

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE DIODOS TÉRMICOS

Humberto Araujo Machado – machado@univap.br, machado@fat.uerj.br

Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – IP&D

Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP

Av. Shishima Hifumi, 2911, São José dos Campos, SP, 12.244-000

Departamento de Mecânica e Energia - DME

Faculdade de Tecnologia – FAT

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Estrada Resende-Riachuelo s/n – Morada da Colina, Resende, RJ, 27.523-000

Antônio Garcia Ramos – agramos@univap.br

Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – IP&D

Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP

Av. Shishima Hifumi, 2911, São José dos Campos, SP, 12.244-000

Resumo. *O controle térmico de recintos e edificações tem merecido cada vez mais atenção dos projetistas e arquitetos. Uma alternativa ao uso dos métodos convencionais de isolamento é o emprego do diodo térmico, que consiste num tijolo convencional com uma cavidade interna na forma de dois retângulos desalinhados um sobre o outro. Quando o lado de baixo é aquecido, a convecção natural do ar interno produz uma alta taxa de troca de calor. Quando o lado de cima é aquecido, a troca de calor se dá por condução pura e o ar age com um isolante. Como esse tijolo possui uma boa condutância numa direção e é isolante em outra, ele se comporta como um diodo elétrico, sendo chamado diodo térmico. Esse princípio é conhecido a bastante tempo, porém não existem regras para seu dimensionamento ou estudos teóricos de viabilidade para seu emprego em edificações. O objetivo deste trabalho é simular o processo de transferência de calor no interior de um diodo térmico, para encontrar a geometria e dimensões ótimas e verificar a viabilidade de seu uso em edificações. Os resultados numéricos são validados através de comparação com dados experimentais obtidos a partir de tijolos de concreto celular autoclavados.*

Palavras chave: *Diodo térmico, Isolamento, Conforto térmico, Convecção natural.*

1. INTRODUÇÃO

Um dos aspectos que tem merecido maior atenção dos projetistas de edificações são os parâmetros de conforto térmico e custo de manutenção, especialmente nas obras da nova geração, os chamados edifícios inteligentes. Já durante a fase de projeto, são levadas em conta as condições internas desejadas e a utilização racional da energia na climatização do ambiente. Tal aspecto é cada vez mais sensível atualmente, devido às condições econômicas (o custo da energia) e seu impacto ambiental (Mascaró, 1999). Assim, têm surgido outras alternativas aos métodos convencionais de isolamento e controle térmico de edificações (uso de materiais isolantes, paredes duplas, entre outros) como, por exemplo, a climatização natural e o emprego de geometrias que favoreçam a ventilação e circulação do ar, e conseqüentemente a troca térmica no interior do prédio (Torreira, 1980, Mascaró, 1999). Dentro desse contexto, surge a opção pelo emprego do diodo térmico. A

idéia em si é bastante antiga: empregar elementos construtivos com uma geometria que favoreça a troca térmica numa direção preferencial, e já tem sido empregada em casos isolados (Özisic, 1990, Mascaró, 1999). A representação esquemática é mostrada na Fig. (1). Trata-se de um tijolo oco cuja cavidade interna tem a forma de dois retângulos desalinhados um sobre o outro.

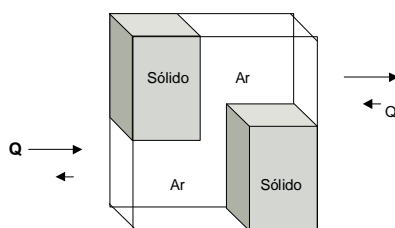


Figura 1. Vista tridimensional do diodo térmico.

O princípio de funcionamento é mostrado na Fig. (2). No primeiro caso, quando o lado superior está à uma temperatura menor, ocorre troca de calor por convecção natural do ar no interior da cavidade. Nesse caso, a intensidade da troca térmica será bastante alta, favorecendo a eliminação do calor através do lado quente. No segundo caso, a face mais alta está à temperatura maior, produzindo troca de calor por condução pura. Como o ar tem uma condutividade térmica menor do que a maioria dos isolantes térmicos sólidos normalmente usados (Özisic, 1990), o tijolo se torna um excelente isolamento na parede, evitando que o calor se propague de um lado para o outro.



Figura 2. Esquema de funcionamento do diodo térmico.

Observa-se que o tijolo tem um comportamento análogo ao de um diodo elétrico, que só permite a passagem de corrente em um sentido, sendo por isso designado diodo térmico. Como o diodo é um tijolo comum com uma configuração específica, o custo acrescido de seu uso é muito baixo. Seu funcionamento é particularmente desejável em situações onde o clima apresenta alta amplitude de temperatura e a temperatura do recinto não deve variar significativamente, como em salas de equipamentos eletrônicos ou de computação ou laboratórios de precisão, entre outros (Mascaró, 1999). Embora já conhecido à bastante tempo, e com princípio de funcionamento bastante simples, não é observado o emprego generalizado deste recurso, nem um estudo ou princípio básico de projeto e dimensionamento para sua aplicação, ou estudo comparativo de viabilidade e mesmo substituição dos isolantes convencionais. Num trabalho preliminar, Barata et al (1988) simularam o efeito da inclinação e da forma interna da cavidade na transferência de calor, estudando apenas a amplificação do Número de Nusselt através destes dois parâmetros e mantendo a razão de aspecto unitária. A forma ótima encontrada é similar à proposta neste trabalho, e foi batizada pelos autores de *Cavidade Retificadora*.

O objetivo deste trabalho é simular o processo de troca térmica no interior de um diodo térmico, visando obter a configuração e dimensões ótimas de operação, em função das dimensões, diferença de temperaturas, espessura da parede, entre outros parâmetros, e verificar a viabilidade e as vantagens de sua aplicação em edificações, quando comparado com métodos de isolamento tradicionais.

2. MODELO FÍSICO

Foram empregadas as equações de Navier-Stokes e Energia na forma bidimensional transiente, considerando escoamento incompressível de um fluido Newtoniano, incluindo a hipótese de Boussinesq, o que é usual nesse tipo de problema:

$$\nabla \cdot \mathbf{w} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\mathbf{w})}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{w}\mathbf{u}) = -\nabla P + \text{Pr} \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + \text{Pr} \cdot \text{Ra} \cdot T \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{w} C_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

onde \mathbf{u} é a velocidade, ρ é a massa específica, $\mathbf{w} = \rho \mathbf{u}$ (fluxo de massa), t é o tempo, P é a pressão, T é a temperatura, μ é a viscosidade, Pr é o número de Prandtl, Ra é o número de Rayleigh, C_p é o calor específico e k é a condutividade térmica. Os termos em negrito são quantidades vetoriais, e as propriedades são adimensionalizadas em relação aos valores na temperatura média.

Cada fase foi caracterizada através da função indicadora, $I(\mathbf{x})$, igual a 1 na cavidade e 0 na região sólida. Apesar de serem consideradas constantes, as propriedades de cada fase devem ter valores diferentes. Uma propriedade ϕ (ρ , μ , C_p ou k) é calculada por:

$$\phi(\mathbf{x}) = \phi_{\text{sólido}} + (\phi_{\text{ar}} - \phi_{\text{sólido}}) I(\mathbf{x}) \quad (4)$$

A função calor (H) é uma ferramenta útil que permite visualizar o caminho tomado pelo calor na troca entre as paredes, e é definida como (Polina et al, 1989):

$$H_y = \rho \cdot C_p \cdot u \cdot T - k \cdot T_x \quad (5.a)$$

$$H_x = -\rho \cdot C_p \cdot v \cdot T + k \cdot T_y \quad (5.b)$$

As condições de operação consideradas foram aquelas normalmente encontradas em edificações, estendidas para regiões com grande amplitude térmica (Mascaró e Mascaró, 1999). O modelo foi construído considerando-se propriedades do ar variáveis, porém, dentro das condições de operação, essa variação pôde ser negligenciada (Zhong et al, 1985).

3. RESULTADOS

3.1. Construção do código e validação

O código computacional foi implementado em Linguagem FORTRAN, empregando-se o método dos Volumes Finitos para a solução das equações de transporte (Patankar, 1980) e o algoritmo PRIME para acoplamento pressão-velocidade (Maliska, 1995).

O código computacional foi validado através da comparação de seus resultados com resultados Benchmark para o problema clássico da cavidade quadrada aquecida a diferentes temperaturas, obtidos a partir da Técnica da Transformação Integral Generalizada – GITT (Machado et al, 2000). Os resultados obtidos para $\text{Ra} = 10^4$ apresentaram erros menores que 1 %.

3.2. Utilização do código na determinação de parâmetros ótimos de projeto

Inicialmente, tratou-se do problema de convecção pura, sem considerar as paredes da cavidade, de modo a se verificar o comportamento do sistema. Foram executados os casos considerando as dimensões de um tijolo real e as propriedades do material do tijolo e do ar, Tab. (1), com as paredes verticais à temperaturas constantes (a parede fria à 25° C) e as paredes horizontais isoladas termicamente. Devido ao grande custo computacional, foram obtidos resultados para um número de Rayleigh máximo de 3000 (o que equivale a uma diferença de temperatura de 0,01° C). Esses casos foram úteis para determinar as dimensões ótimas da cavidade, Fig. (3).

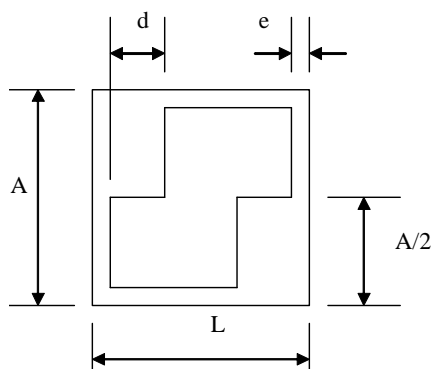


Figura 3. Dimensões da cavidade.

Verificou-se que o diodo apresenta o comportamento previsto somente nos casos em que a condutividade do sólido é bem menor que a condutividade do ar. Nesse caso, a diferença entre as resistências térmicas tende a aumentar continuamente com a relação d/L . Quando a temperatura do lado esquerdo (T_w) é maior que a do lado direito (T_e), a convecção é favorecida e a resistência diminui – Fig. (4.a). Esta situação tem pouco interesse prático, já que os materiais sólidos comumente usados, mesmo isolantes, tem condutividade térmica maior que a do ar (Torreira, 1989).

Quando a condutividade do sólido é maior que a do ar, como no caso do tijolo ($k_{\text{sólido}}/k_{\text{ar}} = 5$), o comportamento observado foi inverso ao esperado: quando T_w é menor que T_e a resistência térmica diminui, pois a maior condutividade do sólido favorece o resfriamento da camada superior de ar e o aquecimento da camada inferior, aumentando a troca convectiva. Neste caso, a relação d/L que produz a maior diferença de resistência térmica é de 0,3 – Fig. (4.b).

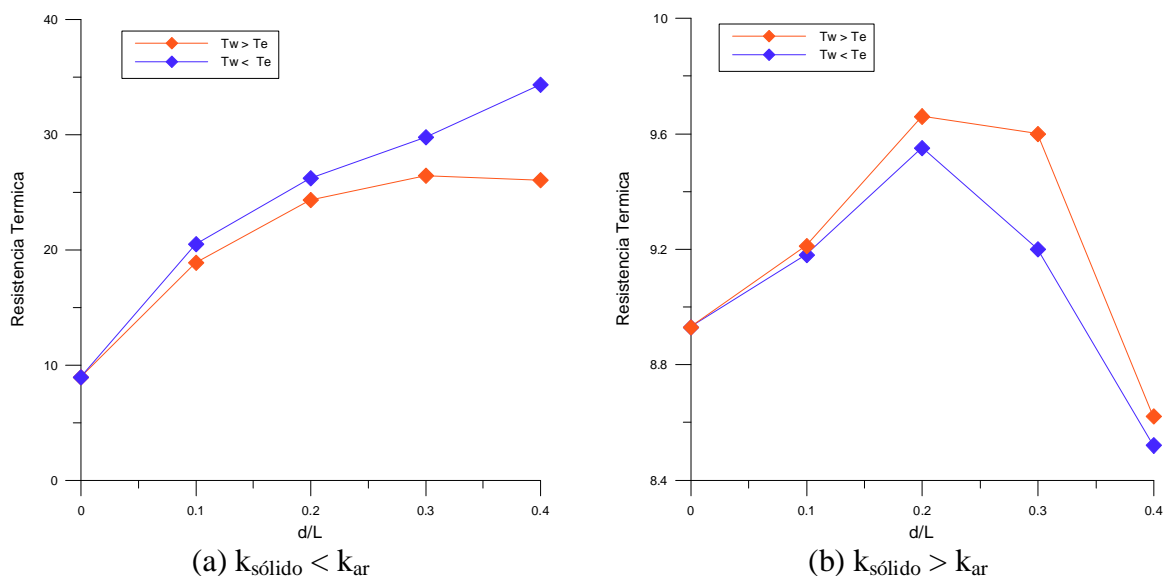


Figura 4. Variação da Resistência térmica da cavidade em função de d/L .

A solução do problema conjugado, considerando uma espessura de 15 mm para o tijolo (que foi dimensionada a partir dos requisitos de resistência estrutural mínimos) é mostrada na Fig. (5). A presença da parede reduz consideravelmente o efeito da convecção, fato que não estava previsto inicialmente. A diferença máxima de resistência térmica alcançada passa a ser de 0,84 %, e o sentido da variação da resistência térmica passa a variar de acordo com o valor da razão d/L .

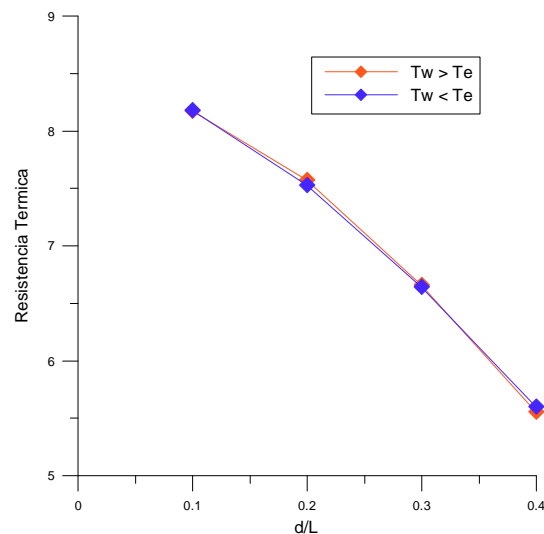


Figura 5. Resistência térmica da cavidade em função de d/L para o problema conjugado.

Nas Figs. (6-8), é possível observar o que acontece fisicamente. Na Fig. (6), as isotermas mostram que o material sólido mantém pouca variação de temperatura devido à alta condutividade, o que torna as temperaturas de cada região da cavidade mais próximas da temperatura das regiões mais espessas do tijolo. Na Fig. (7), as linhas de corrente permitem observar as recirculações causadas pela diferença de temperatura. A diferença entre o escoamento nos dois casos é basicamente a inversão de sentido das recirculações. Na Fig. (8), as linhas de calor mostram que a influência da convecção é maior no caso em que $T_w > T_e$, o que causa maior deformação do caminho percorrido pela energia entre as paredes, intensificando o efeito da convecção.

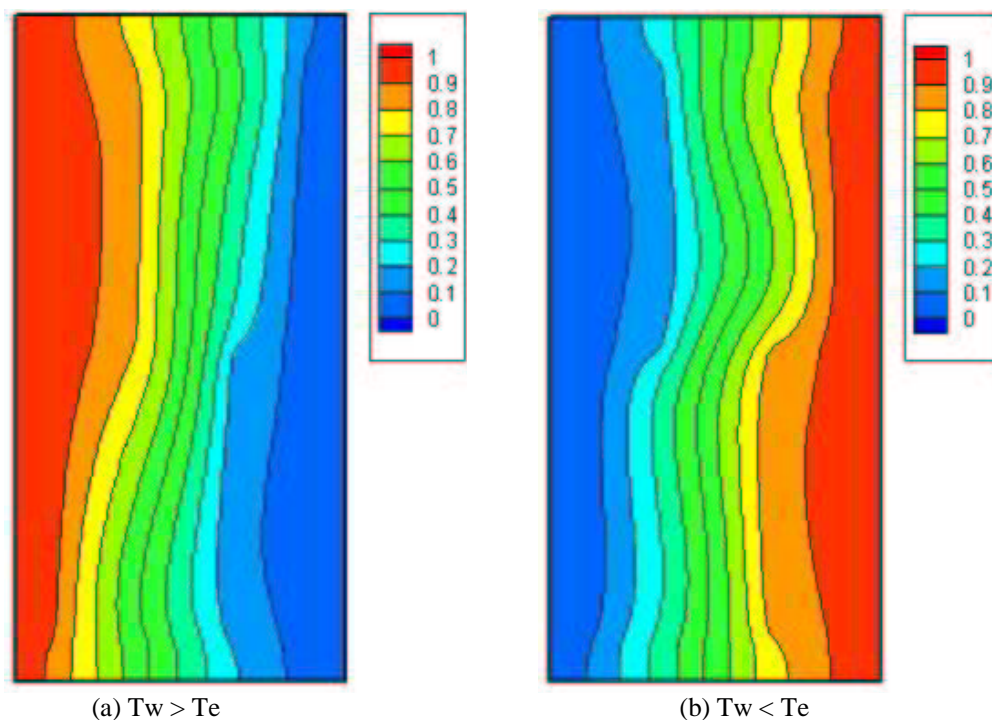
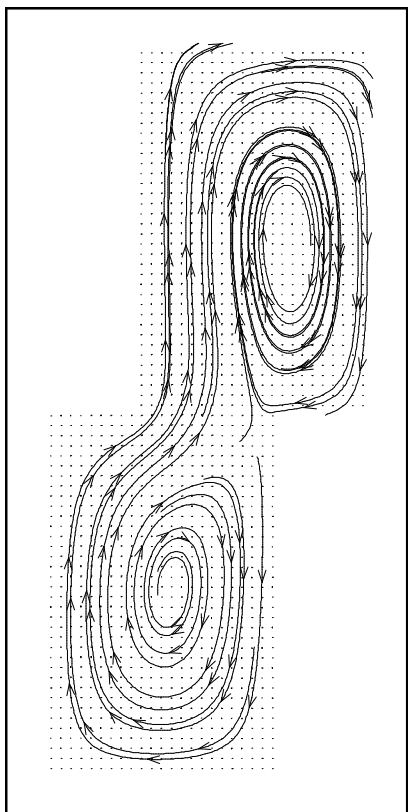
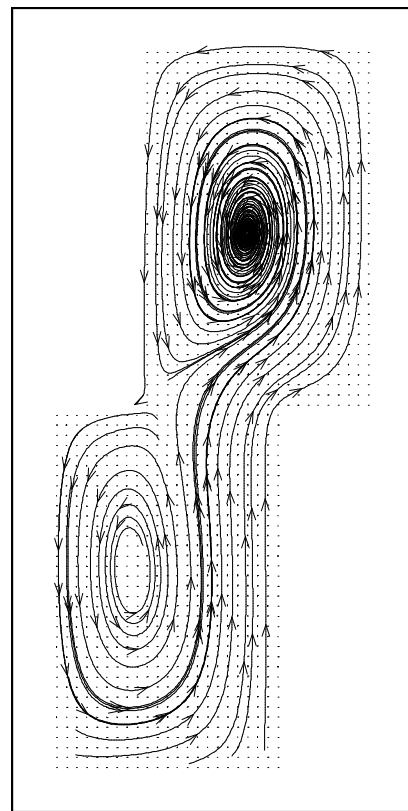


Figura 6. Isotermas para $d/L = 0.3$ e $Ra = 3000$.

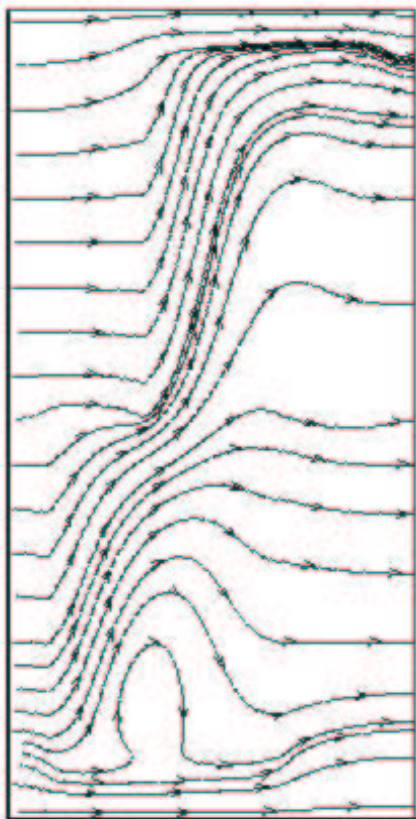


(a) $T_w > T_e$

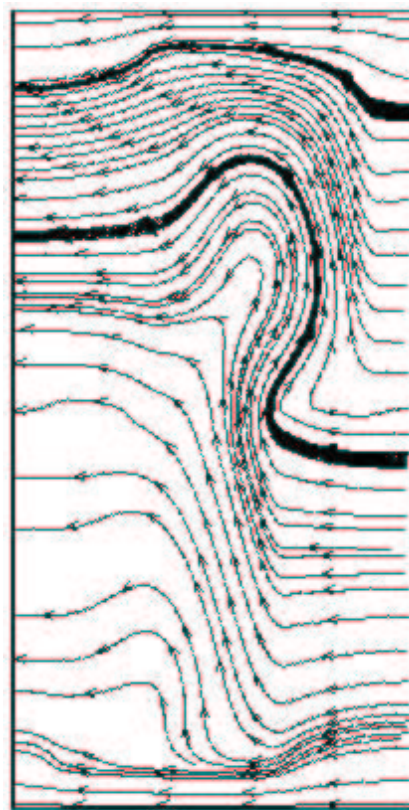


(b) $T_w < T_e$

Figura 7. Linhas de corrente para $d/L = 0.3$ e $Ra = 3000$.



(a) $T_w > T_e$



(b) $T_w < T_e$

Figura 8. Linhas de Calor para $d/L = 0.3$ e $Ra = 3000$.

Tabela 1. Propriedades Físicas do Ar (300 K) e do Tijolo.

Tijolo de concreto autoclavado (Sical, 2000)	Massa específica	$\rho = 500 \text{ kg/m}^3$
	Condutividade Térmica	$k = 0.1\text{-}0.2 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$
	Calor específico	$C_p = 800 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$
	Resistência à compressão	2.5 MPa
Ar (Özic, 1990)	Massa específica	$\rho = 1.1774 \text{ kg/m}^3$
	Condutividade Térmica	$k = 0.0262 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$
	Calor específico	$C_p = 1005.7 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$
	Viscosidade dinâmica	$\mu = 1.985 \times 10^{-5} \text{ N.s}$

Assim, os resultados da simulação, mesmo realizados a um baixo número de Rayleigh, mostram a existência de uma diferença de resistência térmica, embora, ao se adicionar a espessura, o sentido dessa variação não seja evidente.

Como a característica mais desejável para o tijolo é a maior diferença possível entre as resistências térmicas, de acordo com o sentido da troca de calor, os testes foram realizados para a configuração ótima ($d/L = 0,3$).

3.3. Teste experimental das configurações

Para grandes diferenças de temperatura, foram feitos testes experimentais. O esquema da montagem e a bancada são mostrados nas Figs. (9-10). As condições de contorno foram temperatura prescrita no lado frio (mistura de água e gelo a 0°C) e fluxo prescrito no lado quente, produzido através de uma resistência térmica colocada sob uma placa de cobre em contato direto com a face do tijolo e isolada termicamente nas outras superfícies. O fluxo de calor era controlado por uma fonte cc e calculado através da potência elétrica.

Inicialmente, testou-se a montagem para o caso de condução pura, para aferição da acuidade do sistema e validação do modelo físico (inclusive das propriedades físicas do material do tijolo). Depois de atingido o regime permanente, a temperatura alcançada pela placa quente foi de 46°C . A potência de aquecimento foi de 10 W. Supondo condução 1-D através do tijolo maciço, a condutividade térmica obtida foi de $0,18 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, o que está de acordo com a literatura (0,1 a 0,2, de acordo com o teor de umidade do tijolo – Pietrobon et al, SICAL, 2001)

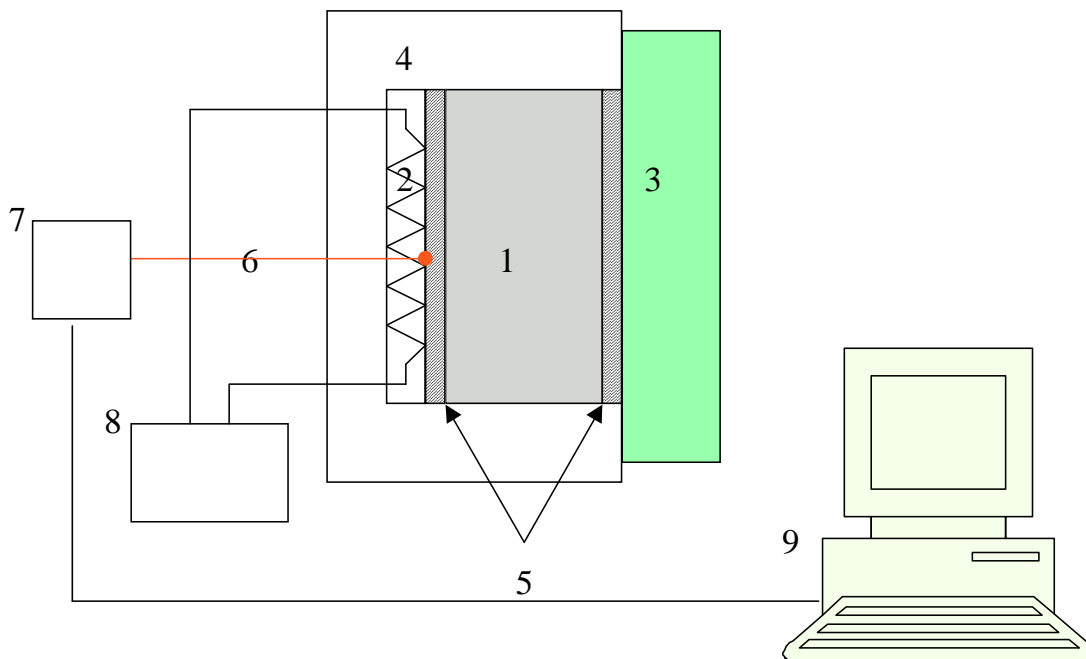
Uma vez que a montagem foi testada para condução pura, foi realizado o ensaio com o protótipo – Fig.(11). A potência de aquecimento foi mantida em 20 W. O regime permanente foi alcançado após aproximadamente 12 horas. Os resultados para regime permanente são mostrados na Tab. (2).

Tabela 2. Resultados para teste do protótipo, após atingido regime permanente.

Configuração relativa à Fig. 3	ΔT	Resistência Térmica
$T_w > T_e$	$39,4^\circ \text{C}$	$1,96^\circ \text{C/W}$
$T_w < T_e$	$41,1^\circ \text{C}$	$2,05^\circ \text{C/W}$
Variação	4,3 %	4,3 %

O resultado evidencia uma diferença de resistência térmica de acordo com o sentido da troca de calor, como era esperado. O experimento foi realizado com $Ra = 10^8$, o que indica grande nível de turbulência e instabilidade na convecção, e que influenciou fortemente o processo de troca de calor.

O comportamento observado coincide com o previsto inicialmente para o diodo térmico, em que, quando $T_w > T_e$, a convecção se torna mais ativa, reduzindo a resistência térmica do tijolo.



1. Bloco de concreto
2. Resistência elétrica para aquecimento
3. Reservatório com água + gelo
4. Isolamento térmico
5. Placas de cobre
6. Termopares
7. Placa de aquisição
8. Regulador da potência de aquecimento
9. Computador para armazenamento dos dados

Figura 9. Montagem experimental.

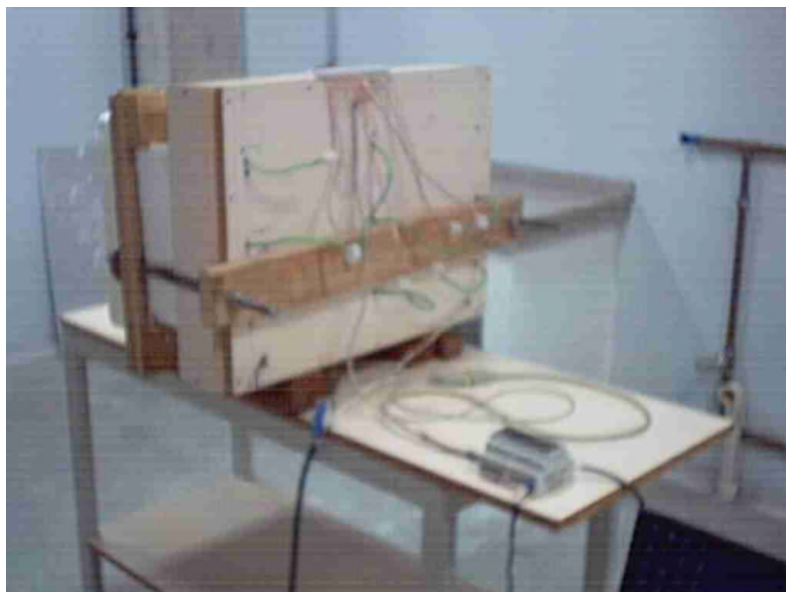
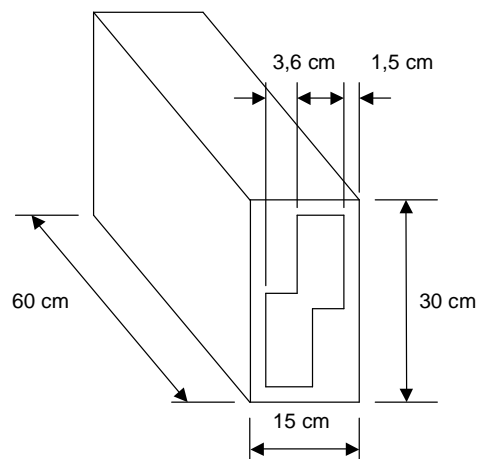


Figura 10. Montagem da bancada.



(a) Protótipo ao lado do tijolo maciço



(b) Dimensões do protótipo

Figura 11. Configuração do protótipo

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir da construção do modelo matemático e do código computacional foram, além da validação do código, a obtenção de diversas informações a respeito do comportamento térmico do diodo. A principal conclusão é que um diodo real se comporta da maneira prevista. Apesar da variação de resistência térmica de acordo com o sentido da troca de calor ter sido confirmada, e sua intensidade não indica ainda a viabilidade da utilização do diodo na otimização térmica de ambientes, requerendo mais testes com outras dimensões e materiais e cálculos de ordem econômica.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pelo suporte financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Barata, J. M., Durão, D. F. G. e Reis, A. J. P. S., 1988, “Convecção Natural em Cavidades”, B.C.T. 11/12, pp 32-35, Lisboa.
- Machado, H. A., Leal, M. A. e Cotta, R. M., 2000, “Integral Transform Solutions of Transient Natural Convection in Enclosures with Variable Fluid Properties, International Journal of Heat & Mass Transfer”, (43), pp 3977-3990.
- Maliska, R. C., 1995, “Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional”, LTC, Rio de Janeiro.
- Mascaró, J. L. e Mascaró, L., 1999, “Uso Racional de Energia em Edificações – Isolamento Térmico”, Agência para Aplicação de Energia, São Paulo.
- Moura, L. M., Lamberts, R., Philippi, P. C., Souza, R. V. C., 1993, “Protótipo Nacional de um Equipamento para a Medição da Condutividade Térmica de Materiais de Construção”, Second Brazilian Meeting on Comfort in the Built Environment, Edited by R. Lamberts et al., ANTAC, 139-144.
- Özisik, M. N., 1990, “Transferência de Calor”, Guanabara Koogan, Rio de Janeiro.
- Patankar, S. V., 1980, “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere Publishing Corporation, New York.

- Pietrobon, C. L. R., Pietrobon, C. E., Alves, S. M., “A Variação da Condutividade Térmica de Materiais de Construção Moldados In Loco com a Umidade e a Densidade: Experimentos Didáticos com Equipamentos Tecnicamente Apropriados” – site CEFET-PR.
- Polina, S., Da Silva, A. F. C. e Maliska, C. R., 1989, “Considerações Sobre o Uso da função Calor em Problemas de Convecção Natural em Cavidades”, Anais do X ENCIT, pp. 269-272, Rio de Janeiro.
- Sical - 2001– Catálogos atualizados, Belo Horizonte.
- Torreira, R. P., 1980, “Isolamento Térmico”, Fulton Editora Técnica, São Paulo.
- Zhong, Z. Y., Yang, K. T. e Lloyd, J. R., 1985, Variable Property Effects in Laminar Natural Convection in a Square Enclosure, Journal of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 103-138

PERFORMANCE ANALYSIS OF THERMAL DIODES

Humberto Araujo Machado – machado@univap.br, machado@fat.uerj.br

Research and Development Institute – IP&D

Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP

Av. Shishima Hifumi, 2911, São José dos Campos, SP, 12.244-000, Brazil

Mechanics and Energy Department - DME

College of Technology – FAT

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Estrada Resende-Riachuelo s/n – Morada da Colina, Resende, RJ, 27.523-000, Brazil

Antônio Garcia Ramos – agramos@univap.br

Research and Development Institute – IP&D

Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP

Av. Shishima Hifumi, 2911, São José dos Campos, SP, 12.244-000, Brazil

Abstract. *An alternative to the conventional insulation methods for thermal control of rooms and buildings is the use of the thermal diode, which consists in a common brick empty inside, where the internal cavity is geometrically arranged as two rectangles, disposed one over the other but not aligned. When the lower side is heated, natural convection in the air inside yields high heat transfer rates from this side to the other. When the upper side is heated, the heat transfer should run by pure conduction, and the brick with air inside works as a thermal insulator. As this brick allows a good conductance in one direction and insulation in the opposite direction, it behaves as an electric diode, being known as thermal diode. This principle is already known for a long time, but its use is still not extensive, and there are no basic rules for the cavity design or even a theoretical study of viability for this use replacing the conventional insulation systems. The objective of this work is to simulate the heat transfer process inside a thermal diode, in order to obtain the optimal geometry and dimensions, so as to verify its viability for use in buildings. The numerical data are validated through comparing with that obtained from the test applied to cellular concrete bricks.*

Keywords. *Thermal diode, Insulation, Thermal comfort, Natural convection.*