



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE VIDROS REFLETIVOS PIROLÍTICOS EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS ATRAVÉS DE MEDIÇÕES EM CÉLULAS-TESTE

Adriana P. A. S. Castro (1); Lucila C. Labaki (1); Viviane A. Amo (1); Rosana M. Caram (2)

(1) Departamento de Arquitetura e Construção – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, Brasil – e-mail: dripasc@uol.com.br, lucila@fec.unicamp.br, v_amo@yahoo.com.br

(2) Departamento de Arquitetura e Urbanismo – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP, Brasil - e-mail: rcaram@sc.usp.br

RESUMO

Uma das funções dos fechamentos exteriores de uma edificação é controlar de forma adequada as interferências do meio externo, visando proporcionar um melhor condicionamento ambiental. As áreas envidraçadas, ao serem utilizadas nesses fechamentos, ocupam um importante papel, em se tratando de conforto térmico, pois, ao receberem radiação solar, contribuem consideravelmente para a elevação da temperatura no ambiente interno. Portanto, as necessidades de iluminação e contato visual com o exterior devem ser conjugadas com os requisitos para conforto térmico, de modo que se tenha um melhor aproveitamento da energia solar incidente. Há diferentes tipos de vidros disponíveis no mercado atualmente, representando diferentes possibilidades de controle da radiação solar, em função da transparência seletiva aos comprimentos de onda. O desempenho da janela depende também de seu dimensionamento e orientação da fachada. O vidro refletivo, objeto deste trabalho, é um tipo de material transparente de utilização em larga escala, atualmente. Com a função de filtrar a radiação solar através da reflexão da radiação em todas as suas freqüências, de forma seletiva, os vidros refletivos podem ser grandes aliados do conforto térmico e visual e da eficiência energética nas edificações. Neste trabalho, estudam-se as temperaturas superficiais externas e internas de alguns vidros refletivos pirolíticos disponíveis no mercado, através de medições em células-teste. Os vidros estudados são: antélio verde, antélio prata, antélio bronze e o vidro reflectafloat. Esses vidros foram analisados por um período de uma semana (cada tipo), separadamente em fachadas Norte e Oeste. O objetivo de se analisar as temperaturas superficiais externas e internas é verificar o quanto a espessura e a composição do vidro interferem nas temperaturas superficiais e consequentemente no ganho solar. Os resultados mostram diferenças significativas entre as temperaturas, com a interna sempre maior que a externa.

Palavras-chave: vidro pirolítico, desempenho térmico, temperatura superficial.

1 INTRODUÇÃO

Uma das funções dos fechamentos exteriores de uma edificação é controlar de forma adequada as interferências do meio externo, visando proporcionar um melhor condicionamento ambiental. As áreas envidraçadas, ao serem utilizadas nesses fechamentos, ocupam um papel importante quando se trata de conforto térmico, pois, ao receberem radiação solar, contribuem consideravelmente para a elevação da temperatura no ambiente interno. Portanto, as necessidades de iluminação e contato visual com o exterior, às quais essas superfícies transparentes visam atender, devem ser conjugadas com os requisitos para conforto térmico, de modo que se tenha um melhor aproveitamento da energia solar incidente, resultando em eficiência energética.

Os materiais transparentes usualmente empregados em fachadas são constituídos por vidros e películas poliméricas, as quais costumam ser aplicadas sobre áreas já instaladas. Esses materiais podem representar uma opção em termos de controle da radiação solar, porém esse controle é de atuação limitada. Se uma área transparente for mal dimensionada ou posicionada de forma errada pode provocar um calor excessivo no ambiente.

Conforme Rivero (1986), os fechamentos transparentes são um ponto fraco da envoltória de um edifício, apresentando uma série de características que, se não observadas no projeto, podem trazer problemas sérios de conforto térmico no ambiente construído, possuem elevada transmitância solar, obrigando a aumentar o dimensionamento dos equipamentos condicionadores de ar, principalmente no verão, implicando em maiores despesas de instalação e funcionamento, além do excessivo consumo de energia.

O mercado oferece vários tipos de materiais transparentes, em cores diversas, permitindo uma grande liberdade no projeto. Porém, o que se observa é que a estética frequentemente norteia a escolha do material, não se levando em consideração as características óticas e o comportamento desses materiais frente à radiação solar.

À medida que a radiação solar penetra a atmosfera terrestre, sua intensidade diminui, devido aos efeitos de absorção, reflexão, refração e difusão pelas partículas. A distribuição espectral também é alterada, pois a absorção da radiação na atmosfera é seletiva para diferentes comprimentos de onda: a radiação ultravioleta é absorvida pelo ozônio, ao passo que a infravermelha é absorvida pelo vapor de água e dióxido de carbono. A reflexão da radiação, predominante nas gotículas de água, independe do comprimento de onda. Já a refração e a difusão são seletivas, dependendo das dimensões das partículas, tendo lugar quando as dimensões são da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda. É a difusão da radiação que permite a iluminação diurna mesmo na ausência de luz solar direta (GIVONI, 1981).

Ao contrário do que acontece com a transferência térmica pelas paredes, o ingresso de energia devido à penetração da radiação solar pelos vidros das janelas, e sua consequente transformação em calor dentro do ambiente, é de efeito imediato. O aquecimento excessivo devido a superfícies transparentes é causado pelo efeito estufa. Os vidros possuem uma característica específica responsável por tal efeito, pois são transparentes à radiação de onda curta e opacos à radiação de onda longa. A maior parte da radiação solar incidente, que é transmitida diretamente por esses materiais, é absorvida pelas superfícies internas e objetos, aquecendo-os. Devido a esse aquecimento, a emissão de radiação térmica ocorre com grande intensidade, sendo proporcional a T^4 ; pois a densidade do fluxo de radiação (q_r) emitido por uma superfície a temperatura absoluta T é dado por:

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann (INCROPERA & DE WITT, 1990) e ε é a emissividade da superfície.

Dessa forma, os vidros funcionam como “armadilhas” para o calor, proporcionando um superaquecimento do ambiente interno. Em países de climas frios essa técnica é muito útil para captar a energia solar durante o dia e aproveitá-la à noite.

No Brasil, no entanto, é imprescindível evitar o excesso de radiação solar sem diminuir o aproveitamento de iluminação natural. O incremento da carga térmica interna devido aos ganhos por

radiação solar pode ser muito grande em alguns casos, levando a necessidade de equipamentos com grande potência de refrigeração. Este é o caso de muitos edifícios brasileiros que utilizam fachadas-cortina. Em sua maioria, os vidros recobrem também suas vigas periféricas, formando um colchão de ar não ventilado. É nesse ambiente – parede de alvenaria, ar e vidro – que se verifica o efeito estufa com grande intensidade e onde a temperatura pode chegar a 70°C (MACEDO FILHO, 1999).

Há outro aspecto que deve ser observado com relação aos materiais transparentes e que se refere às propriedades óticas da radiação solar transmitida para o ambiente interno. A partir da radiação solar incidente no vidro, uma parcela é absorvida, outra refletida e a restante, maior, transmitida diretamente ao ambiente interno. Da parcela absorvida, uma porcentagem é reirradiada para o interior do ambiente, e o restante para o exterior. Essa porcentagem depende da transmitância térmica total (fator U), bem como dos coeficientes superficiais interno e externo de transmissão de calor (h_i e h_e). As proporções correspondentes à energia diretamente absorvida (I_a), refletida (I_r) e transmitida (I_t) variam de acordo com o comprimento da onda incidente, além de estarem também relacionadas com a espessura, a cor e o índice de refração do vidro e o ângulo de incidência da radiação (SCHOLZE, 1980). As razões entre cada uma destas três parcelas no fluxo incidente definem a absorância, refletância e transmitância do vidro.

Em relação à influência da espessura na transmissão, quanto maior a espessura de um vidro, menor a transmissão, devido à absorção que ocorre no material. A transmissão direta através de um envidraçado pode ser reduzida se este possuir alguma rugosidade, difundindo a radiação incidente.

A absorção é função da espessura e da composição do vidro. A adição de óxidos à composição causa absorção para determinadas regiões do espectro solar, podendo absorver seletivamente na região do ultravioleta, do visível e do infravermelho.

Um vidro ideal para climas quentes seria, dentro do conceito da eficiência energética e de acordo com os efeitos físicos e biológicos relativos a cada faixa do espectro solar, o vidro com alta transmissão da radiação visível, proporcionando conforto visual, e baixa transmissão do ultravioleta (responsável pelo desbotamento) e infravermelho (fonte de calor).

Neste trabalho estuda-se o comportamento de vidros refletivos que, com a função de filtrar os raios solares através da reflexão da radiação em todas as suas freqüências, de forma seletiva, podem ser grandes aliados do conforto ambiental e da eficiência energética nas edificações. Além de controlar a insolação, esses vidros proporcionam maior conforto visual.

Desenvolvido com tecnologia que garante o controle eficiente da intensidade da luz e do calor transmitidos para os ambientes internos, através das fachadas e coberturas, o vidro refletivo requer, para sua especificação, que o projetista conheça suas características de desempenho ótico e leve em consideração itens como transmissão de luz, calor, refletância, cor do vidro, região em que se localiza, orientação da fachada e finalidade da edificação. Sem esses e outros estudos, há riscos de o projeto apresentar problemas como claridade desconfortável e aquecimento do ambiente.

O processo pirolítico consiste na deposição de óxidos metálicos diretamente sobre o vidro em alta temperatura durante o processo de produção. A deposição da camada refletiva durante a fabricação do vidro garante durabilidade e homogeneidade da camada refletida. Neste processo, a camada refletiva é aplicada na face superior do vidro enquanto a placa ainda não esfriou, ou após sofrer novo aquecimento. Como a chapa de vidro está quente e com a superfície em estado plástico, os óxidos penetram um pouco na superfície e, ao resfriar o vidro, a camada refletiva torna-se bem resistente.

Os vidros refletivos pirolíticos possuem grande estabilidade da camada óxida e resistência ao desgaste, podendo-se usar a face refletiva voltada para o exterior. Neste caso, o desempenho do vidro como filtro solar é menor.

O vidro refletivo pode ser fabricado a partir do vidro plano monolítico, incolor ou colorido, que recebe numa de suas faces uma camada de óxidos (ou sais) metálicos.

Devido à resistência à abrasão, o vidro pirolítico pode ser temperado, curvado, laminado ou utilizado na forma monolítica.

Os vidros pirolíticos foram desenvolvidos no hemisfério Norte, com o intuito de melhorar o conforto nos locais com clima predominantemente frio. Com isso, buscava-se alta transmissão de luz visível, resistência química e mecânica da camada refletiva, reflexão do infravermelho longo (próximo de

85%) para evitar perdas de calor interno, e transmissão do infravermelho próximo para permitir o aquecimento do inverno (ARNAUD, 1997 apud MICHELATO, 2007).

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar as diferenças entre temperaturas superficiais externas e internas em vidros refletivos pirolíticos, instalados em células-teste, em fachadas Norte e Oeste.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

São analisados vidros refletivos pirolíticos, instalados em janelas, em área experimental da Unicamp. Neste trabalho os vidros foram instalados com a face metalizada voltada para o interior. As medições foram realizadas por Castro (2006) durante duas semanas, nas fachadas Norte e Oeste, em julho de 2005.

3.1 Materiais

Os vidros pirolíticos analisados (figura 1) possuem dimensões de 1,06m x 0,86m, e foram doados pela empresa CEBRACE (Blindex):

- Vidro refletivo antélio verde esmeralda (6mm)
- Vidro refletivo antélio bronze (4mm)
- Vidro refletivo antélio prata (4mm)
- Vidro refletivo reflectafloat (4mm)



Figura 1 – Amostras dos vidros refletivos pirolíticos analisados

3.2 Equipamentos

3.2.1 Células-teste

No presente trabalho, foram realizadas medições de campo em até seis células-teste, localizadas em área experimental da UNICAMP, em Campinas-SP (CASTRO, 2006).

As células-teste implantadas foram distribuídas da seguinte maneira: uma para referência e controle, com a utilização permanente de fechamento de vidro incolor 4mm; as outras cinco foram destinadas às análises de desempenho dos materiais, sendo utilizado, em cada uma, um material diferente. Dessa forma, grupos de no máximo seis tipos de vidro foram analisados, de acordo com os materiais disponíveis.

As células-teste estão orientadas com fachadas de 2,70m a Norte-Sul, e as de 2,20m a Leste-Oeste. A implantação foi realizada de forma que não houvesse sombreamento das paredes ou sombras de vento, a fim de garantir as mesmas condições para todas. As janelas (aberturas) permanecem fechadas e, em relação à porta, a ventilação é mínima, já que está constantemente fechada. Quanto à execução, foram construídas em condições idênticas, sobre uma base de radier de concreto desempenado e paredes de tijolos de barro maciços sem revestimento, assentados com argamassa comum de cimento e pintados na cor branca (interna e externamente). As dimensões externas são 2,20m X 2,70m e internas 2,00m X 2,50m; área interna de 5,00m² e pé-direito de 2,40m (Figura 2).

Na face superior há uma laje pré-moldada (cerâmica e concreto), também pintada de branco, com ático ventilado por aberturas em trama de tijolos de barro nos oitões das faces Leste-Oeste. A cobertura é de telha fibro-vegetal, pintada externamente de branco, contando, junto ao caibramento de sustentação, com um filme de alumínio polido (barreira radiante tipo “foil”), reduzindo a influência da superfície mais exposta à radiação solar nos resultados das medições.

As células-teste possuem duas aberturas para análise voltadas para as faces Norte e Oeste, com dimensões de 1,20m X 1,00m, e peitoril de 1,10m. Enquanto as medições são realizadas em uma determinada fachada, a outra se encontra vedada por um painel de resistência térmica equivalente à parede.

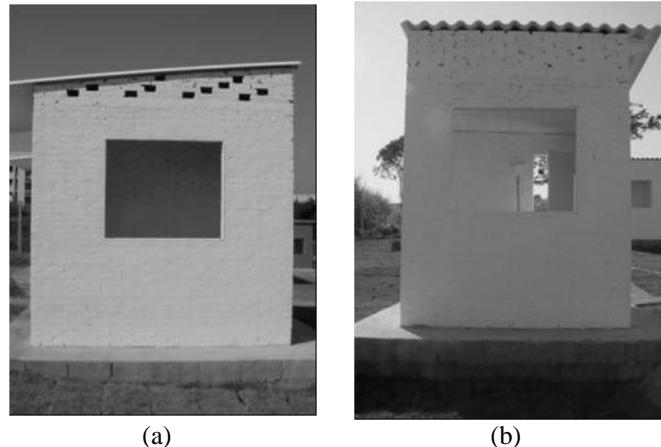


Figura 2 – Vista das células-teste, Face Norte (a) e Face Oeste (b)

3.2.2 Estação Meteorológica

Próximo às células-teste foi implantada uma mini-estação meteorológica automática de aquisição de dados, CR10X Campbell Scientific Inc. (Figura 3), com o objetivo de adquirir dados do microclima local. Os registros foram realizados a cada 30 segundos, sendo totalizados a cada 10 minutos. A estação monitora os seguintes elementos atmosféricos externos: temperatura e umidade do ar, velocidade e direção do vento, radiação solar incidente e índice pluviométrico. Os dados coletados ficam armazenados na estação, depois são descarregados e transferidos para o computador.



Figura 3 – Estação meteorológica

3.2.3 Termopares

Os dados relativos às células-teste foram coletados através de termopares tipo T (cobre-constantan), ANSI (padrão americano), conectados a um multiplexador, que possui 32 canais os quais possibilitam a conexão de todos os termopares instalados em cada célula-teste, sendo possível a execução de leituras simultâneas.

A partir da estação, há a distribuição de termopares tipo T (cobre-constantan) para todas as células-teste, os quais são fixados nos pontos de interesse (neste trabalho, o termopar considerado está fixado no centro da célula-teste, registrando a temperatura de bulbo seco interno). Os termopares estão protegidos da radiação solar direta, através de uma fita metalizada (que também protege da radiação térmica), a qual é colada sobre o termopar que está no vidro.

Para este trabalho, são considerados três termopares, distribuídos da seguinte forma:

- um termopar no centro da superfície interna do vidro;
- um termopar no centro da superfície externa do vidro;
- um termopar no centro da célula-teste, a uma altura de aproximadamente 1,30m.

A Figura 4 ilustra o posicionamento dos sensores, tanto na face interna quanto na face externa do vidro.



Figura 4 – Termopares colados no vidro

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

São apresentados resultados referentes aos vidros refletivos pirolíticos, em relação às propriedades óticas, fator solar, ganho de calor e temperaturas superficiais externas e internas dos vidros, obtidos por Castro (2006) (Tabela1 e Gráfico1).

Estão sendo considerados os resultados nos horários de máximo ganho de calor, o que corresponde às 12h para a face Norte e às 14h para a face Oeste.

O ganho de calor solar (q) é definido como a soma do Fator Solar multiplicado pela radiação solar incidente e da transferência de calor devida à diferença de temperatura entre o ar exterior e o interior (ASHRAE, 1997).

$$q = (\tau + Ni.\alpha).(I_o) + U(t_e - t_i) \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

q = ganho de calor através do vidro (W/m^2)

τ = transmitância

α = absorção

Ni = fração da energia solar incidente absorvida e reirradiada para o interior

I_o = energia incidente (W/m^2)

U = transmitância térmica do material ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

$(t_e - t_i)$ = diferença entre a temperatura do ar externo e interno ($^{\circ}\text{C}$)

$(\tau + Ni.\alpha)$ = Fator Solar

Para o cálculo do ganho de calor solar em cada célula-teste, as características óticas foram obtidas a partir dos dados de Santos (2002), Caram (2002), e Castro (2006).

Castro (2006) calculou o fator $U = 3,0537\text{W/m}^2\text{°C}$ para os vidros pirolíticos de 4mm e $3,0352\text{W/m}^2\text{°C}$ para o de 6mm. Dessa forma, obteve os fatores Ni (fração da energia solar incidente absorvida e reirradiada para o interior) para os vidros em análise. A partir daí, o Fator Solar foi calculado, considerando o valor de 0,2776 para o Ni .

Tabela 1 – Absortância, transmitância, refletância, fator solar, ganho solar e temperaturas superficiais externa e interna, dos vidros pirolíticos nos horários de máximo ganho solar

FACHADA	VIDROS PIROLÍTICOS	α	τ	ρ	FS	GANHO CALOR	TSE	TSI
NORTE - 12H	PRATA	12	72	16	0,753	500	25,9	29,3
	REFLECTAFLOAT	24	57	19	0,637	425	27,2	30,4
	BRONZE	39	41	20	0,518	345	30,5	35,5
	ESMERALDA	58	27	15	0,430	285	31,0	37,1
OESTE - 14H	PRATA	10	69	21	0,718	340	22,3	22,9
	REFLECTAFLOAT	23	55	22	0,614	305	22,6	23,2
	BRONZE	37	38	25	0,483	225	23,0	24,0
	ESMERALDA	57	23	20	0,387	180	23,6	24,8

Fonte: CASTRO, 2006

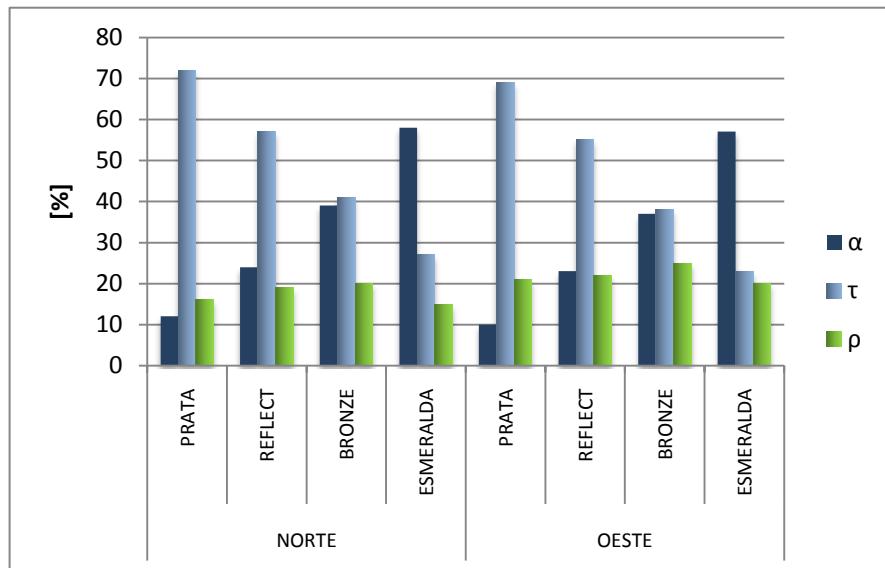


Gráfico 1 – Absortância, transmitância e refletância dos vidros pirolíticos analisados

Quando há incidência solar, as temperaturas superficiais internas de todos os vidros pirolíticos analisados sempre foram superiores às temperaturas superficiais externas, às temperaturas no interior das células-teste (TBS) e às temperaturas externas. Pode-se, portanto, afirmar que a camada refletiva voltada para o interior da célula-teste absorve o calor de maneira significativa. Dessa forma, o fluxo de calor ocorre do interior do vidro, tanto para dentro da célula-teste quanto para o ambiente externo.

Ao longo do período diurno, as temperaturas superficiais internas permaneceram acima das superficiais externas, tanto para o vidro bronze como para o prata, apresentando uma amplitude mais elevada na face Norte.

As diferenças entre as temperaturas superficiais externas e internas máximas foram em torno de 3°C para o vidro prata e de 4,5°C para o bronze, sendo sempre as internas superiores às externas. Salienta-se que a diferença entre as temperaturas superficiais dos vidros prata e reflectafloat¹ foram bem próximas (Gráfico 2).

¹ Denominação fornecida pelo fabricante (CEBRACE).

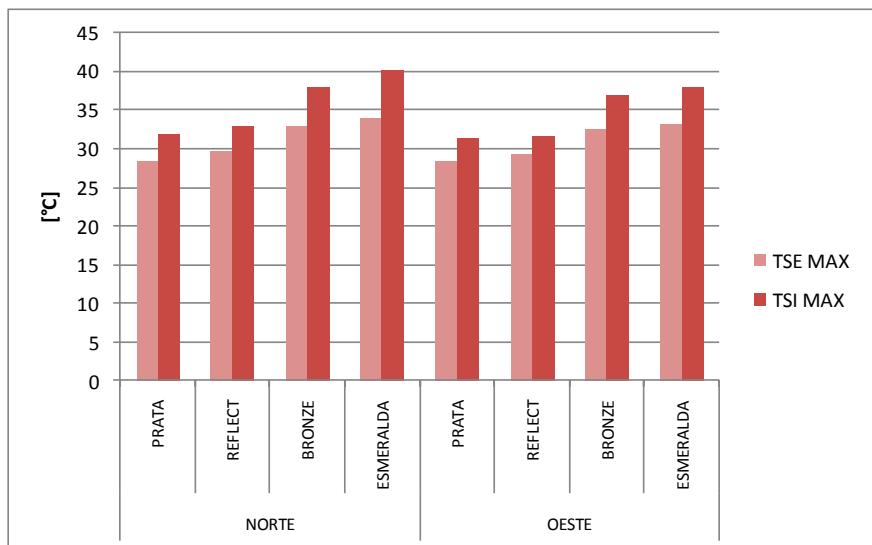


Gráfico 2 – Temperaturas superficiais externas e internas máximas para o período analisado

É importante notar que, quanto maior a absorção do vidro, maiores são as diferenças entre as temperaturas superficiais internas e externas nos horários de máximo ganho de calor, isto é, às 12horas para a face Norte e às 14horas para a Oeste.

As temperaturas internas (TBS) estiveram acima das temperaturas superficiais até às 8 horas, aproximadamente. A partir desse momento, até o final do dia, as temperaturas superficiais permaneceram maiores que a TBS, nas duas células-teste, nas duas fachadas.

Ao analisar os vidros de mesma espessura (bronze, prata e reflectafloat), o bronze apresentou as maiores temperaturas superficiais, tanto internas quanto externas, e também foi aquele cuja célula-teste registrou as menores temperaturas do ar interior (TBS).

Comparando-se os vidros prata e bronze, este último apresentou maiores temperaturas superficiais, tanto externas quanto internas, nas duas fachadas (Gráficos 3 e 4).

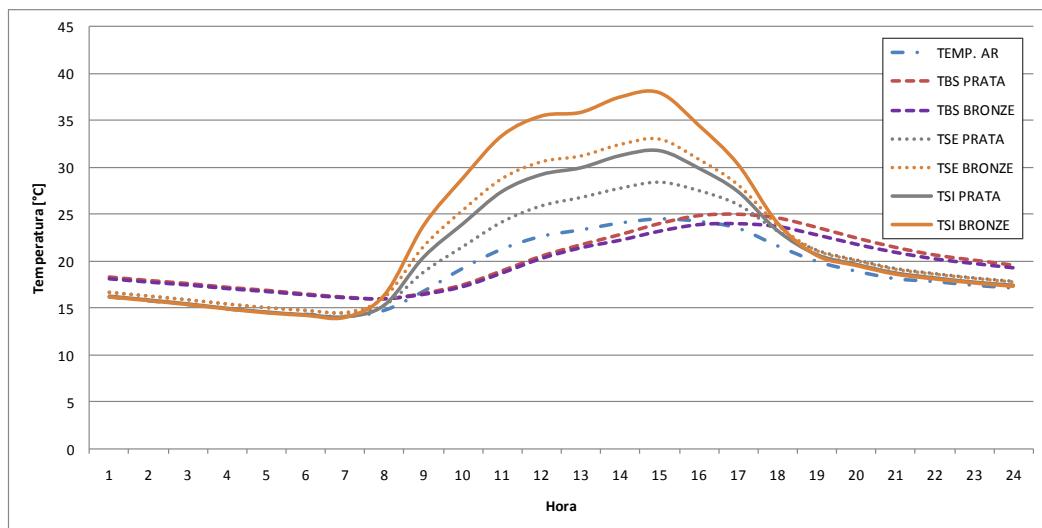


Gráfico 3 – Temperatura do ar externo, TBS, temperaturas superficiais externas e internas - vidros prata e bronze antelio Fachada Norte

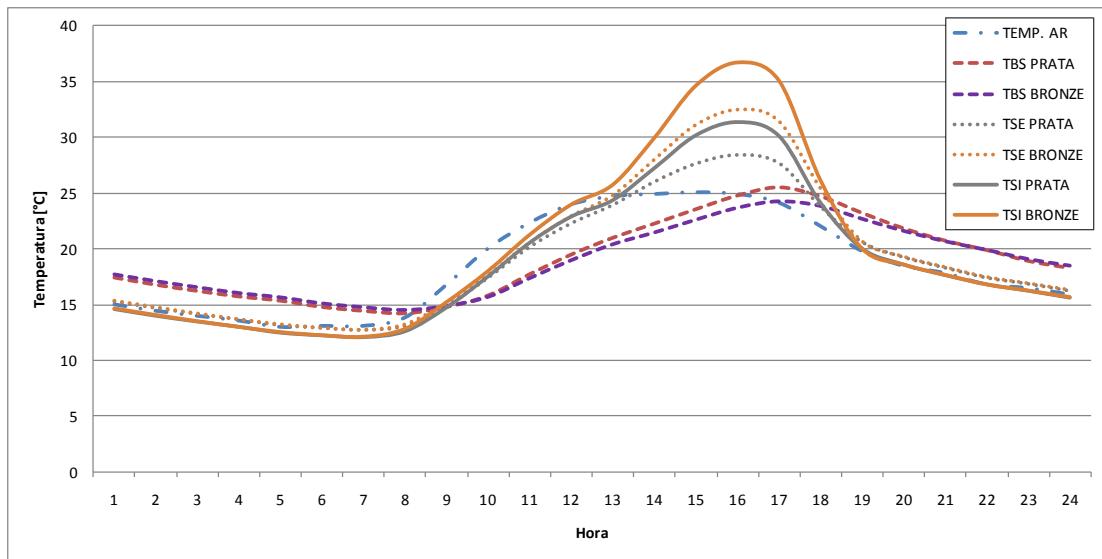


Gráfico 4 – Temperatura do ar, TBS, temperaturas superficiais externas e internas - vidros prata e bronze antelio Fachada Oeste

5 CONCLUSÕES

Pode-se afirmar que o vidro com maior absorção tem o menor Fator Solar e as maiores temperaturas superficiais, tanto internas quanto externas. Também a célula-teste composta com esse vidro registrou as menores TBS.

A maior diferença entre as temperaturas superficiais ocorreu para o vidro bronze, que tem menor Fator Solar e maior absorção.

Há um fluxo de calor da superfície interna do vidro para o ambiente externo, pois a temperatura superficial interna é maior que a temperatura superficial externa.

Os resultados sugerem fortemente que, quanto maior a absorção, menor o Fator Solar, menor a temperatura do ar interno (TBS), menor o ganho de calor e maiores as temperaturas superficiais.

Os resultados apresentados para os vidros pirolíticos mostram uma interrelação entre as propriedades óticas, fator solar, temperaturas superficiais, bem como as temperaturas internas em ambientes fechados por esses vidros.

Em trabalhos futuros será analisada, através de resultados das temperaturas superficiais dos vidros e outros, a relação entre suas propriedades óticas e o a contribuição para o ganho de calor interno.

6 REFERÊNCIAS

ARNAUD, A. **Industrial production of coated glass: future trends for expanding**. Journal of Non-Crystalline Solids, Amsterdam, v.218, p.12-18, 1997.

ASHRAE **Fundamentals Handbook**, Chapter 27. Atlanta. USA, 1997.

CARAM, R. M. **Caracterização ótica de materiais transparentes e sua relação com o conforto ambiental em edificações**. 1998. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

CARAM, R. M. (2002). **Estudo e Caracterização de Fachadas Transparentes para Uso na Arquitetura: Ênfase na Eficiência Energética.** 2002. 189 f. Texto (Livre Docênciа) - Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

CASTRO, A.P.A.S. **Desempenho térmico de vidros utilizados na construção civil: estudo em células-teste.** 2006. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

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

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** 3^a ed. Singapura: John Wiley and Sons, 1990.

MACEDO FILHO, A. **Vidro, eficiência energética e conforto ambiental nas edificações.** Finestra Brasil, nº 19, 1999, p. 121-125, 1999.

MICHELATO, R. Avaliação do desempenho térmico de vidros refletivos: estudo de caso em células-teste. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2007.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural.** 2^a ed. Porto Alegre: DC Luzzato/UFRGS, 1986.

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

SCHOLZE, H. **Le Verre: Nature, Structure et Propriétés.** Institut du Verre, Paris, 1980.