



## MONITORAÇÃO DO CAMPO DE RADIAÇÃO TÉRMICA E SUA ASSIMETRIA NUMA HABITAÇÃO REAL

SCHNEIDER, P.S. - Eng Mecânica - UFRGS  
PHILIPPI, P.C. - Eng Mecânica - UFSC  
PIERITZ, R.A. - Eng Mecânica - UFSC

Medição do campo de radiação térmica e sua assimetria, em uma peça sujeitam a entrada de luz solar direta. Uma sala de aula da UFSC foi Instrumentada com termômetros planos e do globo, assim como todas as fontes em ondas curtas e longas responsáveis pelo fenômeno.

Experimental work on thermal radiation field and its asymmetry due to fenestration at buildings. Data from a UFSC classroom from plane and globe thermometers are presented together with long and short, wave fonts of the phenomenon.

### 1- INTRODUÇÃO

As janelas de um recinto desempenham papel fundamental para prover boas condições de habitação. Além dos aspectos subjetivos ligados a comunicação visual de seus ocupantes com o exterior, regulam os níveis de saúde, pela troca de ar e a entrada de luz e calor. O dimensionamento e orientação das aberturas determinam a entrada da radiação solar, que ilumina e aquece o ambiente. O desequilíbrio destes aportes leva a gastos de energia em iluminação e condicionamento térmico, já que o sol se projeta no espaço interno e altera a temperatura superficial na área onde inside. O calor é transferido para o ambiente, elevando a temperatura do ar, e atua sobre um dos parâmetros que compõe a situação de conforto do ambiente habitado, que é o campo de radiação. A trajetória da projeção solar, como manchas de luz que percorrem o recinto, altera o campo de radiação térmica, provocando uma assimetria no mesmo.

Este trabalho estuda o campo de radiação térmica em uma peça sujeita a entrada de luz solar. Esta entrada determina um campo não uniforme devido a incidência desigual da luz solar sobre as superfícies internas da peça. Além disto, os ocupantes estão sujeitos a radiosidade desigual das superfícies, o que caracteriza a assimetria do campo para um mesmo ponto no espaço. Para estudar estes fenômenos foi montado um experimento com vistas a criar uma base de dados, com a instrumentação de uma sala. Nesta foi medido não só o campo e sua assimetria como também levantados outros dados, que posteriormente serão úteis na modelização numérica do fenômeno.

Pereira (1984) apresenta um modelo matemático que descreve o campo de radiação em um ambiente fechado. Este modelo considera que o campo de radiação é resultante apenas, da radiosidade das superfícies do ambiente, que é o fluxo de radiação que parte das superfícies, por emissão ou reflexão, para superfícies opacas, e ainda por transmissão, em superfícies transparentes. A base de dados deve fornecer tanto os valores de entrada, que serão chamados de fontes, como os de resposta, obtidos pelos sensores de radiação.

### 3- MONTAGEM DO EXPERIMENTO

A peça escolhida (fig 1) foi a sala de aula 218 do Centro de Ciências Humanas (CCH), no Campus da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). É do tipo paralelepípedo regular, com apenas um plano envidraçado de comunicação externa, voltado para o leste.

As fontes são as radiosidades, em ondas longas e curtas, de superfícies significativas, i.e., de mesma radiosidade. Estas requerem dois tipos distintos de instrumentação. Para ondas longas foram utilizados termopares e para ondas curtas, piranômetros. Para o que considera-se como resposta à excitação das fontes, i.e., o campo de radiação, utilizou-se termômetros de globo e termômetros planos, aliado a medidores de velocidade e temperatura do ar

#### 3.1- FONTES DE ONDAS LONGAS

Como a mancha solar descreve uma trajetória contínua na peça, é possível distribuir sensores de temperatura fixos sobre as superfícies, de tal forma que sempre algum deles esteja acompanhando o sol. Para evitar que ocorrem lacunas neste

acompanhamento, foram previstas as situações onde a mancha, ao deslocar-se, fosse abandonando um sensor e, simultaneamente, atingindo outro. Isto foi alcançado pela execução do programa MANCHA (Schneider, Philippi e Corbell, 1989), para o dia 16 de fevereiro, estimado como intermediário dentro do período previsto para o experimento. O resultado foi a instalação de 4 sensores sobre o piso e 3 na superfície lateral esquerda (fig 2).

Para as demais regiões foi montado um arranjo (fig 3) seguindo uma divisão da peça em dois ambientes, o próximo da janela (posterior) e o seu complementar (anterior), devido a grande profundidade da sala frente as demais dimensões. Assim, para o teto, piso e laterais, foram instalados dois sensores por superfície, atendendo aos dois ambientes citados. Na região posterior do piso, sempre um dos sensores montados para a rede de acompanhamento da mancha pode ser utilizado como fixo. Os fundos da sala recebeu 1 sensor e, por último, a fachada com um sensor abaixo da janela e outro no vidro.

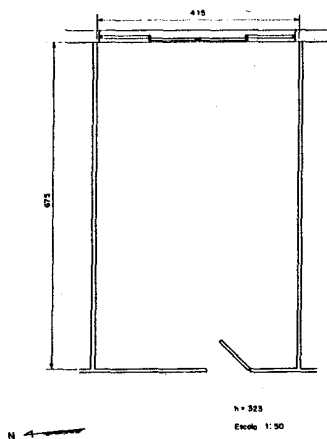


Fig 1- Sala do experimento

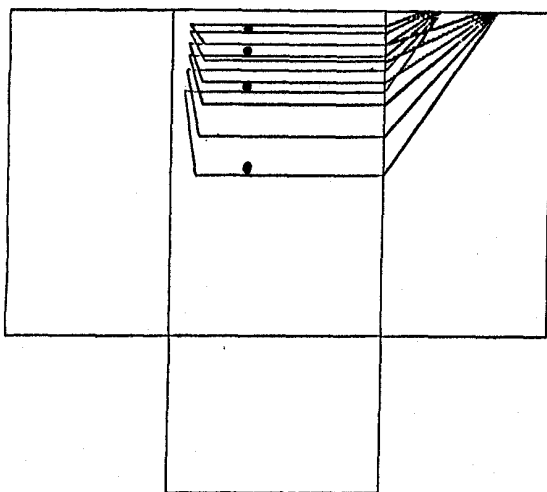


Fig 2- Trajetória da mancha solar

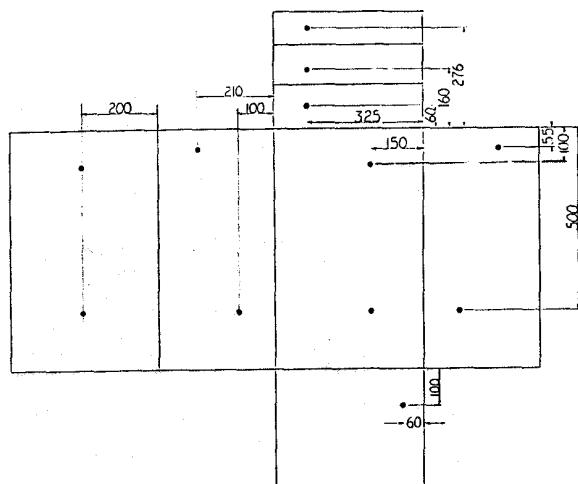


Fig 3- Colocação dos sensores

Os sensores utilizados foram termopares tipo T (Cobre - Constantã), AWG 24. Sua instalação nas superfícies seguiu as indicações encontradas na literatura (ASTM,1987). Foi aberta uma pequena vala de 20 cm de comprimento na superfície para a inserção do fio (20 vezes o diâmetro do fio). Com o fio instalado, foi coberta com fita crepe, até próximo da ponta. O tratamento dispensado para a ponta foi de inseri-la na abertura, tapando-a com uma mistura de resíduos do material original da superfície, aglutinados com cola branca (PVA) para madeira e aglomerado ou araldite (resina epoxi) para reboco. Neste último caso, toda a extensão foi repintada com a tinta original da superfície. Ainda, por precaução, um bom trecho do termopar foi firmemente fixado à superfície com fita crepe. A medida de temperatura no vidro seguiu mais o bom senso do que alguma recomendação técnica. O termopar foi fixado à face interna do vidro com resina epoxi. Em ambas as faces do vidro a ponta do termopar foi protegida por um pequeno pedaço de papel aluminizado. Todo o restante do fio, exposto ao sol, foi protegido pelo mesmo tipo de papel, para evitar condução.

Para leitura dos sinais gerados pelos sensores foi utilizada uma montagem tipo Data Logger. Esta é composta por um Data Acquisition/Control Unit 3497A da Hewlett Packard (HP), dotado de um microvoltímetro digital de 5 1/2 dígitos e resolução de 1  $\mu$ V, que descarrega dados para uma impressora térmica HP 5150A.

### 3.2- FONTES DE ONDAS CURTAS

O que é necessário determinar, inicialmente, é a radiação solar incidente sobre o plano vertical interno à peça, decomposto nas parcelas direta e difusa. Assim, para o modelo computacional, associa-se a radiação difusa ao plano da janela e a radiação direta as superfícies internas, calculada a partir de seu valor na vertical. Devido a dificuldade de registrar a radiação solar difusa no interior da peça, optou-se por instalar dois sensores de radiação (piranômetros) na bancada horizontal

do prédio da Engenharia Mecânica (EMC) da UFSC, distante menos de um quilômetro do experimento. Esta possui suporte para o piranômetro de radiação total e outro, com anel de sombreamento, para radiação difusa. Na sala foram instalados outros dois sensores, na posição vertical, sendo um externo e outro interno, ambos para radiação total.

Os quatro piranômetros são da marca Kipp & Zonen, modelo CM10. Os dados dos dois piranômetros instalados na horizontal foram adquiridos por um integrador GC10 - Solar Integrator - do mesmo fabricante. Os sensores da peça foram ligados ao equipamento local de aquisição.

O procedimento para converter a parcela direta, da horizontal para o plano vertical externo da janela, segue apenas relações angulares. Duffie e Beckman (1980) recomendam a equação 1.

$$I_{b\beta} = R_b I_b$$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (1)$$

A parcela difusa é a que apresenta maior incerteza. O procedimento escolhido foi o proposto por Klucher (1979) onde

$$I_{d\beta} = I_d \frac{(1 + \cos \beta)}{2}$$

$$(1 + F \sin^3(\beta/2)) (1 + F \cos^2 \theta \sin^3 \theta_z)$$

$$F = 1 - (I_d/I)^2 \quad (2)$$

A superfície envidraçada ainda recebe a radiação refletida pelo entorno (albedo) que, devido as características de reflexão não especular do mesmo, soma-se à difusa. Assim temos

$$I_a = A I (1 + \cos^2(\beta/2)) \quad (3)$$

A intensidade da radiação é atenuada quando de sua entrada no interior da peça, devido a não transparência total do vidro. A transmissividade, para a parcela direta, é função do ângulo de incidência  $\theta$ . Já para a parcela difusa, devido a sua isotropia, utiliza-se o conceito de ângulo de incidência efetivo ( $\theta_e$ ). O comportamento característico do vidro pode ser encontrado na literatura (Duffie e Beckman, 1980), porém os valores utilizado no experimento foram inferidos, como esta descrito no item 5

### 3.3- CAMPO DE RADIAÇÃO E ASSIMETRIA

Para avaliar o campo de radiação, através da temperatura radiante média, utilizou-se três termômetros de globo de 15 cm de diâmetro, confeccionados em cobre. Estes instrumentos receberam nova pintura externa, com a tinta 3M Velvet Coating 2010, com propriedades radiantes conhecidas. Também trocou-se o termômetro de bulbo de mercúrio por termopar. Ainda foi adaptado um gancho à cada instrumento, para suspende-lo, substituindo o suporte de bancada.

A assimetria do campo foi medida por três termômetros planos, montados para este experimento. O termômetro é composto por duas placas quadradas de cobre de 70 mm de lado e 0,5 mm de espessura, também pintadas com a

tinta Velvet Coating 2010, espessadas por duas chapas de poliestireno expandido (Isopor) de 25 mm de espessura cada. O sensor de temperatura escolhido foi termopar, em montagem diferencial, com um fio de Constantã de 200 mm de comprimento entre as placas e dois fios de Cobre ligandos com o Data Logger.

Para qualquer posição dos termômetros é importante salientar que estes não podem interceptar a radiação solar direta, por ser uma imposição do modelo matemático.

Outras duas grandezas são auxiliares nesta medição, a temperatura e a velocidade do ar. A temperatura foi medida por um termopar tipo T alojado em um segmento de duto, com exterior protegido por papel alumínio e com sucção de ar forçada no interior. A velocidade do ar foi medida por um anemômetro de fio quente portátil tipo 442/2 da Messtechnik.

## 4- RESULTADOS

Ao total foram obtidos seis dias completos de medidas. Destes, escolheu-se o dia 16 de fevereiro como representativo para a exposição destes resultados.

### 4.1- FONTES DE ONDAS LONGAS

A evolução da temperatura das superfícies significativas pode ser acompanhada pela fig 4, que rebate os seis planos da peça. A frequência de aquisição dos dados foi de dez minutos, por intervalos de três a quatro horas. O término destes intervalos foi sempre próximo do meio dia solar, quando o sol não penetrava mais a peça

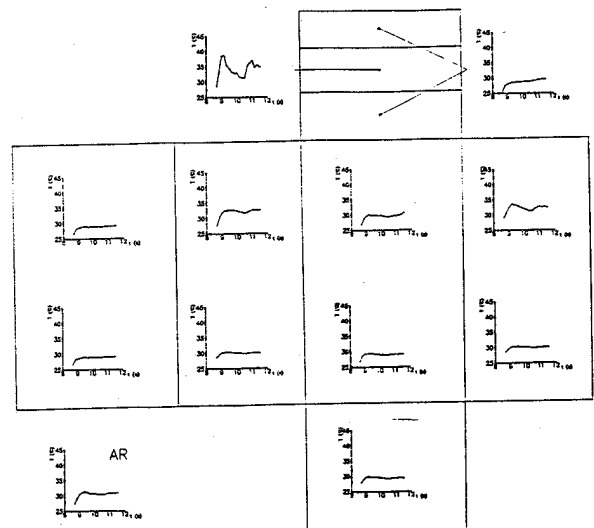


Fig 4- Evolução da temperatura no vidro e nas superfícies sem insolação direta

### 4.2- FONTES DE ONDAS CURTAS

Tomou-se a radiação total, difusa e direta na horizontal, para chegar à radiação no plano vertical. A radiação difusa registrada multiplicou-se o fator de correção de 1,13, para fevereiro, devido ao sombreamento do anel. A radiação direta é passada para o plano vertical pela equação 1. A radiação difusa vertical é calculada pela formulação de Klucher, e a esta somada a parcela de albedo, tomada como 0,25.

Para confirmar o procedimento, utilizou-se a soma das parcelas obtidas e confrontou-se o resultado com os pontos de radiação total medidos no exterior da janela (fig 5). Estes últimos dados servem apenas de baliza, pois são resultados instantâneos.

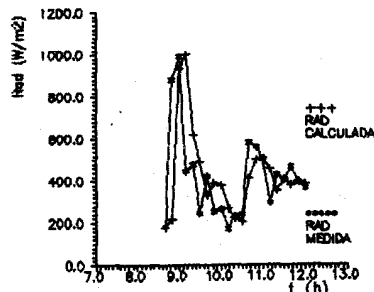


Fig 5- Comparação entre a radiação solar total no plano vertical medida e a calculada pelo algoritmo de Klucher

A radiação direta no plano vertical interno da janela passa a ser o valor da exterior, atenuada pela transmissividade correspondente a cada ângulo de incidência. Para determinar o valor nas superfícies internas, onde incide a mancha solar, foi novamente utilizada a equação 1. A transmissividade à radiação difusa e ao albedo é dada por um valor único (ângulo de incidência equivalente), que para superfícies verticais é de 60 graus. A transmissividade do vidro foi avaliada a partir de curvas características e de alguns valores medidos no local (fig 6). Como esta propriedade não apresenta variação significativa para ângulos de incidência até aproximadamente 45 graus, tomou-se a razão entre os valores lidos pelos piranômetros instalados dentro e fora da janela, para esta faixa. A razão média ficou por volta de 0,75, o que é razoável para vidro comum exposta a intempérie e sujeira urbana. Com este valor de partida foi construída uma curva, respeitando o comportamento da curva característica.

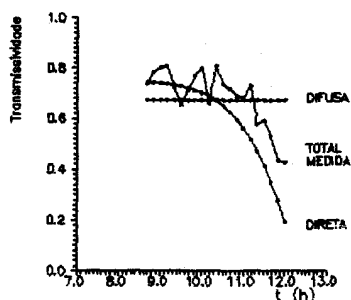


Fig 6- Transmissividade do vidro

#### 4.3- TERMÔMETROS PLANOS E DE GLOBO

Foram utilizados três instrumentos de cada tipo, sempre com alterações na disposição dos mesmos na peça. Para os termômetros planos utilizou-se como fixo a altura em relação ao solo e o paralelismo ao plano da fachada, fazendo-se variar apenas as posições sobre a planta. Para o termômetro de globo variou-se tanto a altura como a posição. A figura 7 completa a apresentação dos resultados de um dia de experimento.

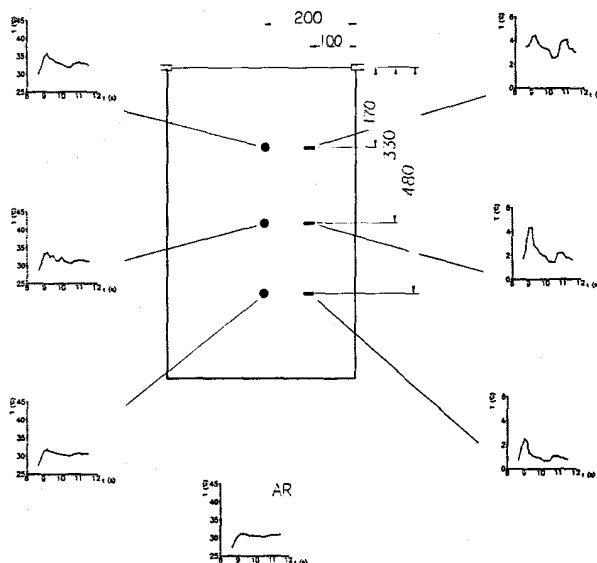


Fig 7- Temperatura ar-radiação e sua assimetria

#### 5- CONCLUSÕES

O conjunto de resultados de temperatura e radiação é coerente para uma manhã de nebulosidade média de verão. Existe um questionamento sobre a obtenção de alguns resultados, como para as temperaturas superficiais, baseado nas dificuldades inerentes deste tipo de medição. O sensor interfere no fenômeno, provocando alterações não conhecidas e prejudicando a determinação da incerteza de medição. No que tange a radiação no interior da peça, a medição poderá ser efetuada com o auxílio de um integrador ou uma aquisição automática ligada ao sensor, dispensando assim a aproximação efetuada pelo modelo matemático. Finalmente, quanto aos termômetros plano e de globo, seria interessante um trabalho de calibração dinâmica dos mesmos.

#### 7-BIBLIOGRAFIA

- 1- Pereira, F.O.R., Assimetria do Campo de Radiação Interno Induzida por Superfícies Envidraçadas em Edificações, Dissertação de Mestrado CPQEC/UFRRGS, 1984.
- 2- Schneider, P.S., Philippi, P.C., Corbella, O.D., Trajatória da Luz Solar Direta em Recintos de Edificações, X COBEM, Rio de Janeiro, 1989.
- 3- Manual on the use of Thermocouples in Temperature Measurement, ASTM, STP 470B, Baltimore, 1987).
- 4- Duffie, J., Beckman, W., Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, New York, 1980.
- 5- Klucher, T. M., Evaluation of Models to Predict Insolation on Tilted Surfaces, Solar Energy, Vol 23, 1979.