óxidos metálicos, ou sais metálicos, na composição do vidro (usualmente depositados numa das faces do vidro plano), além de alterar sua cor e resistência, afeta a absorção de radiação em regiões do espectro solar, quais sejam, ultravioleta, visível e infravermelho.

Segundo Castro (2006), para o conforto térmico e visual, e também de acordo com os efeitos físicos e biológicos relativos a cada faixa do espectro solar, um vidro ideal deveria apresentar uma alta transmissão da radiação visível, com baixa transmissão do ultravioleta (responsável pelo desbotamento nas cores de objetos) e do infravermelho (que é uma fonte de calor).

Caram (1996) e Caram (1998) relatam valores de transmitância com incidência normal, para cada região do espectro solar, em diversos tipos de vidros e películas poliméricas. Entretanto, esses mesmos valores de transmitância foram observados por Santos (2002) para ângulos de incidência variados.

Figura 9: Variação da transmitância (τ) e da refletância espectral (ρ) em função do ângulo de incidência da luz solar em vidros comerciais fortemente seletivos.



Fonte: adaptado de (ASHRAE, 2001, p. 30.19)

Outro estudo realizado por Ashrae (2001) relata que a fração da energia solar incidente, absorvida e reirradiada para o interior e denominada de N_i , pode ser considerada de valor igual a um terço, como mostra a Equação (19).

$$N_i = (U/h_e) = 1/3 \quad (19)$$

No caso, o valor encontrado por meio da Equação 19 considera o ar em repouso (convecção natural) do lado interno da janela de vidro e com velocidade do vento de 6,67 m/s do lado externo da janela. Esta análise também considera $h_i = 8,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $h_e = 22,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Com essa aproximação, o fator solar FS pode ser expresso pela Equação 20.

$$FS = \tau + (1/3)\alpha \quad (20)$$

Portanto, conhecendo os valores de N_i , h_i e h_e , o fator solar pode ser calculado para cada tipo de vidro. Conhecer a fração reirradiada para o interior é importante para o controle do ganho de calor, que depende da transmissão e da absorção da radiação através dos vidros.

Ashrae (2001) ressalta ainda que o ganho de Calor Total, $q \text{ (W/m}^2\text{)}$, pode ser obtido pela soma do produto entre dois termos. No primeiro termo está o produto entre o fator solar e a radiação solar incidente. Já o segundo termo consiste no produto entre a transferência de calor e a diferença de temperatura entre o ar exterior e o interior, com mostra a Equação 21. Nesta expressão, o termo $U(T_e - T_i)$ se refere às trocas de calor por diferença de temperatura e representa ganho de calor para $T_e > T_i$ e perda para $T_i > T_e$.

$$q = FS \cdot I_0 + U \cdot (T_e - T_i) \quad (21)$$

onde: FS = fator solar, I_0 = energia incidente (adota-se 1353 W/m^2 , conforme Duffie e Beckman, 1980), U = transmitância térmica do vidro ($\text{W/}^\circ\text{C m}^2$), $(T_e - T_i)$ = diferença entre as temperaturas do ar externo e interno ($^\circ\text{C}$).

Pontando, os aspectos abordados acima sugerem que para fachadas em regiões quentes e expostas diretamente à radiação solar, o vidro ideal deverá apresentar boa transmitância na região do visível e pouca na do infravermelho. Para as condições climáticas predominantes no

país, o recomendável é admitir a luz, que possui baixa absorbância no visível, e refletir o calor, que consiste na alta absorbância na região do infravermelho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios da temperatura e umidade relativa do ar, os quais foram medidos na parte externa das células confeccionadas em escala de 1:10. Os dados coletados na parte externa das células mostram que houve pouca variação na temperatura e umidade, máximas e mínimas, conforme sugerem os valores de desvio padrão.

TABELA 1: Variação da temperatura e umidade na parte externa das células

Horários entre 00h00min e 23h59min				
Dias	T _{mín} (°C)	T _{máx} (°C)	U _{mín} (%)	U _{máx} (%)
1	20,00	41,00	17,00	86,00
2	20,00	39,00	21,00	84,00
3	20,00	41,00	22,00	85,00
Média	20,00	40,33	20,00	85,00
Desvio	0,00	1,15	2,64	1,00

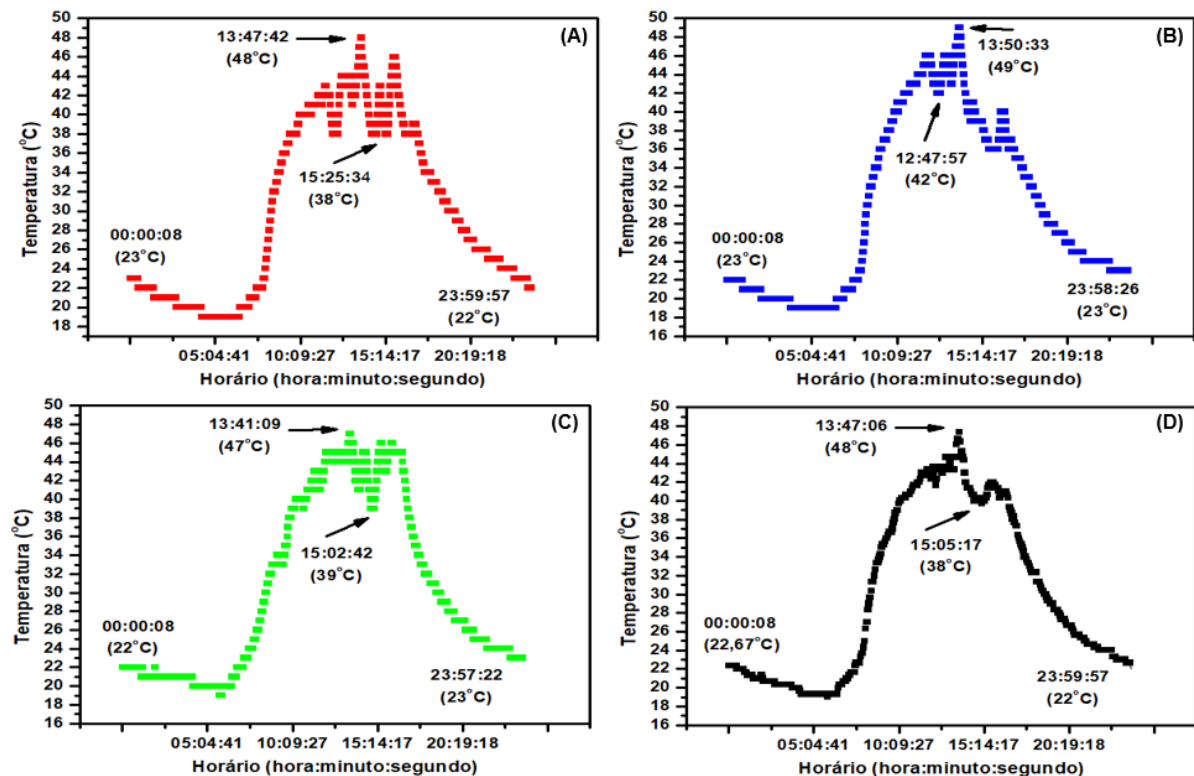
Fonte: Autoria Própria

Além disso, os valores de desvio padrão também concordam com os erros dos sensores utilizados para medidas de temperatura e umidade, que são de ± 2 °C e $\pm 5\%$, respectivamente.

Por outro lado, o comportamento da temperatura interna na célula com vidro aramado está apresentado na Figura 10. Analisando o resultado é possível perceber que a temperatura interna varia de forma semelhante em função dos horários investigados em três dias de experimento, conforme ilustrado nas Figuras 10(A), (B) e (C). A partir dessas figuras foi obtida uma curva do comportamento médio da temperatura na célula, como mostrado na Figura 10(D). As setas indicativas situam os valores máximos e mínimos, bem como o intervalo dos horários onde houve uma maior variação de temperatura.

A temperatura máxima atingida na célula com vidro aramado é, em média, de 48°C, sendo esta temperatura observada nos horários compreendidos entre 13h40min e 15h00min. Neste intervalo, também se percebe uma variação no valor da temperatura máxima, que pode oscilar entre 38 °C e 48 °C. Esse fato pode estar associado às rajadas de vento que podem ocorrer na parte externa da célula, as quais podem, num intervalo de 80 minutos, decrescer a temperatura em 10 °C. Depois disso, a temperatura interna apresenta uma diminuição, até alcançar, em média, 22 °C, próximo às 00h00min.

Figura 10: Comportamento da temperatura interna em função do horário na célula com vidro aramado: (A) primeiro, (B) segundo e (C) terceiro dia de coleta de dados e (D) curva de variação média da temperatura.



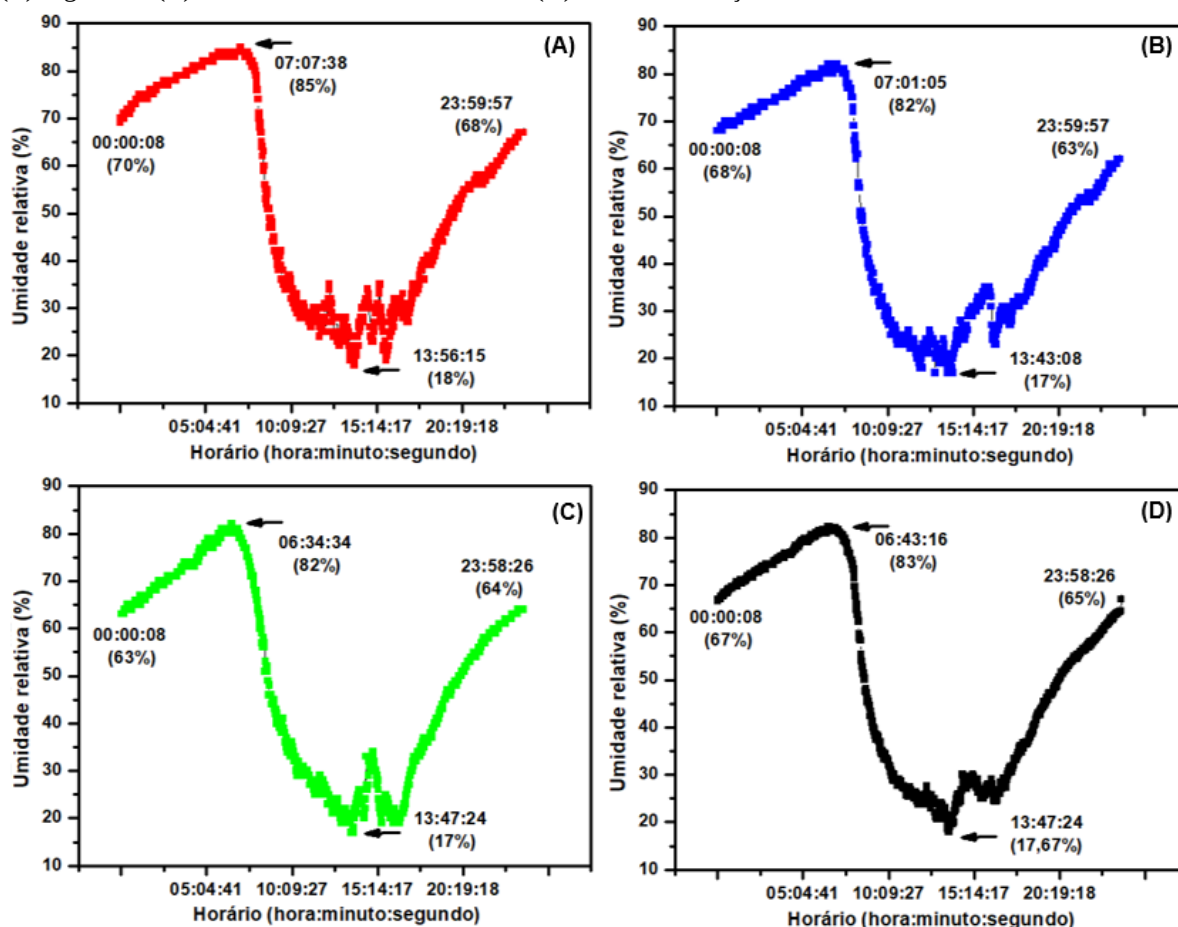
Fonte: Resultado da pesquisa. 2021.

Na Figura 11 é mostrado o comportamento da umidade relativa do ar, aferida no interior da célula com vidro aramado. De forma análoga ao observado nas curvas de temperatura, a umidade interna também varia de forma semelhante em função dos horários investigados nos três dias de experimento, conforme ilustrado nas Figuras 11(A), (B) e (C). A curva do comportamento médio da umidade está apresentada na Figura 11(D). Os resultados mostram que os valores de umidade relativa do ar na parte interna da célula variam entre 17% e 83%, sendo os menores valores de umidade observados nos horários compreendidos entre 13h00min e 17h30min. Estes resultados concordam com os valores máximo de temperatura apresentados na Figura 10, os quais foram constatados dentro do mesmo intervalo de horários.

As curvas para análise da temperatura e umidade relativa do ar nas células com vidros *float* e laminado, também apresentaram comportamentos semelhante àqueles apresentados nas Figuras 10 e 11, sendo constatadas apenas mudanças nos valores máximos e mínimos. Na Tabela 2 estão sumarizados os valores encontrados nas células com a instalação dos vidros aramado, *float* e laminado.

Entre 13h40min e 15h00min, a temperatura máxima atingida é, em média, de 46,33 °C para a célula com vidro laminado e de 46,00 °C para a célula com vidro *float*. No mesmo intervalo, percebem-se também variações nos valores das temperaturas máximas, oscilando num intervalo de 11 °C (35,33 °C a 46,33 °C) para a célula com vidro laminado e 8,67 °C (37,33 °C a 46,00 °C) para a célula com vidro *float*. Esse fato, que pode estar associado às rajadas de vento, é o mesmo relatado para a célula com vidro aramado. Depois disso, próximo às 00h00min, a temperatura interna apresenta uma diminuição, até alcançar, em média, 21,66 °C para as células com vidro aramado e com vidro *float*.

Figura 11: Comportamento da umidade relativa do ar no interior da célula 1:10, com vidro aramado: (A) primeiro, (B) segundo e (C) terceiro dia de coleta de dados, (D) curva de variação média da umidade interna.



Fonte: Resultado da pesquisa. 2021.

Novamente, de forma análoga ao observado nas curvas de temperatura, nos horários em que foram realizadas as investigações, nos três dias de experimento nas células com vidros laminado e *float* a umidade interna varia em função do tempo. Os resultados mostram que os valores de umidade relativa do ar na parte interna da célula variam, em média, entre 16% e 82% para a célula com vidro laminado e entre 16% e 81% para a célula com vidro *float*. Os valores mínimos de umidade são observados entre 14h20min e 14h40min para a célula com vidro *float* e entre 13h45min e 14h para a célula com vidro laminado.

Na Figura 12 temos as temperaturas máximas, em média, registradas nas células com vidro aramado, laminado e *float*. As diferenças entre as temperaturas máximas atingidas utilizando-se os vidros laminado e *float*, em relação àquela atingida utilizando-se o vidro aramado, são de 1,67 °C e 2,00 °C, respectivamente, ou seja, praticamente iguais. Isso nos permite, dentro da margem de erro, dizer que os vidros laminado e *float* têm performances semelhantes, sendo as temperaturas máximas atingidas, praticamente as mesmas.

TABELA 2: Variação da temperatura e umidade interna nas células

Vidro Aramado				
Dias	T _{mín} (°C)	T _{máx} (°C)	U _{mín} (%)	U _{máx} (%)

1°	23,00	48,00	18,00	85,00
2°	23,00	49,00	17,00	82,00
3°	22,00	47,00	17,00	82,00
Média	22,67	48,00	17,67	83,00
Desvio	0,58	1,00	0,58	1,73

Vidro Laminado

Dias	T _{mín} (°C)	T _{máx} (°C)	U _{mín} (%)	U _{máx} (%)
1°	21,00	46,00	17,00	85,00
2°	22,00	48,00	16,00	82,00
3°	22,00	45,00	20,00	80,00
Média	21,66	46,33	16,00	82,33
Desvio	0,58	1,53	0,00	2,52

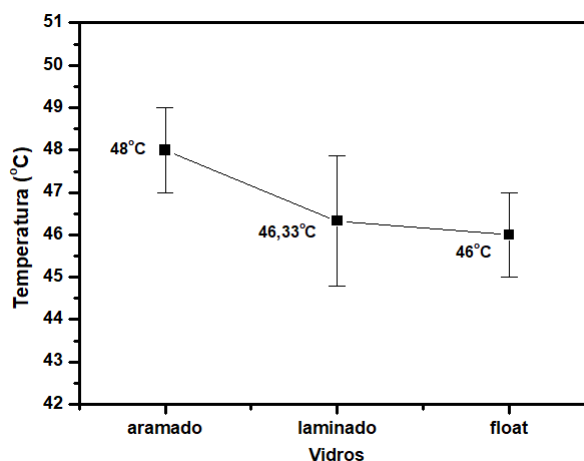
Vidro Float

Dias	T _{mín} (°C)	T _{máx} (°C)	U _{mín} (%)	U _{máx} (%)
1°	21,00	46,00	16,00	80,00
2°	22,00	47,00	16,00	82,00
3°	22,00	45,00	16,00	82,00
Média	21,66	46,00	16,00	81,33
Desvio	0,58	1,00	0,00	1,15

Fonte: Resultado da pesquisa. 2021.

Na Figura 13 temos as temperaturas máximas registradas nas células com vidro aramado, laminado e *float*. Os vidros laminado e *float* têm um comportamento diferente do vidro aramado, propiciando temperaturas máximas um pouco menores.

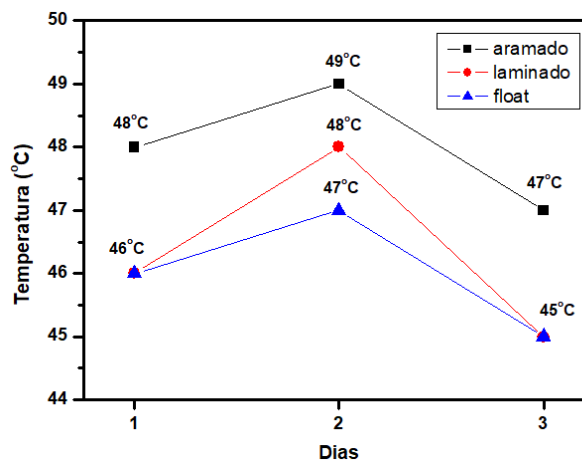
Figura 12: Temperaturas máximas, em média, registradas para as células com vidros aramado, laminado e *float*, nos 3 dias de observação.



Fonte: Resultado da pesquisa. 2021.

Os valores de temperatura e umidade do ar medidos no meio externo, sejam em valores médios ou absolutos, são diferentes daqueles observados no interior das células-teste, onde as temperaturas são um pouco maiores e os percentuais de umidade um pouco menores. As células-teste são fechadas e não sofrem ação direta do vento externo, o que constitui um fator determinante para que ocorra essa diferença. No ambiente interno às células-teste, ocorre o efeito estufa, que contribui para um maior aquecimento e diminuição da umidade.

Figura 13: Temperaturas máximas registradas para as células com vidros aramado, laminado e *float*, nos 3 dias de observação.



Fonte: Resultado da pesquisa. 2021.

Em relação ao conforto térmico, pode-se considerar que a performance dos vidros laminado e *float* é ligeiramente melhor que a do vidro aramado, pois, nos dias muito quentes, deixam a temperatura um pouco mais baixa. Do ponto de vista financeiro, o vidro *float* é o de menor preço e, no caso de uma aplicação que não demande características especiais do vidro utilizado no fechamento (maior resistência a impactos, maior proteção em caso de quebra, diminuindo riscos de ferimentos), ele é a melhor indicação.

4 CONCLUSÃO

O estudo de ganho de calor e desempenho térmico dos vidros em células-teste com escala 1:10 foi satisfatório, uma vez que ocorreram diferenças entre as grandezas medidas para os três tipos de vidros. Os resultados obtidos sugerem uma viabilidade de realização desse tipo de estudo em células-teste com escala reduzida.

Os dados coletados, tanto na parte externa às células como na parte interna, mostram que houve pouca variação na temperatura e umidade, máximas e mínimas, conforme sugerem os valores de desvio padrão. Além disso, as temperaturas e umidades nas partes interna e externa variam de forma semelhante em função dos horários investigados em três dias de experimento, comportamento que reforça a viabilidade do uso de células-teste com escala reduzida, para esse tipo de estudo.

De acordo com o modelo físico apresentado, para fachadas em regiões quentes e expostas diretamente à radiação solar, o vidro ideal deverá apresentar boa transmitância na região do visível e pouca na do infravermelho. Nas temperaturas médias, o vidro laminado superou o float e o aramado em relação ao aquecimento do ambiente. Porém, analisando as temperaturas máximas e mínimas, num intervalo de 24 horas, o vidro float supera (em relação ao aquecimento do ambiente) os outros dois. Em relação à umidade do ar, o vidro *float* apresenta valores ligeiramente menores, nos horários em que a temperatura atinge valor máximo, caracterizando uma boa resposta em relação ao conforto. Do ponto de vista financeiro, o vidro *float* é o de menor preço e, no caso de uma aplicação em fechamentos que não

demandem características especiais do vidro (maior resistência a impactos, maior proteção em caso de quebra), ele é a melhor indicação.

REFERÊNCIAS

AOSONG. **DHT11 Product Manual**. Disponível em <www.aosong.com>. Acessado em: Janeiro 2021.

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

BRASIL, Ministério das Minas e Energia – MME. Lei nº 10.295 de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, Seção 1. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/10295.htm#:~:text=LEI%20No%2010.295%2C%20DE%2017%20DE%20OUTUBRO%20DE%202001.&text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional,Art.> Acessado em: Janeiro 2021.

BRASIL. Ministério das cidades. Programa Minha Casa Minha Vida – FAR – Especificações mínimas. 2011. Disponível em <<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNH/ArquivosPDF/Especificacoes/EspecifCasaItem721AnexoIPortariaN465.pdf>> Acessado em: Janeiro 2020.

CARAM de Assis, R. M. **Vidros e o Conforto Ambiental: Indicativos para o emprego na construção civil**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 131p., 1996.

CARAM de Assis, R. M. **Caracterização Ótica de Materiais Transparentes e sua Relação com o Conforto Ambiental**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 165p., 1998.

CASTRO, Adriana Petito de Almeida Silva. Desempenho térmico de vidros utilizados na construção civil: estudo em células-teste. 2006. 239 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas- SP, 2006.

CEBRACE. **Os tipos de vidro: Conheça os tipos de vidros e suas características**, 2021. <https://www.cebrace.com.br/#!/enciclopedia/interna/os-tipos-de-vidro>

COSTA, Angelina Dias Leão. Análise bioclimática e investigação do conforto térmico em ambientes externos: Uma experiência no bairro de Petrópolis em Natal/RN. Natal-RN.2003. Disponível em < https://repositorio.ufrn.br/handle/12345_6789/12411> Acessado em: Janeiro 2021.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley

Interscience Publication, USA, 1980.

GIVONI, B. Man, **Climate and Architecture**. London: Elsevier, 1981.

INCROPERA, F.P., BERGMAN, T.L., DEWITT, D.P., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, 643p., 2008.

LAMBERTS, R; DUTRA, L; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: PW Editores. 2013.

MAXIM INTEGRATE PRODUCTS. **DS3231 - Extremely Accurate I2C-Integrated**, 2015.

MOREIRA, J. R. S. **PME 2361 – Processos de Transferência de Calor**. Notas de aula – Condução, 2016. Disponível em <http://www.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2014/11/apostila.pdf> (aceso em 22/03/2021).

OLIVEIRA, P. J. **Notas para Transmissão de Calor**. Departamento de Engenharia Electromecânica, UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR – UBI, 2015. Disponível em <<http://webx.ubi.pt/~pjpo/TransCalor2015.pdf>. Acesso em 25/01/202> Acessado em: Janeiro 2021.

RODRIGUES, E. **Conforto Térmico das Construções**. Disponível em <https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/c/c6/Transmissao_de_Calor_em_Edificacoes.pdf/> Acessado em: Janeiro 2021.

SANTOS, J.C.P. **Avaliação do Desempenho Térmico e Visual de Elementos Transparentes Frente à Radiação Solar**. Tese (Doutorado). Curso de Pós- Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SANTOS, J. P; RORIZ, M. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 149-161, jan./mar. 2012.