

# Modelo simplificado de previsão do comportamento térmico de edifícios

Ricardo Lobão<sup>1,†</sup>, Manuela de Almeida<sup>2</sup>

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

## RESUMO

Este trabalho, tem como objectivo a apresentação de um modelo de simulação simplificado, que permite avaliar o comportamento térmico de edifícios que apresentem soluções construtivas diversas, sendo capaz de antecipar conclusões quanto às diferentes tipologias estruturais e de organização espacial permitindo assim maximizar o conceito de conforto térmico dos espaços. Este modelo, designado de “*mpcte*”, permite ao utilizador definir, quer em termos físicos quer em termos espaciais, toda a envolvente em estudo, incluindo as suas coordenadas no globo terrestre (latitude e longitude). O modelo permite também o carregamento de um ficheiro climático, representativo do local do espaço em estudo. Em termos de resultados, é possível obter a evolução horária das temperaturas interiores de um compartimento de um edifício, bem como a inércia térmica que caracteriza o espaço em estudo dado que neste trabalho, e ao contrário do que é usual, este parâmetro é apresentado como um parâmetro dinâmico, dependendo da radiação solar incidente no elemento construtivo e da amplitude térmica do espaço.

## INTRODUÇÃO

O cumprimento das políticas energéticas coloca constantes desafios aos projectistas que, para efectuarem a análise e o projecto de edifícios energeticamente eficientes, necessitam de saber quais as condições térmicas preferidas pelo Homem e ao mesmo tempo compreender a influência que as diversas tipologias dos edifícios têm na obtenção dessas condições. É, por isso importante que disponham de métodos de previsão do comportamento térmico dos edifícios e de avaliação do conforto térmico dos mesmos.

A melhoria do desempenho energético global de um edifício, não significa necessariamente a renovação total do mesmo, podendo limitar-se aos componentes que são mais importantes para o seu desempenho energético e que são economicamente rentáveis, pelo que a existência de ferramentas que permitam a avaliação das melhores soluções construtivas sob o ponto de vista de uma análise térmica comparativa assumem grande relevância.

Essa avaliação pode ser efectuada através de um estudo, que resultará numa lista de medidas de conservação da energia para condições médias do mercado local e que satisfaçam critérios de rentabilidade económica. Antes do arranque da construção, poderão ser

---

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia Civil, Serviços Técnicos da Universidade do Minho

<sup>†</sup> Ricardo Lobão ([rjl@stec.uminho.pt](mailto:rjl@stec.uminho.pt))

<sup>2</sup> Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

necessários estudos específicos caso a medida, ou medidas, sejam consideradas viáveis.

Foi na procura de instrumentos de análise e avaliação, que procurassem a aplicabilidade das políticas de desempenho energético definidas no âmbito das directivas europeias e dos planos nacionais, sob a forma de uma interface gráfica mais clara e simples, que surgiu o presente trabalho. Em termos de aplicação prática, este programa pretende criar uma “interface” simples e clara na análise térmica de soluções construtivas, de modo a compatibilizá-lo com as ferramentas de projecto e/ou de desenho utilizadas pelos projectistas, de modo a poder-se simplificar a avaliação térmica dos edifícios quer na fase de projecto quer na fase de estudo e avaliação das soluções a incorporar, através da análise da influência de diferentes parâmetros (orientação do edifício e dos envidraçados, sombreamentos, tipos de componentes, diferentes elementos construtivos, etc.) no desempenho térmico do edifício.

## 1. METODOLOGIA

A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho assenta na implementação de um modelo matemático anteriormente desenvolvido por Almeida, M. Guedes de (1995) que, recorrendo a uma equação de balanço entre os ganhos e perdas térmicas desse espaço, prevê a evolução da temperatura ambiente em função da solução construtiva existente, caracterizando simultaneamente a inércia que lhe está associada.

O espaço para o qual se implementou o modelo matemático tem uma geometria simples. A configuração geométrica corresponde à de uma sala, paralelepipedica, com um único compartimento, podendo ser representativa de um edifício unizona ou de um compartimento independente de um edifício. Sendo assim, a envolvente é constituída por quatro paredes, a cobertura e o pavimento.

Admitiu-se que a captação dos ganhos solares é feita por um envidraçado, existente numa das quatro possíveis fachadas, qualquer que seja a sua orientação. Na figura 1 pode ver-se um esquema representativo do compartimento simulado.

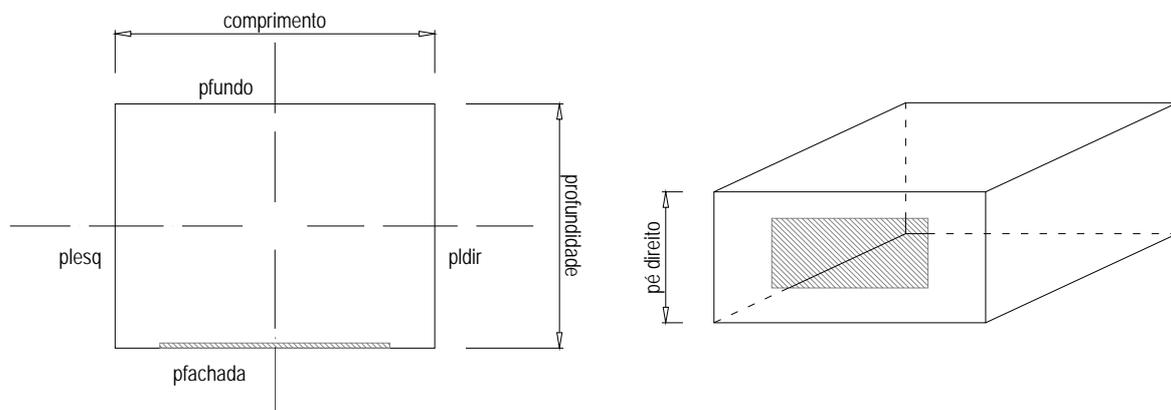


Figura 1 – Esquema do compartimento simulado

A evolução da temperatura ambiente no interior do espaço não depende somente dos ganhos solares ou da inércia térmica associada aos elementos que constituem a envolvente desse espaço. A temperatura interior é o resultado de um balanço energético dinâmico (Figura 2) entre os ganhos solares através dos envidraçados ( $G_{sol}$ ) e as perdas verificadas através da envolvente para o exterior, quer por condução através de elementos opacos ( $Q_{pe}$ ), quer por renovação de ar (infiltração e ventilação natural –  $Q_{inf}$ ).

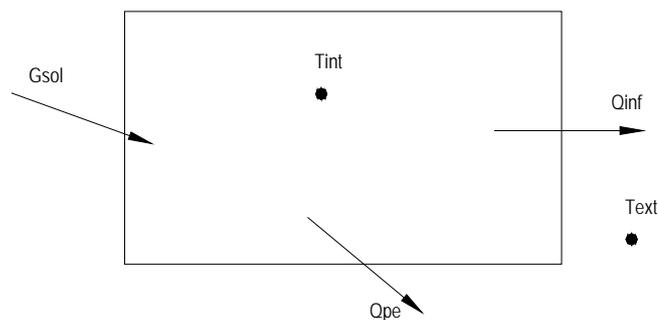


Figura 2 – Balanço energético do espaço em estudo

Uma vez caracterizados a envolvente e o clima, é possível estabelecer o balanço entre ganhos e as perdas de energia para o espaço em estudo:

$$C_{eff} \frac{dT_{int}}{dt} = G_{sol} - Q_{inf} - Q_{pe} = G_{sol} - Q_{inf} - \sum_{i=1}^n U_i A_i (T_{int} - T_{ext}) \quad (1.1)$$

O parâmetro  $C_{eff}$  – capacidade térmica efectiva – é uma variável que está relacionada com a quantidade de massa presente e, por isso, com a inércia térmica do espaço. Este parâmetro, definido por Almeida, M. Guedes de (1995), é um parâmetro dinâmico utilizado para caracterizar a inércia e em função dela prever a evolução da temperatura ambiente interior. Este parâmetro, característico de cada elemento da envolvente, depende da quantidade calor por ele armazenado,  $Q_{arm}$ , e, conseqüentemente, da massa presente, do valor da radiação solar nele incidente ( $R_i$ ) e da diferença de temperaturas entre o ambiente interior e o ambiente exterior ( $\Delta T$ ). O parâmetro  $Q_{arm}$  representa a quantidade de calor armazenado por  $m^2$  de um dado elemento armazenador num período de 24 horas. Este parâmetro foi calculado no decurso de trabalhos de Almeida, M. Guedes de (1995) e Garcia, Valdemar Raul Ramos (1997), para diversos elementos construtivos, de acordo com a equação 1.2. Os coeficientes A, B, C, D, E e F desta equação encontram-se disponíveis numa base de dados previamente desenvolvida por Garcia, Valdemar Raul Ramos (1997) e foram incorporados no programa desenvolvido ao longo deste trabalho.

$$Q_{arm} = A\Delta T R_i^2 + B R_i^2 + C\Delta T R_i + D R_i + E\Delta T + F \quad (MJ/m^2) \quad (1.2)$$

## 2. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NUM PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

A equação de balanço atrás definida foi implementada para diversas situações através de um programa de cálculo automático. Este programa é composto por diversos módulos que permitem ao utilizador uma interacção com os múltiplos dados de entrada de forma a caracterizar física e espacialmente o espaço em estudo. Na figura 3 é apresentada a janela de caracterização dos dados gerais do projecto, podendo o utilizador redefinir os parâmetros introduzidos em qualquer etapa do cálculo.

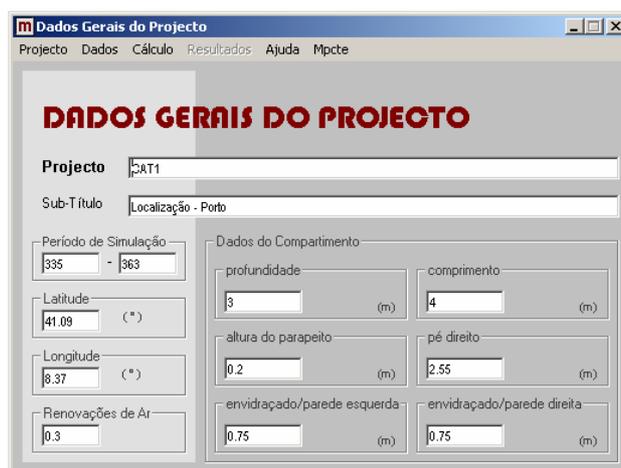


Figura 3 – Janela de definição de dados gerais do projecto

O programa permite, além da caracterização dos dados gerais do projecto (características geométricas do espaço), a sua definição em termos dos vários constituintes da envolvente quer sejam as paredes, pavimento, cobertura ou vãos envidraçados.

## 2.1. Caracterização dos elementos da envolvente

Relativamente à definição dos elementos constituintes da envolvente, é de salientar que de uma forma geral estes são definidos tendo em conta as suas características termofísicas, de orientação, de condição fronteira, de tipologia, entre outros. Existem nesta versão algumas limitações no que diz respeito à introdução de elementos dado que o programa apenas permite a introdução de quatro elementos de parede e um elemento de cobertura, um de pavimento e um de envidraçado.

### 2.1.1. Elementos de Paredes

A apresentação da interface de introdução de todos estes dados é fornecida sob a forma apresentada nas figuras 4 e 5.

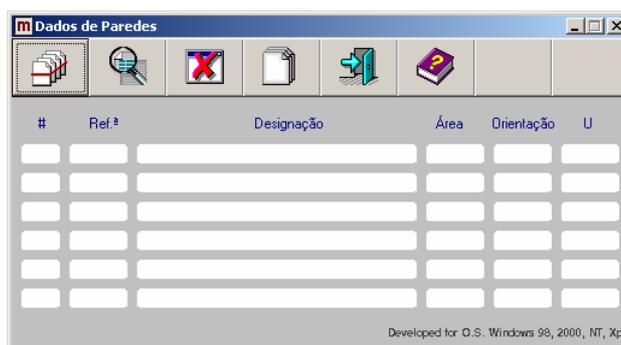


Figura 4 – Janela referente a “*Dados de Paredes*”

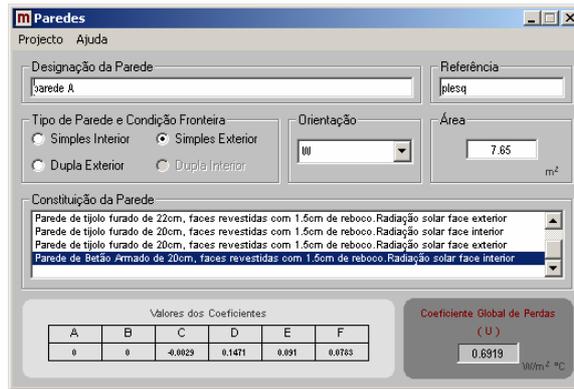


Figura 5 – Janela para definição de elementos de parede

Na figura 5 podem-se observar os diversos parâmetros necessários à caracterização do elemento, entre os quais se destacam o coeficiente global de perdas, a tipologia, orientação e a sua constituição. Uma base de dados com as características de um grande número de paredes e com os valores dos necessários coeficientes da equação 1.2, encontra-se já incorporada no programa, conforme se pode constatar na figura.

### 2.1.2. Elementos de Cobertura

Na definição de elementos da cobertura, o processo de introdução dos diversos parâmetros necessários à sua composição é em tudo semelhante ao apresentado para os elementos de parede. Diverge no entanto no que se refere aos elementos que o compõem, como pode ser constatado nas figuras 6 e 7.



Figura 6 – Janela referente a “Dados de Coberturas”

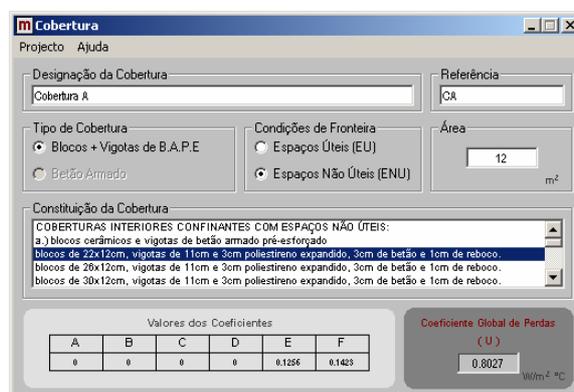


Figura 7 – Janela para definição de elemento de cobertura

Na figura 7 podem-se observar os diversos parâmetros necessários à caracterização do elemento, entre os quais se destacam o coeficiente global de perdas, a sua condição fronteira, área do elemento em causa e a sua constituição, incorporando já a referida base de dados com os valores dos coeficientes da equação 1.2.

### 2.1.3. Elementos de Pavimento

Também na definição de elementos de pavimento, o processo de introdução dos diversos parâmetros necessários à sua composição é semelhante ao apresentado para os elementos anteriores. No entanto varia no que respeita aos parâmetros necessários à sua caracterização como pode ser constatado nas figuras 8 e 9.



Figura 8 – Janela referente a “Dados de Pavimentos”



Figura 9 – Janela para definição de elemento de pavimento

Na figura 9 podem-se observar os diversos parâmetros necessários à caracterização do elemento que em tudo é semelhante ao apresentado para o elemento de cobertura e entre os quais também se destacam o coeficiente global de perdas, a sua condição fronteira, área e a sua constituição, bem como os coeficientes da equação 1.2.

### 2.1.4. Elementos de Envidraçado

Na definição do envidraçado, e apesar de o processo de introdução dos diversos parâmetros necessários à sua composição ser semelhante ao apresentado para os elementos anteriores, devido à sua especificidade, os parâmetros que os definem são mais concisos e abrangentes devido ao facto de eles estarem associados aos ganhos térmicos do espaço, que são fundamentais no cálculo dos balanços energéticos ao longo do estudo. Esta situação pode ser constatada nas figuras 10 e 11.

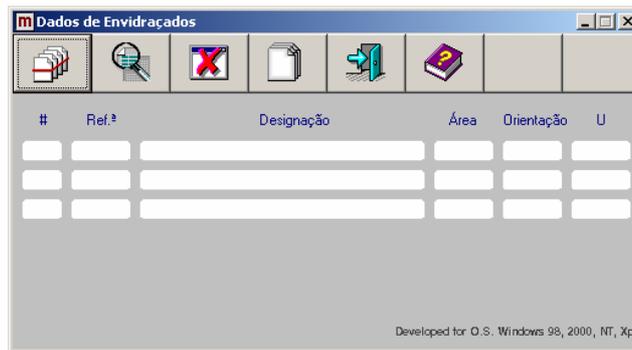


Figura 10 – Janela referente a “Dados de Envidraçados”

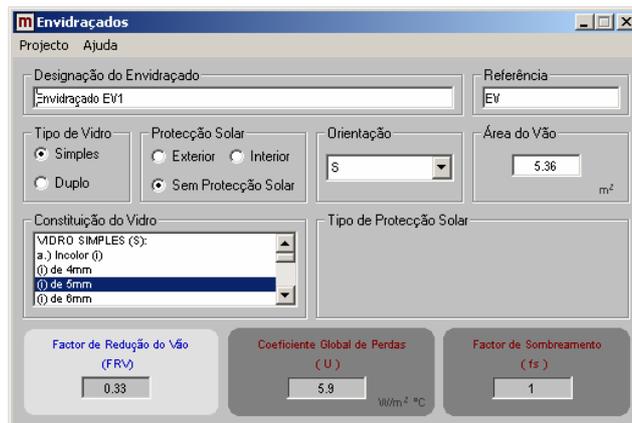


Figura 11 – Janela para definição do envidraçado

Na figura 11 podem-se observar os diversos parâmetros necessários à caracterização do elemento. Esta caracterização, além de permitir a definição estrutural e espacial do vidro, da sua protecção solar - importante na obtenção das condições de conforto - e a sua orientação, permite ainda definir o factor de redução do vão envidraçado (uma vez que é assumido que a caixilharia não permite ganhos térmicos) e também o factor de sombreamento, que está relacionado com os diferentes obstáculos exteriores à entrada da radiação no espaço em estudo.

## 2.2.Elementos do cálculo

Após a caracterização da envolvente é necessário a introdução de um ficheiro climático representativo das temperaturas e radiação solar exterior verificadas durante o período de estudo.

Este ficheiro normalmente é obtido recorrendo ao Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica através das suas estações de medição espalhadas pelo território nacional (isto se o local em estudo se localizar em Portugal) ou a outros dados de estações meteorológicas existentes. Para se proceder ao carregamento deste ficheiro, será necessário recorrer à janela da figura 12.

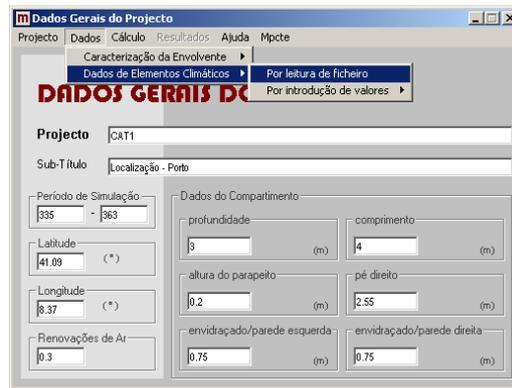


Figura 12 – Introdução de ficheiro de dados de elementos climáticos

### 2.3.Cálculo

Após a conclusão do carregamento do ficheiro climático está-se em condições de dar ordem de cálculo ao programa. Após esta ordem o programa gera automaticamente um ficheiro de resultados. Estes resultados podem ser visualizados quer de forma numérica, no ficheiro “*Resultados*”, quer de forma gráfica, nos gráficos gerados pelo programa. Nas figuras seguintes podem-se observar os diversos gráficos gerados assim como o respectivo ficheiro de resultados.

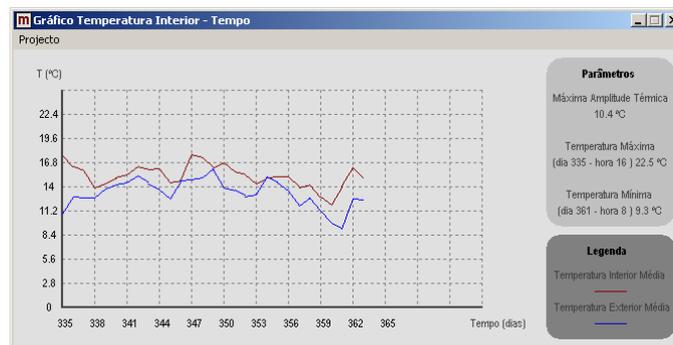


Figura 13 – Gráfico “Temperatura – Tempo” gerado pelo programa

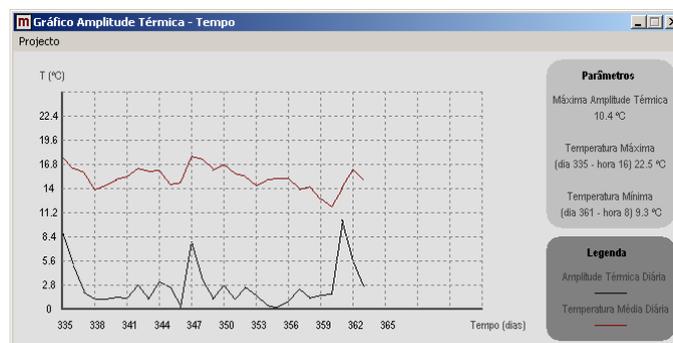


Figura 14 – Gráfico “Amplitude Térmica – Tempo” gerado pelo programa

Além destes gráficos o programa gera também gráficos que relacionam a Capacidade Térmica Efectiva – *Ceff* – com o parâmetro “*Tempo*” e com o parâmetro “*Amplitude Térmica*” (figura 15 e 16), permitindo apresentar o *Ceff* como um parâmetro variável, ao contrário dos modelos de Guglielmini, G., Misale, M. e Reale, G. (1985), Mathews, E., Rosseau, P., Richards, P. e Lombard, C. (1991), Balcomb, J.D., Jones, R.D., McFarland, R.D. e Wray, W.O. (1984) e Balcomb, J.D. e Wray, W.O. (1987), que serviram de base a este estudo e que associam a capacidade de armazenamento apenas às características termofísicas da envolvente, e, por isso, apresentam um valor único constante característico do espaço.

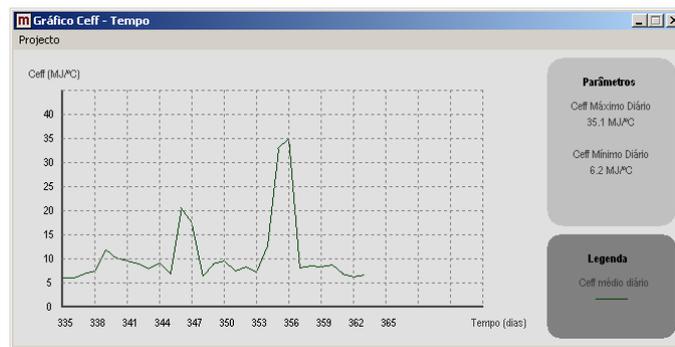


Figura 15 – Gráfico “Ceff – Tempo” gerado pelo programa

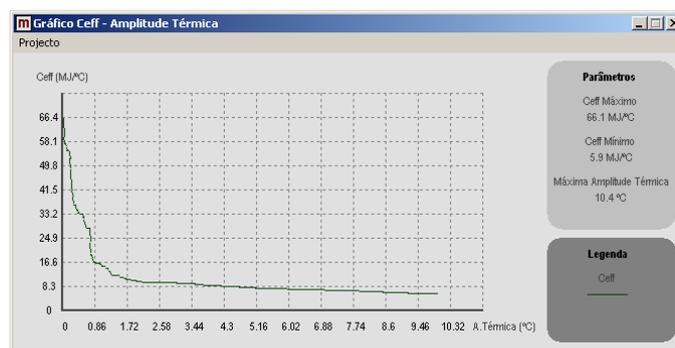


Figura 16 – Gráfico “Ceff – Amplitude Térmica” gerado pelo programa

Na figura 17 pode-se observar o ficheiro de resultados gerado pelo programa. Neste, são apresentados todos os parâmetros relativos à determinação das variáveis envolvidas no processo de cálculo.

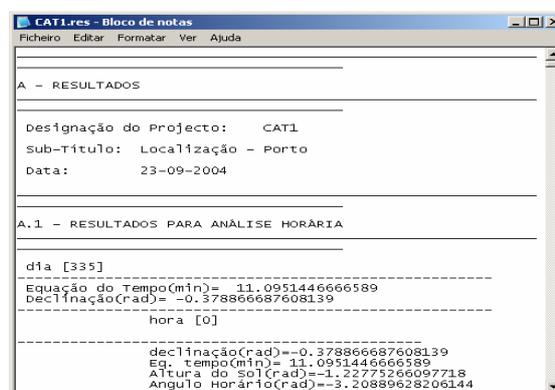


Figura 17 – Ficheiro de resultados

### 3. APLICAÇÃO DO PROGRAMA A UM CASO PRÁTICO

De forma a demonstrar a aplicação prática deste programa a uma situação real, bem como demonstrar a sua eficácia e precisão de cálculo, foi feito um estudo do comportamento de uma célula de teste, localizada no Porto, e para a qual existia informação bastante detalhada, quer do ponto de vista construtivo e geométrico, quer do ponto de vista climático, para além de informação relevante quanto ao seu comportamento térmico. A simulação de comportamento térmico desta célula foi feita para um mês de Inverno (Dezembro), tendo-se obtido a evolução da temperatura ambiente no interior da célula ao longo desse mês, em função dos valores medidos da temperatura ambiente exterior e da radiação solar incidente e das características termofísicas da envolvente.

Na figura 18 podem ver-se alguns pormenores (alçados, planta e corte) da referida célula.

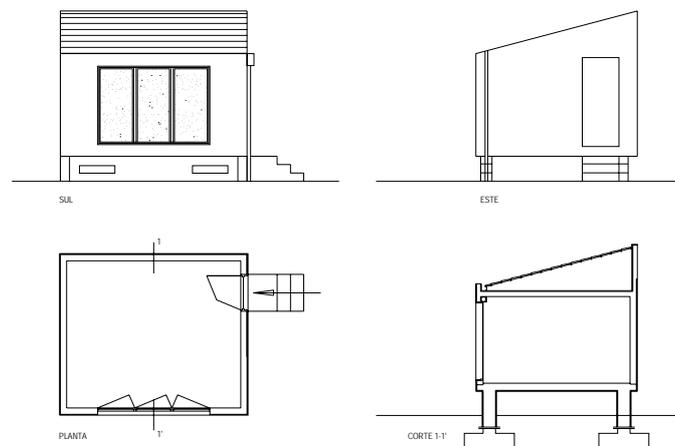


Figura 18 – Planta, alçados e corte da célula de teste

A célula de teste, com  $12.00\text{m}^2$  de área de pavimento, dispunha apenas de um sistema de ganho directo, apresentando o envidraçado uma área de captação de  $3.60\text{m}^2$  com um coeficiente  $U$  de  $5.9\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ . A estrutura desta célula de teste consiste nos elementos que se podem observar na figura 19. A completa definição estrutural dos elementos pode ser encontrada em Almeida, M. Guedes de (1995) e Lobão, Ricardo Jorge A.S. (2005).

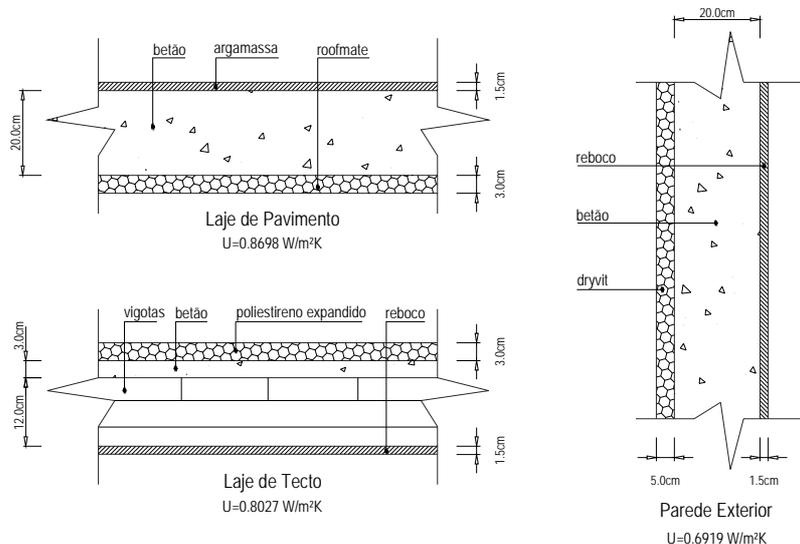


Figura 19 – Elementos da envolvente

As propriedades térmicas dos materiais e os respectivos valores dos coeficientes de convecção, emissividades e coeficientes de absorção são as que constam em Lobão, Ricardo Jorge A.S. (2005) e Gonçalves, H. (1990).

Para a simulação da célula de teste era também necessário conhecer o número de renovações de ar por hora aí verificado. O valor usado foi de 0.30 resultante de medições efectuadas no decurso dos estudos de Gonçalves, H. (1990) e Sá, R. e Maldonado, E. (1992).

### 3.1.Recolha de dados

O comportamento da célula foi simulado para o mês de Dezembro, durante o qual os valores horários da temperatura ambiente exterior e da radiação solar global em superfície vertical orientada a Sul foram medidos por uma sonda de temperatura e um piranómetro pertencentes a uma estação meteorológica existente no local, junto à célula de teste. Os valores horários da temperatura ambiente efectivamente verificada no interior da célula de teste encontravam-se disponíveis para o mesmo período, tendo sido medidos por um termopar do tipo T colocado no interior da célula a meio do compartimento. Todos os sensores foram calibrados individualmente conforme indicado por Maldonado, E. e Sá, R. (1989).

### 3.2. Resultados obtidos pelo programa de cálculo automático

Conhecidas as características geométricas da célula, as propriedades termofísicas dos elementos pertencentes à sua envolvente e os valores horários das solicitações exteriores, foi possível determinar a evolução da temperatura no interior da célula de teste, como consta em Almeida, M. Guedes de (1995) e Lobão, Ricardo Jorge A.S. (2005).

Uma vez todos estes elementos disponíveis, foi simulado o comportamento da célula de teste para o referido mês de Dezembro. Os resultados obtidos podem ser observados nos diversos gráficos gerados pelo programa.

Na figura 20 pode-se observar uma comparação entre os valores simulados e os valores medidos experimentalmente. Verifica-se que os valores obtidos por simulação possuem um andamento muito semelhante aos valores medidos e, tendo em conta as diversas simplificações efectuadas, dado que se trata de um método aproximado, os resultados obtidos são bastante satisfatórios o que oferece alguma garantia quanto à qualidade dos resultados que podem ser obtidos com este programa.

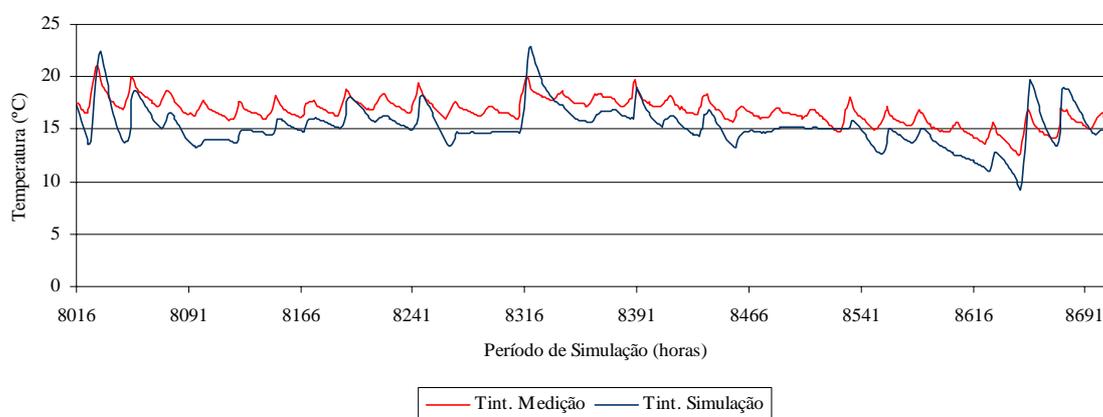


Figura 20 – Gráfico comparativo entre os valores da temperatura medida e simulada na célula

#### 4. CONCLUSÕES

Está-se perante um programa na sua versão inicial, limitado pela análise de um único espaço, e em que a sua definição está sujeita a diversos condicionalismos, pelo que, as próximas versões, abordarão, além do aspecto gráfico, o alargamento do âmbito da aplicação a um conjunto mais vasto de edifícios, em que a análise será efectuada simultaneamente a diversos espaços, confinantes entre si, e com uma maior gama de opções para definição da envolvente. Em termos de aplicação prática, este programa pretende criar uma “interface” simples e clara na análise térmica de soluções construtivas, de modo a compatibilizá-lo com as ferramentas de projecto e/ou de desenho utilizadas pelos projectistas, sobretudo arquitectos, que não possuem experiência nesta área, de modo a poder-se simplificar a avaliação térmica dos edifícios quer na fase de projecto quer na fase de estudo da melhoria das suas condições climáticas.

#### 5. REFERÊNCIAS

Almeida, M.Guedes de, "Simulação Térmica de Edifícios com um Modelo Numérico de Capacidade Térmica Variável", Dissertação apresentada à FEUP para obtenção do grau de Doutora em Eng.<sup>a</sup> Mecânica, Universidade do Porto, 1995.

Balcomb, J.D., Jones, R.D., McFarland, R.D. e Wray, W.O., *Passive Solar Heating Analysis: A Design Manual*, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1984.

Balcomb, J.D. e Wray, W.O., "Passive Solar Heating Analysis: Supplement One - Thermal Mass Effects and Additional SLR Correlations", Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1987.

Garcia, Valdemar Raul Ramos, "Quantificação da Inércia Térmica de Elementos Construtivos Portugueses", Tese de Mestrado em Ciências do Ambiente (especialização em Qualidade Ambiental), Universidade do Minho, Fevereiro de 1997.

Gonçalves, H., "Interacção 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.

Guglielmini, G., Misale, M. e Reale, G., "Metodo Semplificato per il Calcolo della Partecipazione de Pareti Interne Pluristrato nel Regime Termico Variable", *Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento, Refrigerazione dell'Aria*, pp. 575 - 584. Luglio, 1985.

Lobão, Ricardo Jorge A.S., "Modelo Simplificado de Previsão do Comportamento Térmico de Edifícios", Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Abril de 2005.

Maldonado, E. e Sá, R., *PASSYS Apparatus Manual*, Laboratório PASSYS do Porto, FEUP, 1989.

Mathews, E., Rosseau, P., Richards, P. e Lombard, C., "A Procedure to Estimate the Effective Heat Storage Capacity of a Building", *Building and Environment*, 26, pp. 179 - 188, 1991.

Sá, R. e Maldonado, E., "Thermal Behaviour of Two Massive Test-Cells During a Warm Summer Period", *PASCOOL Project*, Porto, 1992.