

Modelo de Simulação Térmica de Elementos Construtivos não Homogéneos

M. Guedes de Almeida*, E. Maldonado⁺

* *Dep^{to} de Eng^a Civil da Escola de Engenharia da Universidade do Minho
Azurém, 4800 Guimarães, Portugal*

⁺ *Dep^{to} de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da F.E.U.P.
Rua dos Bragas, 4099 Porto Codex, Portugal*

RESUMO

A correcta avaliação do desempenho térmico de um edifício passa pela determinação da quantidade de calor que cada elemento que ajuda a definir o espaço consegue armazenar em períodos de 24 horas, correspondente ao ciclo diário das solicitações exteriores a que está submetido. Por isso, neste trabalho apresenta-se um modelo matemático de quantificação da capacidade de armazenamento térmico diário especialmente desenvolvido para elementos não homogéneos e, em particular, para paredes de tijolo furado e lajes aligeiradas, tão comuns na nossa construção civil e que têm sido deficientemente caracterizados. O modelo matemático é um modelo dinâmico que usa o método numérico ADI para resolver a equação bidimensional de transferência de calor. Pretendeu-se que o modelo fosse o mais abrangente possível tanto no que diz respeito à definição das condições de fronteira como à constituição dos elementos construtivos.

1 – INTRODUÇÃO

O processo de armazenamento de calor de um qualquer elemento construtivo, seja ele homogéneo ou não, é um fenómeno tridimensional que pode ser descrito pela equação fundamental da condução de calor. Contudo, se os elementos forem homogéneos, ou constituídos por diferentes camadas homogéneas, e se as condições de fronteira forem simétricas, o fenómeno pode considerar-se bidimensional, descrito pela equação (1):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (1)$$

* Professora Auxiliar

⁺ Professor Catedrático

As paredes de tijolo e as lajes aligeiradas que também se pretende estudar não são homogêneas e, devido aos espaços de ar existentes no interior dos blocos cerâmicos, a transferência de calor através destes é um fenómeno algo complexo.

Neste trabalho foram testados vários modelos para tentar descrever a transferência de calor no interior destes blocos. De modo a se poder aplicar a equação (1), os alvéolos foram considerados como camadas homogêneas de ar, sendo, por isso, um tijolo constituído por camadas homogêneas alternadas de barro e ar, quer na direcção xx quer na direcção yy [1], onde a transferência de calor se dá apenas por condução. Em alguns modelos, a radiação e a convecção natural nos espaços de ar foram tidas em conta através da definição de um coeficiente de condutibilidade térmica equivalente.

A título de exemplo, o tijolo representado na figura 1, é simulado como sendo constituído por sete camadas em xx , sendo quatro camadas de barro (as camadas 1, 3, 5 e 7) e três de ar (as camadas 2, 4 e 6), e cinco camadas em yy , sendo três de barro (1, 3 e 5) e duas de ar (2 e 4).

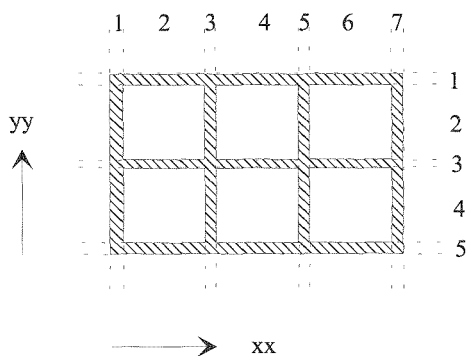


Figura 1 – Representação esquemática de um tijolo

Quando as várias camadas são homogêneas e as condições de fronteira são constantes ou seguem alguma lei que possa ser expressa matematicamente, a equação (1) tem uma solução analítica que pode ser encontrada em vários livros da especialidade [2,3]. Contudo, qualquer elemento pertencente à envolvente exterior de um edifício está sujeito a variações não regulares da temperatura e da radiação solar e, principalmente se estas variarem ao longo do domínio de integração, torna-se impossível a formulação matemática destas condições de fronteira. Tornou-se, portanto, necessário recorrer a um método numérico para resolver a equação (1) em toda a sua generalidade.

O método escolhido foi o método implícito-explícito ADI [4] por ser o mais preciso e o que converge com mais rapidez e estabilidade.

2 - FORMULAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

O método ADI é um método de diferenças finitas que, quando aplicado a um problema bidimensional instacionário, divide o incremento de tempo em dois meios incrementos de tempo, sendo o método implícito na direcção xx (método de Crank-Nicolson) e explícito na direcção yy (método de Euler) no primeiro meio incremento de tempo, enquanto que no segundo meio incremento de tempo alterna os métodos com as direcções.

Para aplicar este ou outro qualquer método de diferenças finitas à equação de condução de calor é necessário discretizar a equação (1) num domínio de integração definido pelas duas superfícies em contacto com o ar ambiente (superfície exterior e superfície interior) e por dois planos de simetria (devidos à simetria das condições de fronteira), como se pode ver na figura 2.

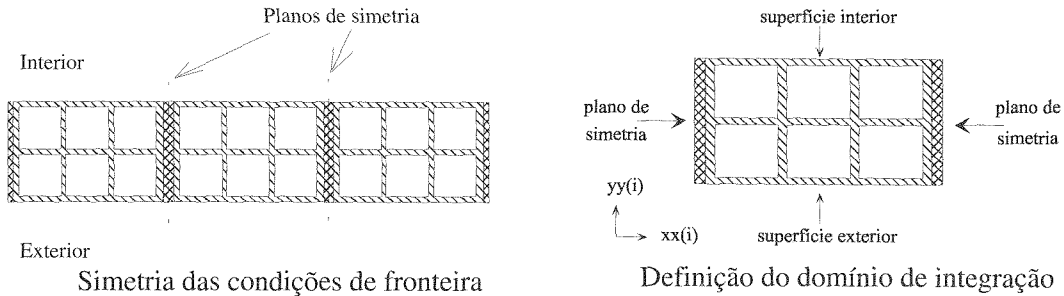


Figura 2 - Definição do domínio de integração

O domínio de integração é dividido em nós através de uma grelha de dimensões variáveis, sendo passível de se ajustar a qualquer tipo de tijolo de geometria rectangular e a qualquer tipo de elemento armazenador (simples ou composto).

2.1 - NÓS CORRENTES

A cada nó em que foi dividido o domínio de integração pode-se associar uma capacidade térmica que é igual ao produto da sua massa pelo calor específico e é dada por:

$$RC_{i,j} = \left(\rho c_p \Delta x \Delta y \right)_{i,j} = \frac{1}{4} \left(\begin{aligned} & \left(\rho_1 c_{p1} \Delta x^- \Delta y^+ \right) + \left(\rho_2 c_{p2} \Delta x^+ \Delta y^+ \right) + \\ & \left(\rho_3 c_{p3} \Delta x^+ \Delta y^- \right) + \left(\rho_4 c_{p4} \Delta x^- \Delta y^- \right) \end{aligned} \right) \quad (2)$$

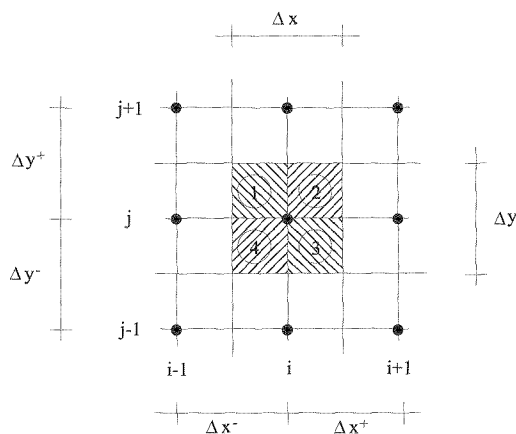


Figura 3 - Definição da capacidade térmica efectiva.

A condutibilidade térmica entre nós adjacentes é calculada como sendo a média ponderada das condutibilidades térmicas dos materiais aos quais pertencem os nós. Assim, a condutibilidade térmica entre dois nós consecutivos é dada por:

entre o nó i,j e o nó $i,j+1$:

$$k_y^+ = \frac{k_1 \Delta x^- + k_2 \Delta x^+}{\Delta x^+ + \Delta x^-}$$

entre o nó i,j e o nó $i+1,j$:

$$k_x^+ = \frac{k_2 \Delta y^+ + k_3 \Delta y^-}{\Delta y^+ + \Delta y^-}$$

entre o nó i,j e o nó $i,j-1$:

$$k_y^- = \frac{k_3 \Delta x^+ + k_4 \Delta x^-}{\Delta x^+ + \Delta x^-}$$

entre o nó i,j e o nó $i-1,j$:

$$k_x^- = \frac{k_1 \Delta y^+ + k_4 \Delta y^-}{\Delta y^+ + \Delta y^-} \quad (3)$$

2.2 - NÓS COM TRATAMENTO ESPECIAL

Há nós que não correspondem à situação descrita anteriormente e que, portanto, necessitam de um tratamento especial, nomeadamente:

- os nós pertencentes ao contorno do domínio de integração;
- os nós interiores do tijolo em contacto com o ar (nos alvéolos), onde é necessário entrar em consideração com fenómenos de radiação e convecção natural.
- e, no caso, por exemplo, de paredes duplas, os nós pertencentes ao contorno da câmara de ar, onde também é necessário entrar em consideração com fenómenos de radiação e convecção natural.

As fronteiras esquerda e direita, devido à simetria das condições de fronteira, podem ser consideradas adiabáticas, fazendo-se $k_x^- = 0$ e $k_x^+ = 0$. Para os nós pertencentes às fronteiras exterior e interior, bem como, no caso de paredes duplas, os nós em contacto com a câmara de ar, é necessário substituir os termos que contêm k_y^+ e k_y^- por outros que entrem em consideração com a convecção, a radiação de grande comprimento de onda e a radiação solar (quando for o caso). Por exemplo, para a fronteira exterior, o termo que contém k_y^- é substituído por outro com a seguinte forma:

$$\left(\alpha_0 (T_{\text{ext}} - T_{i,1}) + \sigma \epsilon_{\text{ext}} (T_{\text{ext}}^4 - T_{i,1}^4) + \alpha G_T \right) \frac{\Delta x^+ + \Delta x^-}{2} \quad (4)$$

Para os nós interiores em contacto com o ar nos alvéolos do tijolo, dada a complexidade dos fenómenos de transferência de calor, aliada à sua complicada geometria, optou-se pela definição de um coeficiente de condutibilidade térmica equivalente (λ_{eq}) que traduzisse os efeitos da radiação e convecção natural no interior desses espaços.

Definiram-se três modelos:

i) No primeiro modelo, o mais simples, considerou-se que a transferência de calor nos espaços de ar interiores se dava unicamente por condução através do ar, desprezando-se a radiação e a convecção natural. Com este modelo, coloca-se a hipótese de que as dimensões das cavidades são suficientemente pequenas para que o ar no seu interior esteja sempre

estático (sem convecção) e em que as diferenças de temperatura extremas são tão pequenas que os fenômenos radiativos são também desprezáveis.

ii) No segundo modelo, entrou-se em consideração com o efeito da convecção natural. Definiu-se, para tal, um λ_{eq} que é função do número de Prandtl e do número de Grashof [1,5]. Uma vez definido o λ_{eq} , entra-se com este valor na definição dos parâmetros, atrás caracterizados, k_y^- , k_y^+ , k_x^- , k_x^+ , como se se tratasse de um fenômeno de condução pura entre dois quaisquer nós. Continua-se a desprezar, pelas mesmas razões, a radiação.

iii) No terceiro modelo, considerou-se também a existência da radiação, recorrendo-se igualmente a equações simplificadas para a definição de um λ_{eq} [1,6,7]. Foram consideradas duas situações:

- caso em que a convecção natural pode ser desprezada, entrando-se apenas em consideração com a condução e a radiação;

- caso onde são considerados, em conjunto, os três fenômenos de transferência de calor: condução, radiação e convecção.

Estes três modelos foram testados experimentalmente de modo a verificar qual deles conduzia a melhores resultados.

3 - VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO MODELO

O modelo apresentado foi implementado num programa numérico que necessitava de ser validado no que diz respeito à simulação dos fenômenos de transferência de calor, principalmente no interior no tijolo.

Para validar este programa foram construídas três paredes de teste distintas: uma parede maciça de blocos de betão, uma parede simples de tijolo furado e uma parede dupla de tijolo furado com uma câmara de ar de 4 cm de espessura, tendo-se observado a resposta das mesmas, quer em regime permanente, quer em regime dinâmico. Estas paredes foram monitorizadas sob condições controladas de modo a se poder manipular as temperaturas a que eram submetidas.

Para criar este ambiente de temperaturas controladas foi construído um compartimento em madeira, de forma paralelepípedica, totalmente fechado e completamente isolado, no interior do qual foi colocada, ao centro, a parede a testar, de modo a criar duas zonas distintas e estanques. O gradiente de temperaturas entre estas duas câmaras foi conseguido criando duas zonas a temperaturas diferentes: uma zona quente a 35°C e uma zona fria a cerca de 10°C.

A primeira experiência foi realizada com a parede maciça de blocos de cimento, cujas propriedades térmicas eram bem conhecidas pois já tinham sido determinadas e confirmadas em vários estudos precedentes [8]. Esta experiência permitiu calibrar a instalação experimental e permitiu a determinação dos coeficientes de convecção nas câmaras quente e fria, de modo a reduzir o número de variáveis desconhecidas aquando da simulação das paredes de tijolo.

Uma vez testado o bom funcionamento da instalação e a boa resposta do programa à simulação da parede maciça, foram simuladas as duas paredes não homogêneas referidas. As paredes foram exaustivamente instrumentadas, como se pode ver nas figuras 4 e 5, de modo a se poder saber com precisão a distribuição de temperaturas ao longo de toda a espessura da parede durante as experiências.

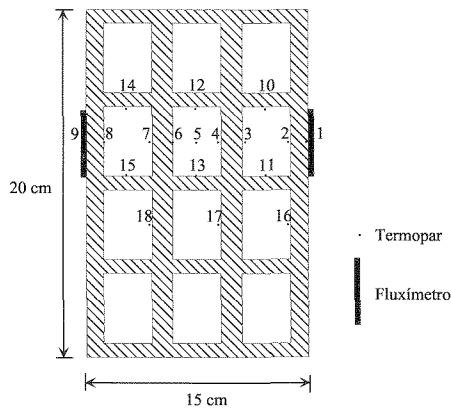


Figura 4 - Esquema representativo da instrumentação de um tijolo da parede simples.

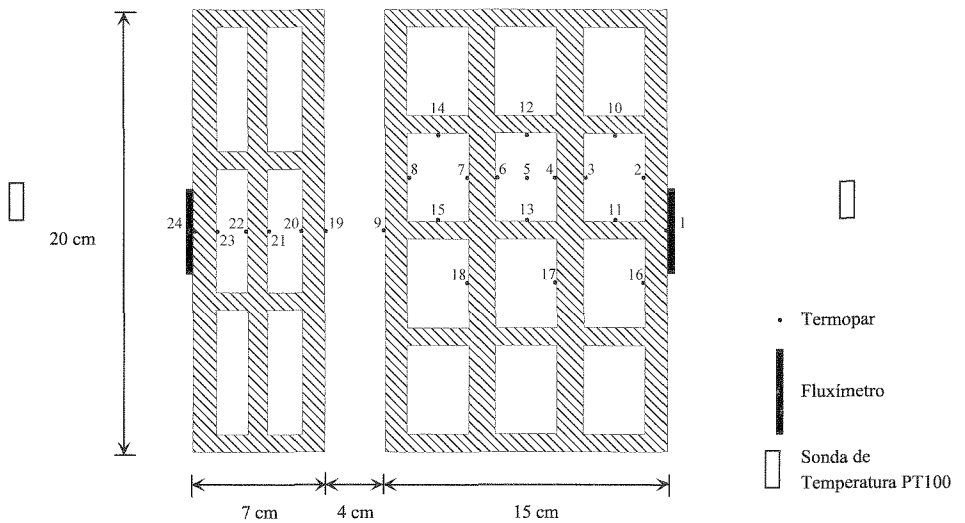


Figura 5 - Esquema representativo da instrumentação de uma parede dupla

Estas paredes experimentais foram simuladas com o programa numérico referido, aplicando os três modelos apresentados.

As paredes foram simuladas quer em regime permanente, quer em regime dinâmico, e os valores simulados foram comparados com os valores obtidos experimentalmente.

Em todas as situações, quer para a parede simples, quer para a parede dupla, o modelo que conduzia a melhores resultados foi sempre aquele que apenas considerava que a transferência de calor no interior dos alvéolos dos blocos cerâmicos se dava apenas por condução. Confirma-se assim que, devido às pequenas dimensões dos espaços de ar, completamente fechados e estanques, as correntes de convecção são praticamente inexistentes e que as diferenças de temperatura entre nós adjacentes são relativamente pequenas e, por isso, a radiação não chega a ter um papel muito significativo no processo de transferência de calor.

A título exemplificativo, na figura 6, pode observar-se um estudo comparativo entre os resultados obtidos considerando apenas a condução e os obtidos quando se associa a condução com a convecção através da definição de um coeficiente de condutibilidade térmica equivalente, como definido anteriormente. Os resultados mostrados na figura correspondem às temperaturas medidas e obtidas pelos dois processos de simulação referidos, no ponto de medida número 3 (ponto no interior de um alvéolo), de acordo com o indicado no esquema da figura 4.

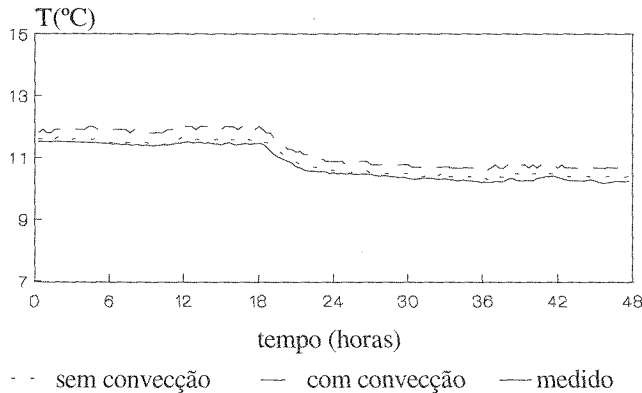


Figura 6 - Comparação entre as temperaturas medidas e as simuladas, com e sem convecção, para o ponto de medida número 3, pertencente a um alvéolo.

Nas figuras seguintes pode ver-se, a título de exemplo, o ajuste entre os valores medidos numa situação dinâmica a que a parede foi submetida, e os obtidos por simulação usando o primeiro modelo, tanto em relação às temperaturas como em relação aos fluxos de calor, evidenciando a boa resposta deste modelo.

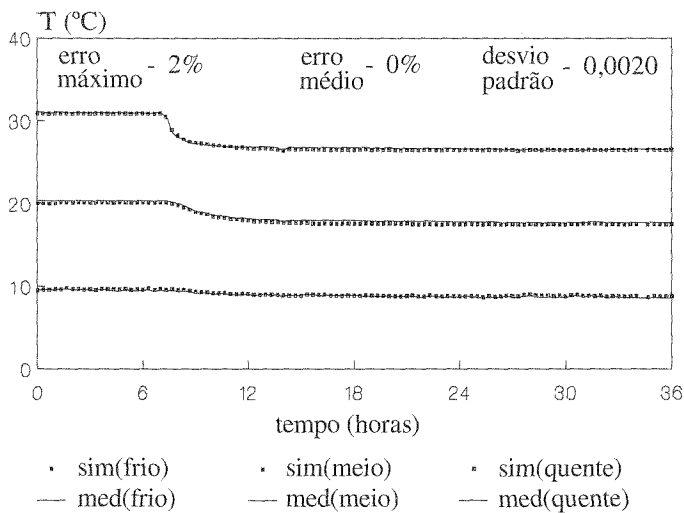


Figura 7 - Comparação entre os valores medidos e os simulados de temperaturas para uma parede simples de tijolo.

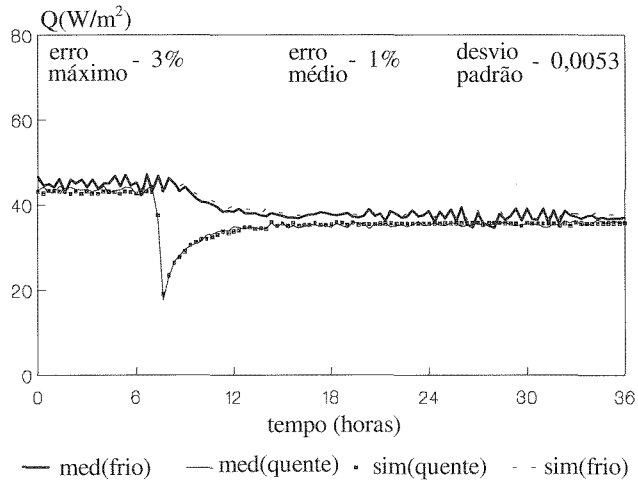


Figura 8 - Comparação entre os valores medidos e os simulados de fluxos de calor para uma parede simples de tijolo.

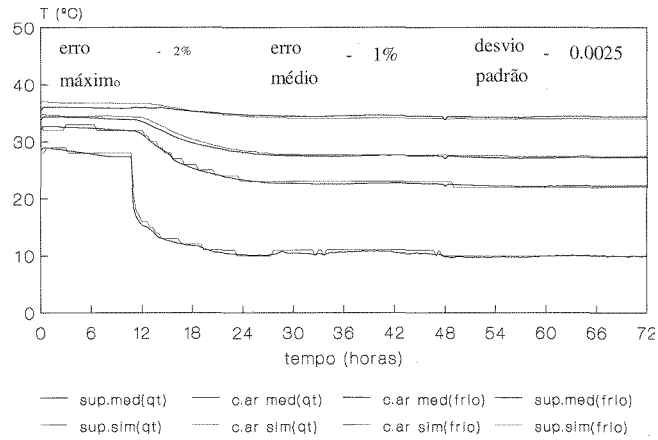


Figura 9 - Comparação entre os valores medidos e os simulados de temperaturas para uma parede dupla de tijolo.

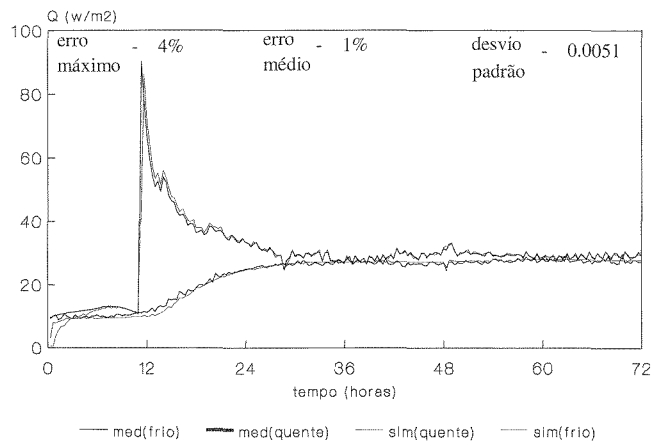


Figura 10 - Comparação entre os valores medidos e os simulados de fluxos de calor para uma parede dupla de tijolo.

4 - CÁLCULO DA QUANTIDADE DE CALOR ARMAZENADO

Uma vez definido o mecanismo de transferência de calor nos blocos cerâmicos, e por isso, definidos os coeficientes de condutibilidade térmica em todos os nós, é possível determinar a evolução instacionária da temperatura aplicando o método ADI [4]. As temperaturas são obtidas para todos os nós do domínio de integração, e a intervalos de tempo definidos. Com estas temperaturas é, então, possível determinar os fluxos de calor que atravessam cada uma das superfícies do elemento em contacto com o ar ambiente. Conhecidas as temperaturas é também possível a quantificação da quantidade de calor que cada elemento consegue armazenar durante um certo período de tempo. Assim, a energia total armazenada é dada por:

$$Q_{\text{ARM}} = \sum_{i=1}^{\text{NTX}} \sum_{j=1}^{\text{NTY}} RC_{i,j} T_{i,j} \quad (5)$$

em que o termo $RC_{i,j}$ é a capacidade térmica associada a cada nó, anteriormente definida. Através da equação (5), obtém-se, para cada instante, a quantidade total de calor armazenada pelo elemento em relação a uma dada temperatura de referência. A energia armazenada num certo intervalo de tempo é obtida pela diferença entre o valor da energia armazenada no início desse intervalo de tempo e o valor dessa energia no fim do mesmo intervalo de tempo. Este parâmetro é fundamental para a quantificação da capacidade térmica efectiva de um elemento construtivo, necessário para uma mais rigorosa simulação térmica de edifícios [9,10].

5 – CONCLUSÃO

O modelo apresentado é um método numérico detalhado que simula situações bidimensionais de transferência de calor tais como as que se encontram nas paredes de tijolo e nas lajes aligeiradas tão comuns em Portugal e que, até aqui, não se podiam simular com tanta precisão. Torna-se assim possível contabilizar com mais rigor a capacidade de armazenamento de elementos, quer homogéneos, quer não homogéneos, simples ou compostos, pertencentes à envolvente exterior ou à envolvente interior e sob a acção de solicitações que obedecem às condições de funcionamento reais.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Guedes de Almeida; "Simulação Térmica de Edifícios com um Modelo Numérico de Capacidade Térmica Variável". Dissertação apresentada à F.E.U.P. para obtenção do grau de Doutora em Engenharia Mecânica, Porto, 1994.
- [2] H. S. Carslaw, J. C. Jaeger; Conduction of Heat in Solids. Oxford University Press, 2ª Edição, Oxford, 1959.
- [3] V. S. Arpaci; Conduction Heat Transfer. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1966.
- [4] D. W. Peaceman, H. H. Rachford; "The Numerical Solution of Parabolic and Elliptic Differential Equations". Journal of S.I.A.M., vol. 3, pp. 28-41, 1955.
- [5] E. R. G. Eckert, R. Drake; Analysis of Heat and Mass Transfer. International Student Edition, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd, 1972.

- [6] Alan J. Chapman; Heat Transfer. Third Edition, Collier Macmillan Publishers, London, 1974.
- [7] B. R. Anderson; "The Thermal Resistance of Airspaces in Building Constructions". Building and Environment, vol. 16, nº 4, pp. 35 - 39, 1981.
- [8] H. Gonçalves; "Interação de Sistemas Solares Passivos de Ganho Directo e de Ganho Indirecto. Estudo Numérico e Experimental". Dissertação apresentada à F.E.U.P. para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Porto, 1990.
- [9] M. Guedes de Almeida, E. Maldonado; "Simulação Térmica de Edifícios baseada num Modelo de Capacidade Térmica Variável". Proc. VIII Congresso Ibérico de Energia Solar, SPES - ISES, Porto, 1997.
- [10] M. Guedes de Almeida, Luís Bragança, E. Maldonado; "An Easy and Fast Computer Program for Thermal Simulation of Buildings Based on Variable Heat Capacity Concept". Proc. PLEA 98 - International Conference on "Passive and Low Energy Architecture", pp.547 - 550, Lisboa 1998.

Agradecimento: Agradece-se à JNICT (Junta Nacional de Investigação Científica) o financiamento do Projecto PBIC/C/CEG/2418/95 no âmbito do qual foi parcialmente realizado este trabalho.