



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

VIIELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

Búzios - RJ - 2011

ABSORTÂNCIAS E EMITÂNCIAS EFETIVAS DE SUPERFÍCIES: UM MODELO EXPERIMENTAL

Victor F. Roriz (1); Rosana Maria Caram (2); Maurício Roriz (3)

- (1) Mestre, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, vroriz@terra.com.br
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.
- (2) Doutora, Docente do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da EESC USP, rcaram@sc.usp.br.
Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos
- (3) Doutor, Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, m.roriz@terra.com.br
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

RESUMO

As absorptividades e emissividades são propriedades dos materiais, enquanto as absorptâncias e emitâncias são características das superfícies, sendo influenciadas não apenas pelo material de que são constituídas, mas também por sua geometria e acabamento superficial. Comumente considera-se as superfícies das edificações como planos perfeitamente lisos, desconsiderando-se o efeito que as sombras e interreflexões exercem sobre os fluxos de calor por radiação. O presente artigo apresenta um experimento desenvolvido para verificar estas influências e exemplifica a sua importância. Comparou-se as velocidades de mudança das temperaturas de amostras de diferentes formas, em um ambiente com atmosfera rarefeita. Como previsto, os resultados indicam que existe uma correlação entre a forma e os fluxos de calor, possibilitando a conclusão de que o experimento é válido para o objetivo descrito. Além disso, compara-se dois métodos de cálculo para estimativa do fenômeno.

Palavras-chave: absorptividade, emissividade, absorptância efetiva, emitância efetiva

ABSTRACT

The absorptivity and emissivity are properties of materials, while the emittance and absorptance are surface characteristics, being influenced not only by the material they are made, but also by its geometry and surface feature. Usually its considered the surfaces of the buildings as perfectly straight plans, ignoring the fact that the shadows and inter-reflections have on radiative flows. This paper presents an experiment designed to verify these influences and exemplifies the importance of such aspects. Furthermore, it is compared two methods of calculation to estimate this phenomenon.

Keywords: absorptivity, emissivity, emittances and absorptances.

1. INTRODUÇÃO

A correta avaliação das propriedades térmicas de uma superfície não é tarefa simples. Entretanto, esta avaliação é imprescindível para uma boa correlação do modelo de estudo com a realidade. Usualmente, em estudos dos fluxos de calor de edificações, adota-se valores para propriedades radiantes das superfícies a partir de tabelas absolutamente imprecisas. No caso da absorvância, por exemplo, considera-se apenas a cor da superfície, com erros sabidamente muito significativos. Em alguns casos mais raros, adota-se a absorvância do material da superfície em estudo, lida em espectrofotômetro como a absorvância desta superfície. Este procedimento só estaria correto caso não houvesse qualquer irregularidade na superfície. Para superfícies perfeitamente lisas e planas, não há obstáculos aos fluxos radiantes, mas as saliências e reentrâncias existentes (rugosidades ou ondulações) nas superfícies típicas de edificações, constituem obstáculos que podem alterar significativamente o comportamento das mesmas em relação aos fluxos por radiação.

Absorvâncias e emissividades são propriedades dos materiais, enquanto absorvâncias e emitâncias são características das superfícies, sendo influenciadas não apenas pelo material de que estas são constituídas, mas também por sua geometria e acabamento. Estes conceitos são muitas vezes confundidos e a diferença entre eles ignorada ou desprezada.

Barbirato et al. (2000), mediram refletâncias de superfícies em céu artificial, concluindo que quando um acabamento de superfície é alterado, passando de PVA para rugoso, baixo relevo, a refletância pode diminuir em aproximadamente 7%, especialmente se a superfície tiver absorvância média. Berdahl e Bretz (1997), também verificaram sua redução na medida em que era aumentada a rugosidade. Estes autores realizaram ensaios com revestimento branco para telhas e constataram que a superfície lisa apresentou refletância 25% maior do que a da rugosa. O fenômeno também foi observado por Seker e Tavil (1996).

No tocante à radiação, é possível considerar o efeito provocado pelas irregularidades, adotando propriedades radiativas efetivas para as superfícies. Sparrow e Jonsson (1963), modelaram este efeito para algumas superfícies e demonstraram sua importância. Sua dedução entretanto, se refere a geometrias específicas, restringindo a aplicação a alguns casos.

Roriz, Caram e Roriz (2011), apresentam um modelamento matemático para este fenômeno e simulam o efeito que este causaria nas temperaturas do ar no interior de uma edificação hipotética.

Na avaliação da eficiência energética de um ambiente, estes fatores podem ter grande relevância. No caso de coberturas, por exemplo, o envelhecimento ou uma pintura exercem diferentes efeitos sobre as temperaturas, dependendo das irregularidades superficiais. Em modelos de simulação computacional estes aspectos poderiam facilmente ser considerados, proporcionando resultados mais realistas.

2. OBJETIVO

O principal objetivo deste artigo é apresentar um experimento que comprova o efeito que a forma de uma superfície (rugosidade e ondulação) exerce nas trocas de calor por radiação. Adicionalmente, objetiva-se comparar dois modelos de estimativa do fenômeno.

3. MÉTODO

O método utilizado no experimento consistiu em monitorar em ambiente com temperatura controlada e atmosfera rarefeita, as temperaturas superficiais de 4 amostras, construídas com mesma massa e mesmos materiais, mas com diferentes fatores de forma. Foram comparadas as velocidades de mudança das temperaturas de 4 amostras de diferentes formas, submetidas a súbitas mudanças de temperatura do meio em que se encontravam. Em seguida, procurou-se identificar correlações entre as formas e as respectivas diferenças nas velocidades de mudança de temperaturas.

3.1. Montagem geral

A Figura 1 apresenta um corte esquemático do experimento. Em uma câmara de vácuo e por meio de uma bomba de vácuo, criou-se uma atmosfera rarefeita, a fim de minimizar os possíveis fluxos de calor por convecção. Além disso, as amostras tiveram seus fundos e laterais recobertos por isolante, minimizando outros fluxos de calor e permitindo registrar os efeitos provocados apenas pelas trocas térmicas por radiação em ondas longas entre as amostras e a câmara.

Como câmara de vácuo, foi adaptada uma panela de pressão que, por ser hermética, opaca, fabricada em alumínio (alta condutividade), com dimensões adequadas e superfícies polidas (baixa emissividade), proporcionou as condições necessárias ao experimento.

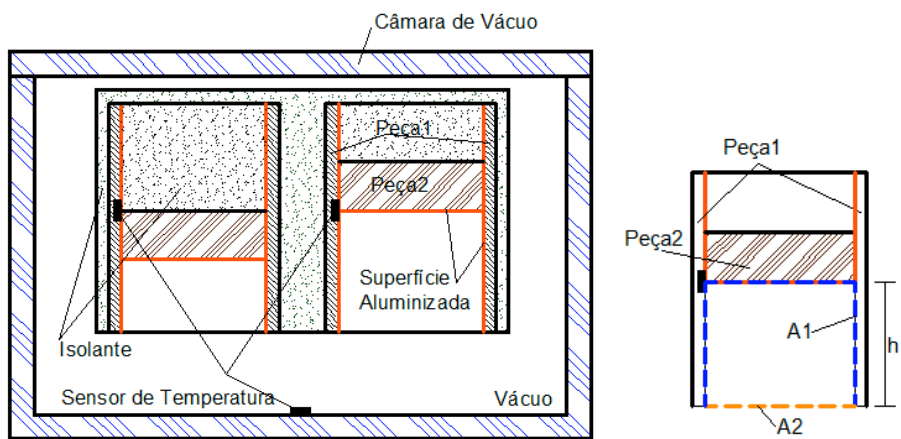


Figura 1 - Corte esquemático do experimento e detalhe de amostra.

O procedimento experimental consistiu em provocar bruscas alterações na temperatura da câmara de vácuo, registrando ao longo do tempo as alterações sofridas nas temperaturas de cada amostra. Este efeito foi alcançado submergindo o vaso de pressão em água gelada ou fervente.

3.2. Montagem das amostras

Cada amostra foi composta por 2 peças (Figura 1), uma primeira feita de papel-alumínio, com 17 x 6 cm, colada a uma folha de papel (apenas para facilitar a montagem, Figura 2). Este conjunto foi encurvado, de modo a formar um cilindro de 2" de diâmetro (Figura 3). A seção transversal desta peça define uma área denominada A_2 (Figura 1).



Figura 2 – Montagem das amostras, material para peça 1.

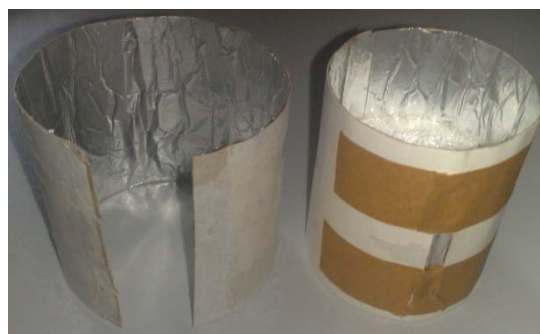


Figura 3 – Montagem das amostras, peça 1.

A segunda peça das amostras foi feita dobrando e colando um disco de papel-alumínio de 6 cm de diâmetro, sobre um anel de PVC de 2" com 1,5 cm de altura (Figura 4) e preenchendo este conjunto com material isolante (Figura 5). Além da fixação, a lateral dobrada teve a função de manter o contato térmico entre as peças. O anel de PVC deu rigidez ao conjunto, além de ajudar a manter a perpendicularidade entre as peças.



Figura 4 – Montagem das amostras, material para peça 2.



Figura 5 – Montagem das amostras, peça 2.

A segunda peça foi fixada no interior da primeira, em diferentes alturas (Figura 6), conforme a Tabela 1. A área de superfície aluminizada exposta à troca de calor, denominada A_1 , ficou portanto diferenciada

para cada amostra. Esta área A_1 é a soma da superfície exposta da peça 2 e da parcela exposta da superfície interna da peça 1 (Figura 1).

Considerando como cavidade fechada o espaço entre as áreas A_1 e A_2 , é possível calcular o fator de forma entre as superfícies pela equação 1 (RORIZ, CARAM e RORIZ, 2011) :

$$FF_{12} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \quad (\text{Eq.1})$$

Desta forma, o deslocamento da peça 2 em relação à peça 1 (h na Figura 1) fez com que cada amostra tivesse um diferente fator de forma, mantendo idênticas entretanto as suas demais características (massa, emissividade, área do corte transversal, etc.).



Figura 6 – Amostras com diferentes Fatores de forma.

Na lateral de cada amostra (Figura 6), recortes foram previamente feitos no papel, para possibilitar a fixação de sensores de temperatura diretamente sobre o papel-alumínio (Figura 7). Neste experimento utilizou-se sensores modelo DS18B20 One-wire thermometer, fabricados pela Maxim, com resolução de 0.0625°C (MAXIM, 2011).



Figura 7 – Fixação dos sensores.

Tabela 1– Fatores de Forma.

FF_{12}	A_2 (cm ²)	A_1 (cm ²)	h (cm)
0.25	20.268	81.0732	3.810
0.5	20.268	40.5366	1.270
0.75	20.268	27.0244	0.423
1	20.268	20.2683	0.000



Figura 8 – Preenchimento com isolante.

A região do cilindro abaixo da peça 2 foi preenchida com isolante (Figura 8). As amostras foram encaixadas duas a duas em blocos de isolantes (Figuras 9 e 10), para minimizar fluxos de calor por condução.



Figura 9 – Montagem das amostras.

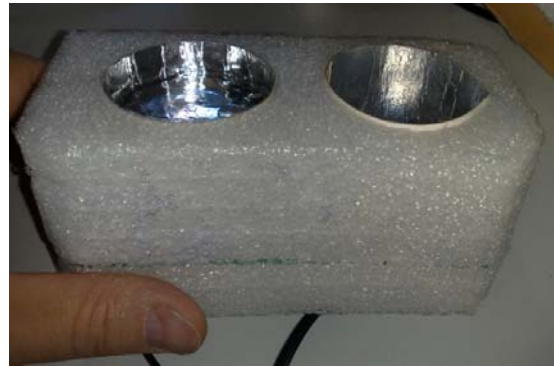


Figura 10 – Montagem das amostras no bloco isolante.

Fixou-se um sensor de temperatura no centro do fundo da câmara e um segundo sensor à meia altura de sua lateral (Figura 11). O conjunto de amostras (Figura 12) foi instalado no interior da câmara, com as superfícies aluminizadas voltadas para baixo (Figura 13). O orifício onde havia uma válvula de segurança foi utilizado como passagem do cabo dos sensores. O vaso foi fechado e lacrado com silicone (Figura 14).

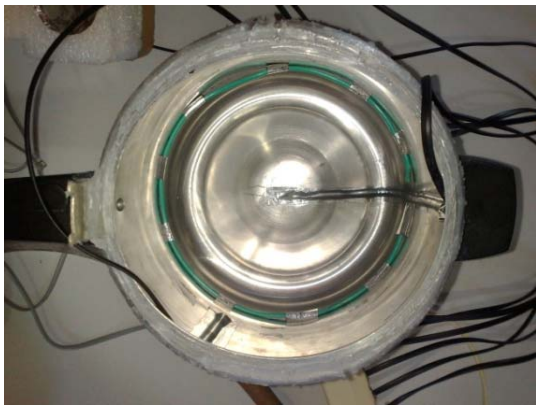


Figura 11 – Vista superior da câmara de vácuo.



Figura 12 – Conjunto das amostras.

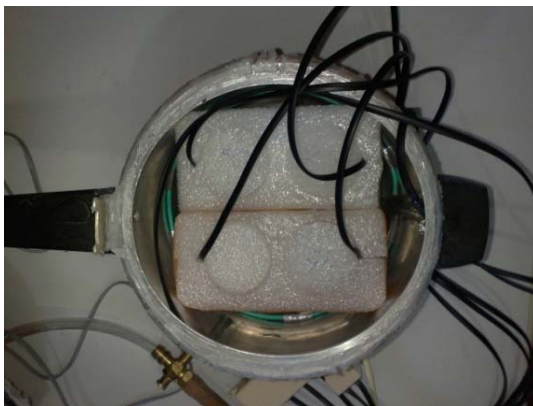


Figura 13 – Câmara de vácuo com as amostras.



Figura 14 – Câmara de vácuo fechada.

Para facilitar a realização do experimento, uma válvula e um indicador de vácuo foram adaptados à conexão com a bomba de vácuo (Figura 15).

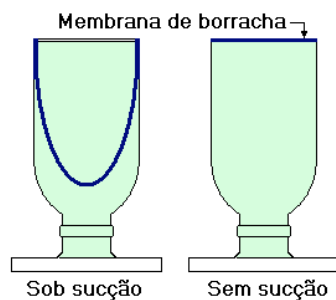


Figura 15 – Indicador de vácuo e válvula.

3.2. Resultados obtidos

A Figura 16 mostra o conjunto das temperaturas registradas em um dos experimentos.

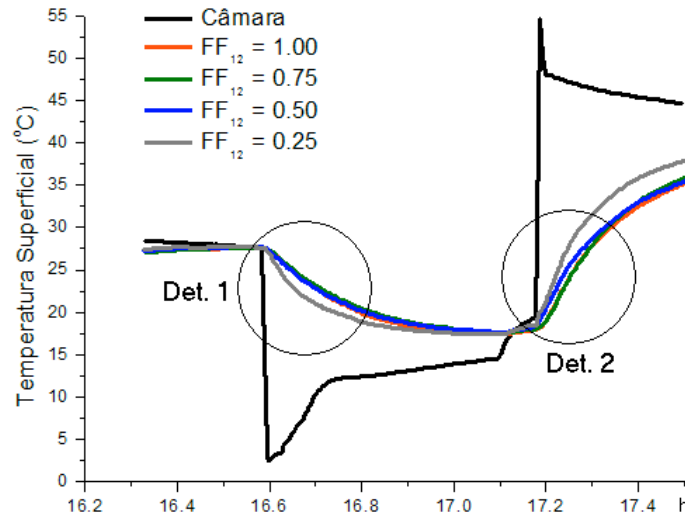


Figura 16 – Temperaturas registradas, destacando os momentos de resfriamento (Det. 1) e de aquecimento (Det. 2)

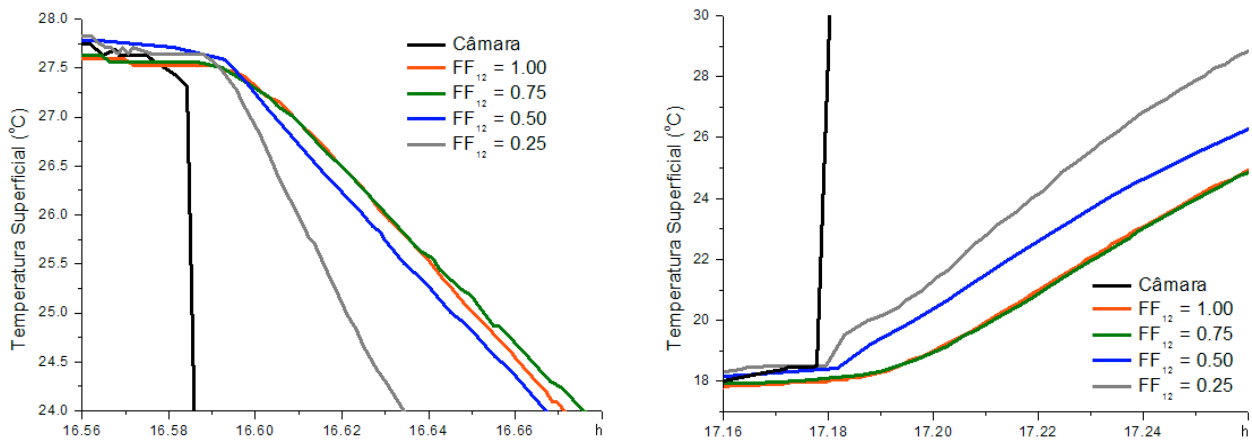


Figura 17 - Detalhes dos momentos de súbito resfriamento e aquecimento.

A Figura 17 destaca detalhes do conjunto de dados, correspondentes aos momentos em que a temperatura da câmara é abruptamente alterada. Observa-se nestes detalhes que a amostra com fator de forma de 0.25 é a que segue mais de perto a alteração da temperatura da câmara, seguida pela amostra com fator de forma de 0.5 e pelas amostras com fator de forma 0.75 e 1, entre as quais praticamente não há diferença de temperaturas. Considerando que as amostras são idênticas quanto à sua composição e condições, a explicação para este comportamento é o maior fluxo de calor por radiação entre a câmara e a amostra que tem o menor fator de forma (maior área exposta), enquanto o fluxo é menor para as amostras cujos fatores de forma são mais altos. No período de resfriamento, as temperaturas das amostras são mais altas que a da superfície da câmara e, portanto, o comportamento diferenciado entre as amostras indica diferenças entre suas emitâncias efetiva. Durante o aquecimento, este processo se inverte, passando a prevalecer as diferenças entre as absorptâncias efetivas. Estes fatos permitem deduzir que os fatores de forma influenciam tanto as emitâncias quanto as absorptâncias efetivas, o que já seria de se esperar, uma vez que aqueles efeitos resultam de acréscimos que as irregularidades superficiais provocam nas áreas de absorção e emissão de calor.

3.2. Fluxos de calor

A equação 2 (INCROPERA e DEWITT, 1996) é aplicável aos fluxos de calor por radiação em uma cavidade constituída por duas superfícies cinzas e difusas. Aplicando-se esta equação às temperaturas registradas no experimento, calcula-se os fluxos instantâneos entre cada amostra e a superfície da câmara, correspondentes a cada registro.

$$q_{12} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} + \frac{1}{A_1 \cdot FF_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot A_2}} \quad (\text{Eq.2})$$

Onde:

q_{12} é o fluxo de calor por radiação entre a amostra e a câmara (W/m^2).

σ = Constante de Stefan-Boltzman = $5.67 \cdot 10^{-8}$ ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

T = Temperatura (K)

ε = Emissividade (adimensional)

A = Área (m^2)

FF_{12} = Fator de Forma (adimensional)

₁ = Subscrito referente à superfície da amostra

₂ = Subscrito referente à superfície da câmara

Os resultados obtidos para os fluxos instantâneos são apresentados na Figura 18 e consideram as emissividades apresentadas na Tabela 2. Na Figura 19, foi novamente destacado o momento em que a temperatura da câmara de vácuo é subitamente elevada.

Tabela 2– Emissividades das superfícies.

Superfície das amostras (papel-alumínio)	0.05
Superfície interna da câmara (alumínio polido)	0.30

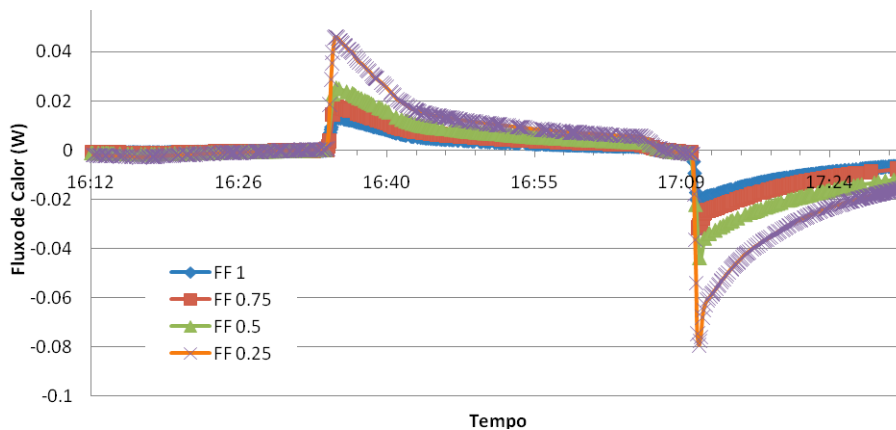


Figura 18 – Fluxos de calor calculados pela equação 2.

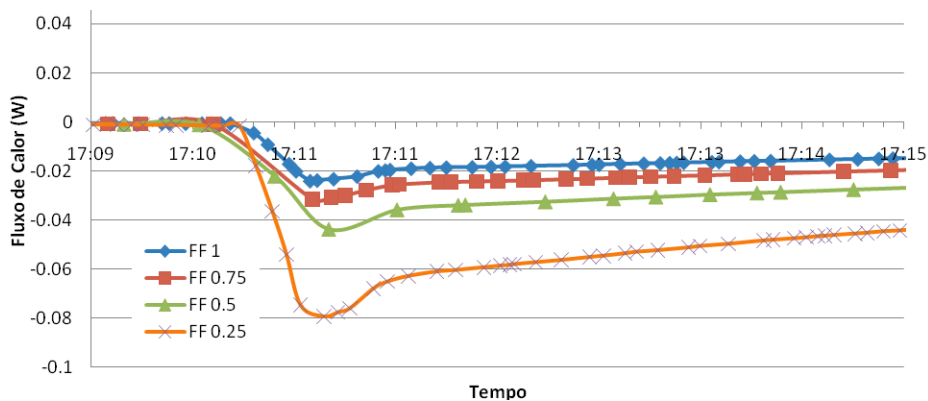


Figura 19 – Fluxos de calor no momento de súbito aquecimento.

Roriz, Caram e Roriz (2011) descrevem um modelo para avaliação do impacto que as formas interferem nos fluxos de calor por radiação e estimam o ajuste (equação 3) que deveria ser aplicado à emitância de uma superfície considerada perfeitamente lisa e plana (conforme adotado em diversos modelos de cálculo de fluxos de calor), para obter-se valores mais realistas das trocas de calor por radiação. Assim, para as amostras ensaiadas (Tabela 3), as emitâncias efetivas calculadas pela equação 3 representam as emitâncias que uma superfície lisa e plana com área igual a A_2 deveria ter para emitir a mesma energia que a da amostra em estudo. Para este caso (superfície plana), a equação 4 seria a adequada para o cálculo do fluxo de calor por radiação.

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1 \cdot A_1}{A_2 - \varepsilon_1 \cdot A_2 + \varepsilon_1 \cdot A_1} \quad (\text{Eq.3})$$

Tabela 3– Emissividades efetivas das amostras.

	FF=1	FF=0.75	FF=0.5	FF=0.25
ε_1	0.05	0.05	0.05	0.05
ε_e	0.05	0.0658	0.0959	0.1756

$$q_{12} = \sigma \cdot \varepsilon_e \cdot A_2 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{Eq.4})$$

Calculando-se os fluxos instantâneos (Eq. 4), adotando as emissividades efetivas indicadas na Tabela 3, obtém-se fluxos de calor praticamente idênticos aos obtidos pelo primeiro método, conforme indica a Figura 20, que apresenta a comparação destes resultados para as 4 amostras e para todo o período registrado.

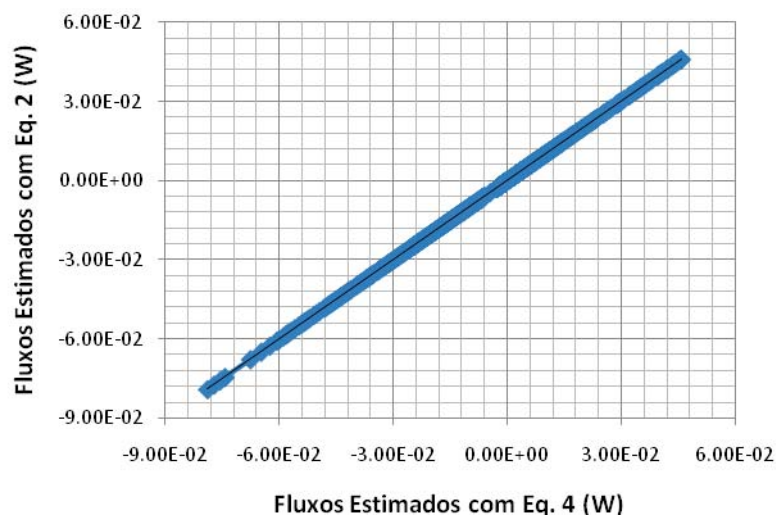


Figura 20 - Fluxos de calor calculados por dois modelos.

5. CONCLUSÕES

Os dados experimentais confirmaram as hipóteses do modelo teórico, enquanto os cálculos indicaram equivalência entre os dois métodos de avaliação dos fluxos de calor.

O estudo também permitiu deduzir que a relação entre o fator de forma e o fluxo térmico é válida tanto para absorção quanto para emissão de calor. Assim sendo, o procedimento proposto por Roriz, Caram e Roriz (2011) permite a estimativa das emitâncias e absorvâncias efetivas de superfícies, a partir da emissividade do material e das características geométricas (rugosidade e ondulação) da superfície.

Foi evidenciado que não podem ser desprezadas as diferenças entre propriedades de superfícies e propriedades de materiais, sob o risco de significativas imprecisões nos cálculos do fluxo de calor.

Para uma cobertura, por exemplo, esta relação pode interferir nos fluxos de calor com o céu e com o Sol, alterando portanto os balanços de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBIRATO, G. M., SILVA, C. A., MACHADO, I. B., e OITICICA, M. L. (2000). **Refletância de cores em superfícies construtivas**. Anais do VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído ENTAC. Salvador.
- BERDAHL, P., e BRETZ, S. E. (1997). **Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials**. Energy and Buildings , 25.
- INCROPERA, F. P., e DEWITT, D. F. (1996). **Fundamentals of heat and mass transfer** (4. ed. ed.). New York:: John Wiley and Sons.
- MAXIM. **Datasheet**. Disponível em: < <http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/2812>>. Acesso em: 12 mar. 2011.
- RORIZ, V., CARAM, R. M., e RORIZ, M. (2011). **Absortâncias e emitâncias efetivas de superfícies: Um método para estimá-las e exemplos de suas importâncias**. Anais do XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído ENTAC. Búzios.
- SEKER, D. Z., e TAVIL, A. Ü. (1996). **Evaluation of exterior building surface roughness degrees by photogrammetric methods**. Building and Environment , 31, pp. 393-398.
- SPARROW, E., e JONSSON, V. (1963). **Radiant emission characteristics of diffuse conical cavities**. Journal of the Optical Society of America , 53, pp. 816-821.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pela bolsa de doutorado que viabilizou o desenvolvimento da pesquisa.