

## COMPORTAMENTO DE ETICS QUANDO SUJEITOS À TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM REGIME DINÂMICO

Inês Simões<sup>1,2\*</sup>, Nuno Simões<sup>1,2</sup> e António Tadeu<sup>1,2</sup>

1: ITeCons

Rua Pedro Hispano, s/n; 3030-289 Coimbra; Portugal

e-mail: {mivsimoes, nasimoes, tadeu}@itecons.uc.pt, web: <http://www.itecons.uc.pt>

2: Departamento de Engenharia Civil

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Universidade de Coimbra

Rua Luís Reis Santos - Pólo II; 3030-788 Coimbra; Portugal

**Palavras-chave:** Solução de isolamento pelo exterior, revestimento cerâmico, transferência de calor por condução, Funções de Green, atraso térmico

**Resumo.** *Os sistemas construtivos denominados usualmente na Europa por ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems) e nos Estados Unidos por EIFS (External Insulation and Finishing Systems) consistem num sistema de revestimento de fachadas em que o isolamento térmico é aplicado pelo exterior. Sobre este isolamento pode ser aplicado um reboco delgado reforçado. Usualmente, o revestimento exterior decorativo é a pintura, contudo, nos países mediterrâneos, também tem sido utilizado ladrilhos cerâmicos sobre o isolamento.*

*O presente trabalho tem como objectivo o estudo da transferência de calor em sistemas de isolamento pelo exterior com aplicação de revestimento cerâmico, quando sujeito à transferência de calor em regime dinâmico. A transferência de calor por condução é simulada em diferentes sistemas, usando soluções analíticas desenvolvidas e validadas pelos autores. Foram estabelecidas funções de Green através da imposição de continuidade de temperatura e de fluxo de calor nas interfaces das várias camadas. O problema é resolvido, inicialmente, no domínio da frequência, sendo a resposta no domínio do tempo obtida posteriormente através da aplicação de uma transformada inversa de Fourier.*

*O presente estudo consiste na comparação do atraso térmico – período de tempo entre uma variação de temperatura numa das superfícies do sistema construtivo e a manifestação dessa variação na face oposta - proporcionado por soluções construtivas que incorporem diferentes produtos de isolamento térmico leve. Nas modelações, os sistemas estão sujeitos a variações sinusoidais de temperatura, com o objectivo de simular um período de vários dias.*

*Este trabalho centra-se na comparação do atraso térmico de soluções considerando diferentes tipos de substrato (betão, pedra, tijolo cerâmico, madeira e bloco térmico), diversos tipos de isolamento térmico e espessuras (ICB, XPS, EPS e MW) e variação das características do ladrilho cerâmico, nomeadamente, espessura, cor e propriedades térmicas.*

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem havido uma preocupação mundial em reduzir a emissão com efeitos de estufa. Políticas europeias têm originado directrizes no sentido de os Estados Membros contribuírem para a redução da emissão daqueles gases [1]. Diversos estudos têm evidenciado que o sector dos edifícios é responsável pelo consumo de cerca de 40 % da energia total consumida na União Europeia.

No sector habitacional, segundo dados do INE (Instituto Nacional de Estatística) e da DGEG [2], a climatização das habitações portuguesas constitui mais de 10% do consumo global de energia. Este poderá não ser o gasto energético que mais afecta a factura de consumos numa habitação, contudo tem vindo a ser verificado que a quantidade de energia associada à climatização poderá ser reduzida se forem implementadas medidas que visem o aumento do desempenho térmico da envolvente exterior da habitação e da eficiência dos equipamentos utilizados.

Uma vez que os ocupantes dos edifícios têm aumentado a sua exigência relativamente às condições de conforto térmico e acústico e a regulamentação em vigor obriga a cumprir requisitos mínimos, os projectistas têm vindo a prescrever soluções construtivas que ofereçam maior resistência térmica e beneficiem o desempenho térmico global do edifício.

As paredes de fachada dos edifícios são o elemento heterogéneo de separação entre o ambiente interior e o ambiente exterior, responsáveis pelo cumprimento de um conjunto vasto de exigências funcionais como, por exemplo, a estanquidade, o conforto higrotérmico, o conforto acústico, a adaptação à utilização, a durabilidade e a economia. Adicionalmente, existe a necessidade de encontrar soluções mais eficientes, mais sustentáveis e com um desempenho favorável nas diferentes funções que uma parede desempenha.

Considerando-se todas as exigências funcionais aplicáveis às soluções construtivas, as soluções multicamada são uma opção racional para aplicar nas envolventes dos edifícios, principalmente quando se pretende otimizar termicamente a solução perante condições de temperatura variável ([3], [4]). Sistemas de parede multicamada que são construídos com painéis de materiais com propriedades distintas podem conferir melhores comportamentos térmico e acústico do que uma solução homogénea. Uma das soluções multicamada concebida é uma solução construtiva de fachada denominada usualmente na Europa por ETICS (*External Thermal Insulation Composite Systems*) e nos Estados Unidos por EIFS (*External Insulation and Finishing Systems*). Esta solução consiste na aplicação de isolamento térmico pelo exterior de fachadas. O suporte deste isolamento pode ser do mais variado tipo (betão, parede de alvenaria de tijolos cerâmicos, blocos de cimento, blocos térmicos, madeira, etc.), desde que esse suporte garanta estabilidade e resistência para tal. Sobre o isolamento pode ser aplicado um reboco delgado reforçado. Usualmente, o revestimento exterior decorativo é a pintura. Contudo, nos países mediterrâneos, também tem sido utilizado ladrilhos cerâmicos, como uma variante da solução convencional dos ETICS.

Por norma, e desde que não existam constrangimentos arquitectónicos, esta é uma solução construtiva com grandes vantagens pois facilita a continuidade do isolamento térmico, reduz a influência das pontes térmicas planas e as pontes térmicas lineares e conserva a inércia térmica do edifício. Numa situação de reabilitação, esta solução não reduz as áreas úteis interiores. Contudo, esta solução tem como principais inconvenientes a alteração do aspecto exterior do

edifício, o seu elevado custo (associado à mão de obra especializada e adaptação de pontos singulares), o maior risco de degradação por choque e a necessidade de encontrar soluções para efectuar remates, em particular junto aos vãos. A aplicação de revestimento cerâmico pelo exterior pode auxiliar no aumento de resistência ao choque. Contudo, esta solução de revestimento, ainda não se encontra devidamente estudada nem é abrangida pelo Guia de Aprovação Técnica Europeia, ETAG 004 [5], aplicado a ETICS.

Como a envolvente exterior dos edifícios encontra-se sujeita a um regime de transferência de calor dinâmico, o desempenho térmico destes elementos deve ser avaliado com base na sua resposta ao longo do tempo, utilizando modelos dinâmicos de transferência de calor. Assim, a optimização do desempenho térmico de um sistema construtivo não deverá considerar apenas a resistência térmica mas também outros parâmetros como a massa térmica superficial, o coeficiente de transmissão térmica periódica e o atraso térmico ([6], [7], [8]).

O atraso térmico tem sido alvo de estudo por vários autores. Antonopoulos e Koronakis [9] apresentaram um procedimento simplificado de diferenças finitas para determinar o atraso térmico conferido por soluções construtivas constituídas por paredes de betão que incorporam uma camada de isolamento térmico, de várias espessuras. Antonopoulos e Koronakis [10] também propuseram um procedimento para examinar a influência da massa térmica interior nos valores de atraso térmico. Eles concluíram que a massa térmica interior (conferida pelos elementos de compartimentação e mobiliário) pode aumentar o atraso térmico em 40%.

Alhama *et al.* [11] estudaram a propagação de calor através de paredes exteriores compostas por cinco camadas justapostas, assumindo que a condutibilidade térmica pode variar de acordo com uma função polinomial dependente da temperatura. Os resultados obtidos para uma das soluções estudadas mostram que a camada de isolamento conduz a um grande gradiente de temperatura e a um aumento de atraso térmico.

É também importante analisar o restabelecimento do equilíbrio de energia. Athanassouli ([12], [13]) apresentou um conjunto de estudos em regime transiente sobre restabelecimento de energia térmica em elementos sujeitos a aquecimento. Mais recentemente, Athanassouli e Massouros [14] utilizaram equações analíticas para estudar o regime transiente da transferência de calor em paredes após a interrupção da radiação solar. Essa simulação foi complementada com uma validação experimental, a qual se centrou na avaliação da influência das propriedades térmicas da parede ao longo do tempo de análise.

Os autores deste trabalho desenvolveram e validaram experimentalmente soluções analíticas que permitem simular a transferência de calor por condução através de sistemas multicamada, explorando um regime de temperatura transiente [15]. Estes modelos de simulação são utilizados neste trabalho para determinar o atraso térmico de várias soluções construtivas do tipo ETICS. São avaliadas soluções considerando diferentes tipos de substrato (betão, pedra, tijolo cerâmico, tijolo térmico e madeira), diversos tipos de isolamento térmico e espessuras (aglomerado de cortiça expandida, poliestireno extrudido, poliestireno expandido e lã de rocha) e variação das características do ladrilho cerâmico, nomeadamente espessura, cor e propriedades térmicas.

## 2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O atraso térmico é calculado assumindo que a superfície exterior do sistema é sujeita a uma variação de temperatura sinusoidal e que são registadas as temperaturas na superfície oposta (superfície interior ou receptora). Neste estudo, o atraso térmico corresponde ao intervalo de tempo entre o instante em que a variação de temperatura imposta na superfície exterior atinge o seu máximo e o instante em que o correspondente máximo é verificado na superfície interior (ver Figura 1).

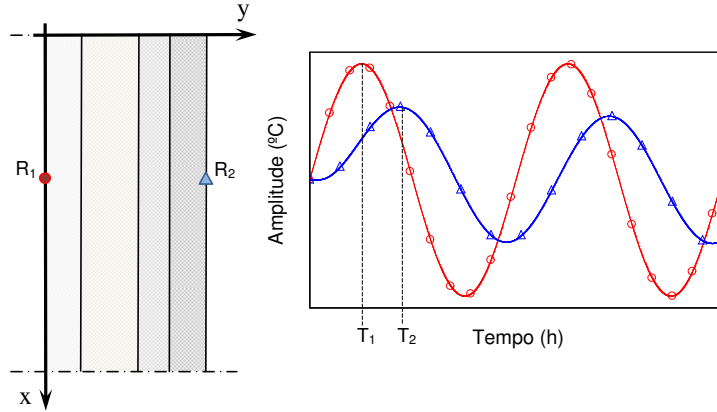


Figura 1. Esquema ilustrativo utilizado para avaliar o atraso térmico ( $T_2 - T_1$ ).

Assim, para efeitos de formulação numérica, considere-se um sistema constituído por um conjunto de  $m$  camadas planas de extensão infinita confinadas superior e inferiormente por meios semi-infinitos (Meio 0 e Meio  $m+1$ , respectivamente), como ilustrado na Figura 2. Assume-se que as camadas são infinitas nas direcções  $x$  e  $z$ . As propriedades térmicas dos meios e a espessura de cada camada podem diferir entre elas. Este sistema é sujeito a uma fonte de calor pontual localizada algures no domínio do sistema.

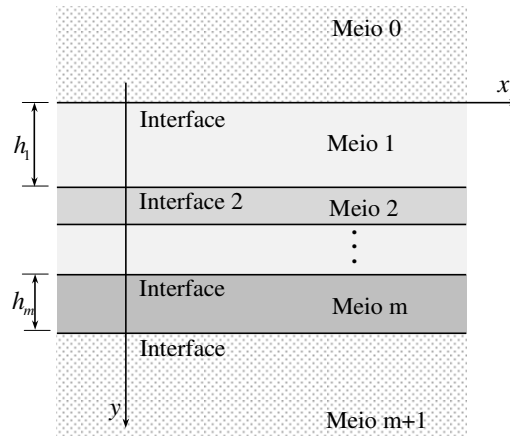


Figura 2. Esquema da geometria do problema: sistema multicamada confinado por dois meios semi-infinitos (Meio 0 e Meio  $m+1$ ).

A transferência de calor por condução em regime transiente em cada camada é expressa pela equação (1).

$$\lambda_j \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T(x, y, z, \tau) = \rho_j c_j \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} \quad (1)$$

onde  $\tau$  é o tempo,  $T(x, y, z, \tau)$  a temperatura no ponto  $(x, y, z)$ ,  $j$  identifica a camada,  $\lambda$  o coeficiente de condutibilidade térmica,  $\rho$  a massa volúmica e  $c$  o calor específico.

A solução do atraso térmico é definida por imposição de uma variação específica,  $t_{0t}$ , na superfície exterior. A temperatura  $t_{0t}$  é obtida por aplicação de uma transformada de *Fourier* no domínio do tempo à variação de temperatura imposta na superfície exterior.

O campo de calor total é determinado por imposição de continuidade de temperaturas e de fluxos de calor normais nas interfaces intermédias. Após algumas manipulações matemáticas, obtém-se o seguinte sistema de  $(2m+1) \times (2m+1)$  equações lineares (equação (2)).

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{k_1 V_{n1}} & \frac{e^{-iV_{n1}h_1}}{k_1 V_{n1}} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ e^{-iV_{n1}h_1} & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \frac{e^{-iV_{n1}h_1}}{k_1 V_{n1}} & \frac{1}{k_1 V_{n1}} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -1 & e^{-iV_{nm}h_m} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -\frac{1}{k_1 V_{nm}} & \frac{e^{iV_{nm}h_m}}{k_m V_{nm}} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & e^{-iV_{nm}h_{m+1}} & -1 & -1 \\ 0 & 0 & \dots & \frac{e^{-iV_{nm}h_m}}{k_m V_{nm}} & \frac{1}{k_m V_{nm}} & \frac{1}{k_{m+1} V_{n(m+1)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{n1}^t \\ A_{n1}^b \\ \dots \\ A_{nm}^t \\ A_{nm}^b \\ A_{n(m+1)}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{0t} \\ \frac{e^{-iV_{n1}y_0}}{k_1 V_{n1}} \\ -e^{-iV_{n1}|h_1-y_0|} \\ \frac{e^{-iV_{n1}|h_1-y_0|}}{k_1 V_{n1}} \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Considerando-se que a temperatura imposta em cada instante é constante ao longo da superfície externa,  $k_{xn} = 0$ .

A solução do sistema da equação (2) para  $k_{xn} = 0$  ( $n=0$ ) permite determinar a amplitude dos termos de superfície associados a cada interface do sistema multicamada. A temperatura na superfície exterior, na interface  $m+1$ , é então definida por:

$$\tilde{T}(\omega, x, y) = E_{0(m+1)} \left( \frac{1}{V_{0(m+1)}} A_{0(m+1)}^t \right) \quad (3)$$

A formulação analítica dos modelos de cálculo utilizados neste trabalho e respectiva validação experimental podem ser consultadas em [15] e [16].

As respostas de calor no domínio do tempo são obtidas por aplicação de uma transformada inversa de *Fourier*, do tipo *Fast Fourier Transform*. Com o objectivo de prevenir o fenómeno de *aliasing*, são utilizadas frequências complexas com uma pequena parte imaginária na forma  $\omega_c = \omega - i\eta$  (com  $\eta = 0.7\Delta\omega$ , sendo  $\Delta\omega$  o incremento de frequência). A constante  $\eta$  não pode ser arbitrariamente grande, uma vez que provocaria uma perda de precisão numérica. Note-se que a temperatura imposta  $T_0(t)$  pode ter uma variação qualquer.

### 3. CASOS DE ESTUDO

Os 5 sistemas construtivos estudados, e ilustrados na Figura 3, são compostos por um revestimento cerâmico, argamassa de colagem, isolamento térmico, argamassa de colagem, suporte e estuque. Neste estudo foram considerados revestimentos cerâmicos com diferentes propriedades térmicas e duas espessuras (6 mm e 12 mm). Foram avaliados diversos produtos de isolamento térmico – aglomerado de cortiça expandida (ICB), poliestireno expandido (EPS), poliestireno extrudido (XPS) e lã de rocha (MW), aplicados na superfície exterior dos 5 suportes diferentes, nomeadamente pedra granítica, betão armado, madeira (lamelada colada), tijolo cerâmico furado e bloco térmico. Em todas as situações fizeram-se variar o tipo e espessura do isolamento térmico dos 30 mm aos 100 mm de espessura.

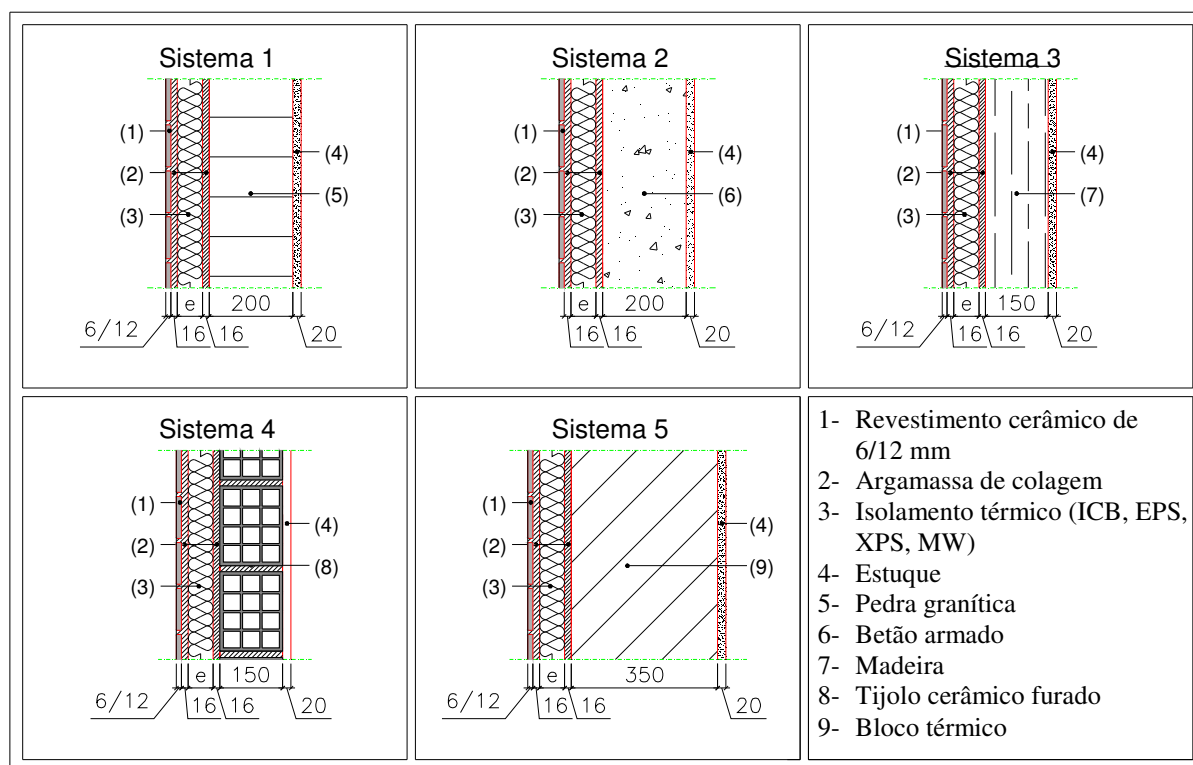


Figura 3. Esquemas ilustrativos Soluções construtivas em estudo: composição de cada solução e respectivas características dimensionais.

Na Tabela 1 apresentam-se as propriedades térmicas de cada um dos materiais, utilizadas nas simulações analíticas. O coeficiente de difusividade de cada material é dado pela razão entre o seu coeficiente de condutibilidade térmica e o produto entre a respectiva massa volúmica e calor específico.

<b>Material</b>	<b>Coeficiente de condutibilidade térmica, <math>\lambda</math> (W.m<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>)</b>	<b>Massa volúmica, <math>\rho</math> (kg.m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Calor específico, <math>c</math> (J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>)</b>	<b>Coeficiente de difusividade térmica, <math>K</math> (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>
Aglomerado de cortiça expandida (ICB)	0.038	1560	140	1.74E-07
Poliestireno expandido (EPS)	0.041	1430	14.3	2.00E-06
Poliestireno extrudido (XPS)	0.035	1400	35	7.14E-07
Lã de rocha (MW)	0.040	837	70	6.83E-07
Cerâmica do tipo 1	0.969	740	2195	5.97E-07
Cerâmica do tipo 2	1.200	750	2387	6.70E-07
Argamassa de colagem	0.610	1000	1400	4.36E-07
Pedra granítica	3.000	840	2600	1.37E-06
Betão armado	1.400	880	2300	6.92E-07
Painéis de madeira	0.130	2300	500	1.13E-07
Tijolo cerâmico furado (considerando juntas de 15 mm)	0.379*	975	670	5.80E-07
Bloco térmico (considerando juntas de 15 mm)	0.183*	1000	1055	1.73E-07
Estuque	0.700	840	1200	6.94E-07
Ar	0.026*	1000	1.2928	2.01E-05
* valor equivalente do coeficiente de condutibilidade térmica ( $\lambda_{equival.}$ ) obtido a partir do valor da resistência térmica e espessura.				

Tabela 1. Propriedades térmicas dos materiais utilizados no cálculo de atraso térmico.

Em todas as simulações impôs-se uma variação de temperatura na superfície exterior das paredes (superfície à esquerda de cada sistema construtivo ilustrado na Figura 3), durante um período de 8 dias. De modo a permitir identificar diferenças no comportamento entre sistemas iguais mas com revestimento cerâmico de cores diferentes, foram assumidas diferentes amplitudes na variação de temperatura na superfície exterior da parede, como se ilustra na Figura 4. A temperatura inicial assumida, em todos os sistemas, foi de 20 °C, como uma oscilação em cada período de 24 h de 15 °C, 16 °C e 26 °C, respectivamente para revestimento cerâmico de cor clara, cor média e cor escura. O meio em contacto com a superfície receptora é o ar.

Como referido previamente, os cálculos foram inicialmente efectuados no domínio da frequência, para um intervalo de frequências desde 0.0 Hz até 0.02370 Hz, com um incremento de frequência de  $7.2338 \times 10^{-7}$  Hz, o que determina um período de análise de 192 h. A resposta no domínio do tempo é obtida conforme descrito no ponto 2.

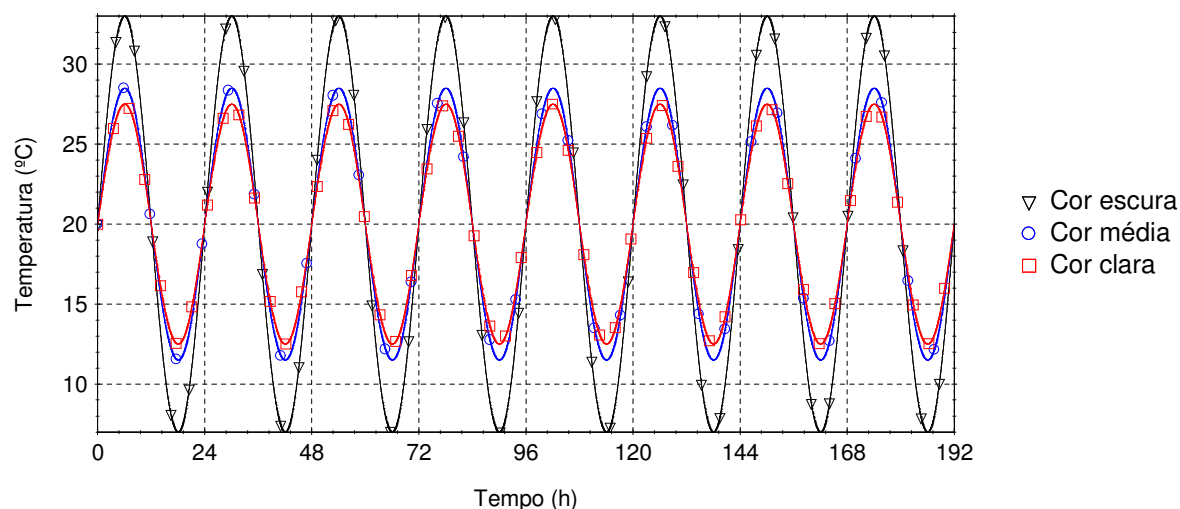


Figura 4. Evolução temporal da temperatura imposta na superfície exposta do sistema em função da cor do revestimento cerâmico.

### 3.1. Resultados

Por forma a ilustrar os resultados apresenta-se na Figura 5 a evolução de temperaturas, nos últimos 4 dias de simulação, na superfície receptora para o Sistema 1 com revestimento cerâmico do tipo 1 com 6 mm de espessura para cor clara, quando o isolamento térmico é do tipo EPS e possui 60 mm de espessura, e a evolução de temperaturas na superfície exterior. Esta imagem permite verificar o decrescimento das amplitudes térmicas entre o exterior e o interior. Como mencionado acima, o atraso térmico é dado pela diferença entre o valor  $T_2$  e  $T_1$ .

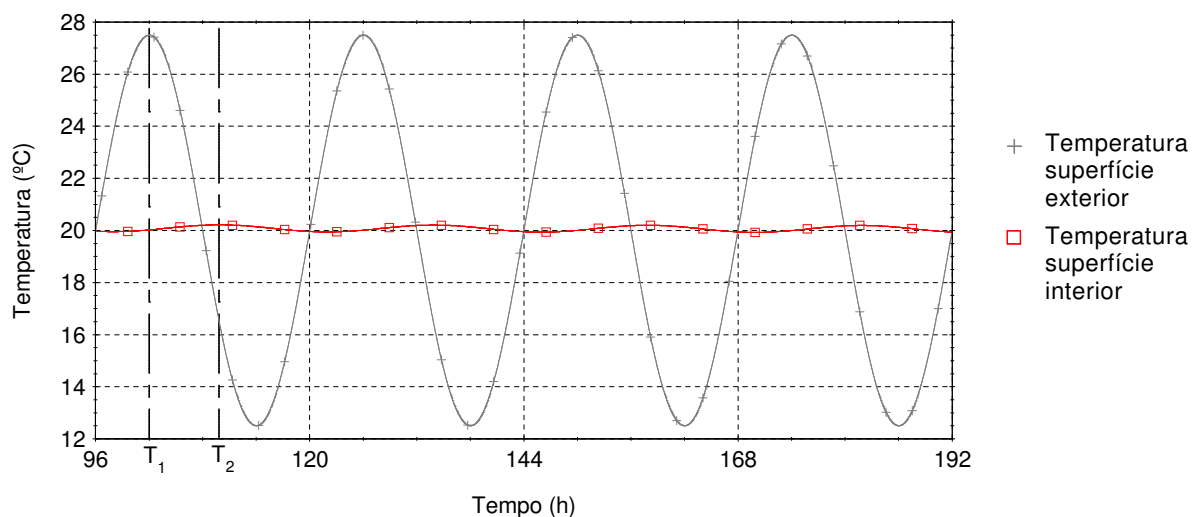


Figura 5. Evolução temporal da temperatura na superfície exposta e na superfície receptora do Sistema 1 para revestimento cerâmico 1 com 6 mm de espessura e cor clara, incorporando EPS de 60 mm.



Na Figura 6 apresenta-se apenas a evolução de temperaturas na superfície interior da parede descrita acima, mas considerando revestimentos cerâmicos com diferentes graus de absorção de radiação solar (diferentes cores). Como expectável, observa-se que o máximo da variação da temperatura superficial interior das paredes ocorre no mesmo instante. Por este motivo, a cor do revestimento cerâmico não influencia o valor do atraso térmico. Contudo, a cor conduz a valores de temperatura distintos na superfície interior da parede: revestimento de cor mais escuro origina maiores amplitudes de temperatura, isto é, é a solução que apresenta maiores valores de temperatura máxima e menores valores de temperatura mínima.

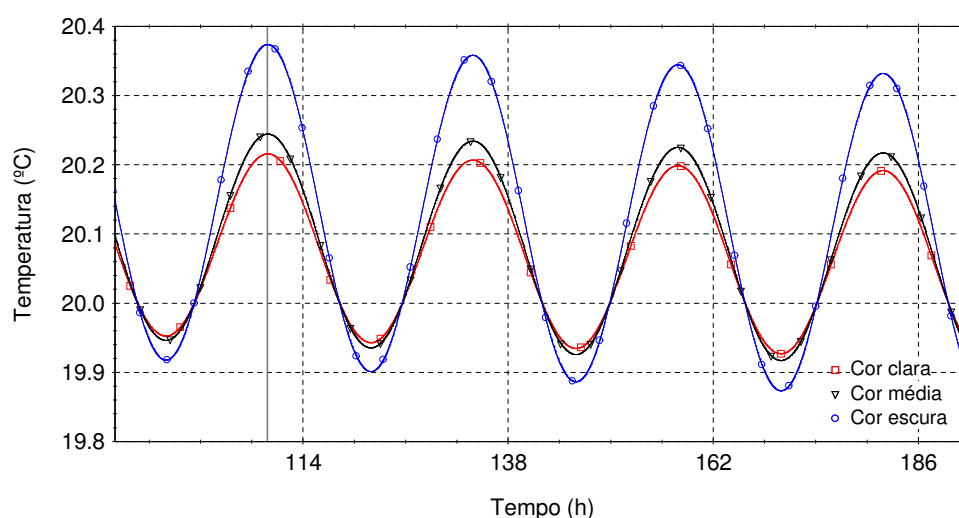


Figura 6. Evolução temporal da temperatura na superfície receptora do Sistema 1, para revestimento cerâmico 1 com 6 mm de espessura e incorporando EPS de 60 mm. Análise comparativa para revestimento de cerâmico com cores distintas.

De modo a compreender a diferença entre o comportamento dos sistemas com diferentes isolamentos térmicos, apresenta-se na Figura 7 a evolução de temperaturas na superfície receptora (superfície interior) no Sistema 2, com cerâmico do tipo 1 com 6 mm de espessura e incorporando 60 mm de isolamento térmico. Na ampliação do período de tempo no qual são alcançadas as temperaturas máximas interiores no 5º dia de simulação (Figura 7b)), apresenta-se a marcação do instante em que ocorre a temperatura máxima para cada isolamento térmico. Note-se que quanto mais tardio se verificar este instante, maior o atraso térmico. Por este motivo, conclui-se que, neste sistema, o ICB é o isolamento que confere maior atraso térmico à solução, enquanto o isolamento que confere menor atraso térmico é o EPS. O XPS e a MW apresentam atrasos térmicos muito semelhantes. Relativamente ao amortecimento de temperatura entre o exterior e o interior, neste sistema, o XPS é o isolamento térmico que apresenta menor valor de temperatura interior, seguido do ICB, MW e EPS.

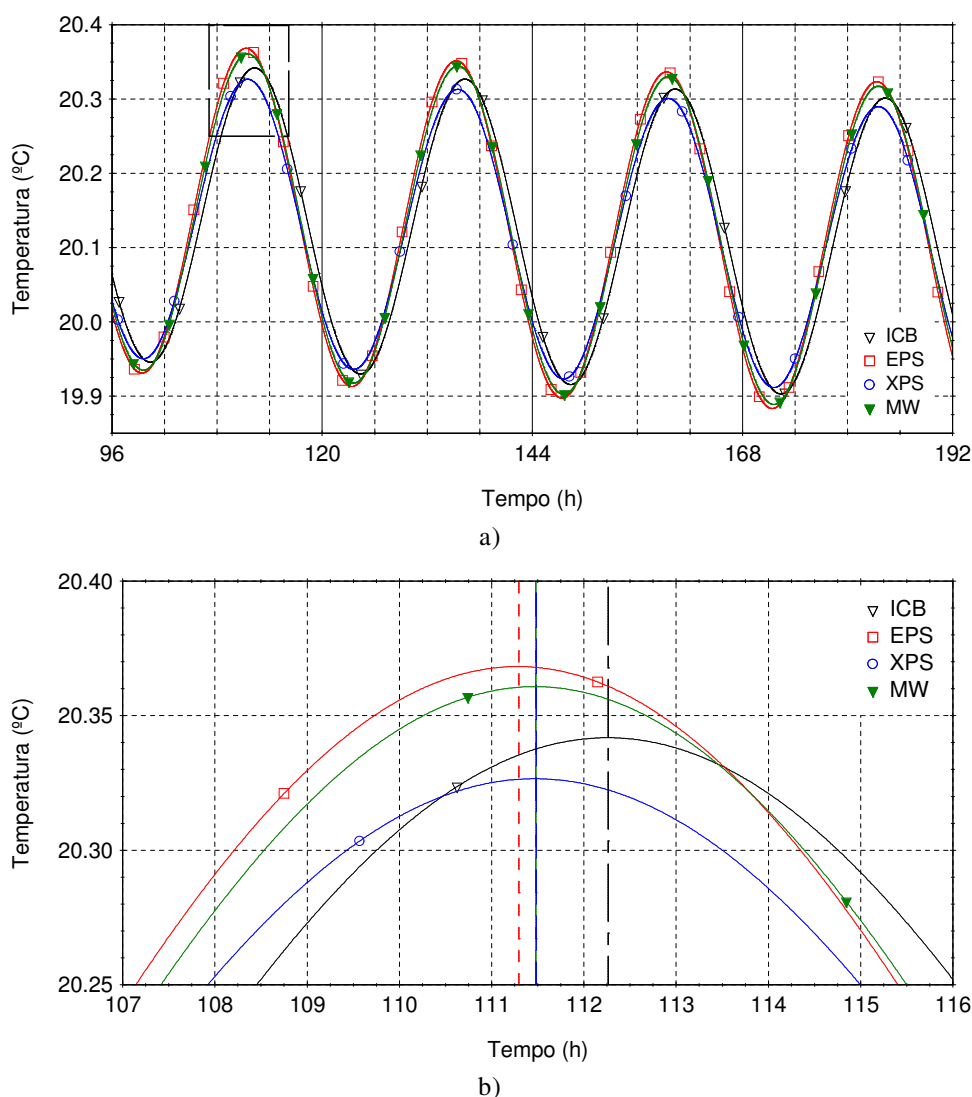


Figura 7. Evolução temporal da temperatura na superfície receptora do Sistema 2, para revestimento cerâmico do tipo 1 com 6 mm de espessura de cor escura e incorporando isolamento térmico de 60 mm: a) últimos 4 dias de simulação; b) ampliação do gráfico no período de temperaturas máximas atingidas no 5º dia de simulação.

A Figura 8 é composta por gráficos que representam a evolução do atraso térmico e o coeficiente de transmissão térmica,  $U$ , com o aumento de espessura de isolamento térmico, determinados para todos os sistemas em análise, considerando revestimento cerâmico do tipo 1 de cor clara e com 6 mm de espessura. O coeficiente de condutibilidade térmico apresentado foi determinado de acordo com a metodologia de cálculo especificada na ISO 6946 e é ilustrado pelas linhas interrompidas. Da análise dos gráficos constata-se que, como esperado, que o aumento da espessura do isolamento térmico conduz ao aumento do atraso térmico e à redução do coeficiente de condutibilidade térmica. Nos 5 suportes, o ICB

é o isolamento que conduz a maiores atrasos térmicos, comparativamente aos restantes isolamentos analisados. O XPS e a MW são isolamentos que conferem valores de atraso térmico semelhantes nos 5 Sistemas estudados, pelo que as curvas correspondentes a estes isolamentos encontram-se sobrepostas ou muito próximas. O isolamento que apresenta valores de atraso térmicos mais baixos é o EPS.

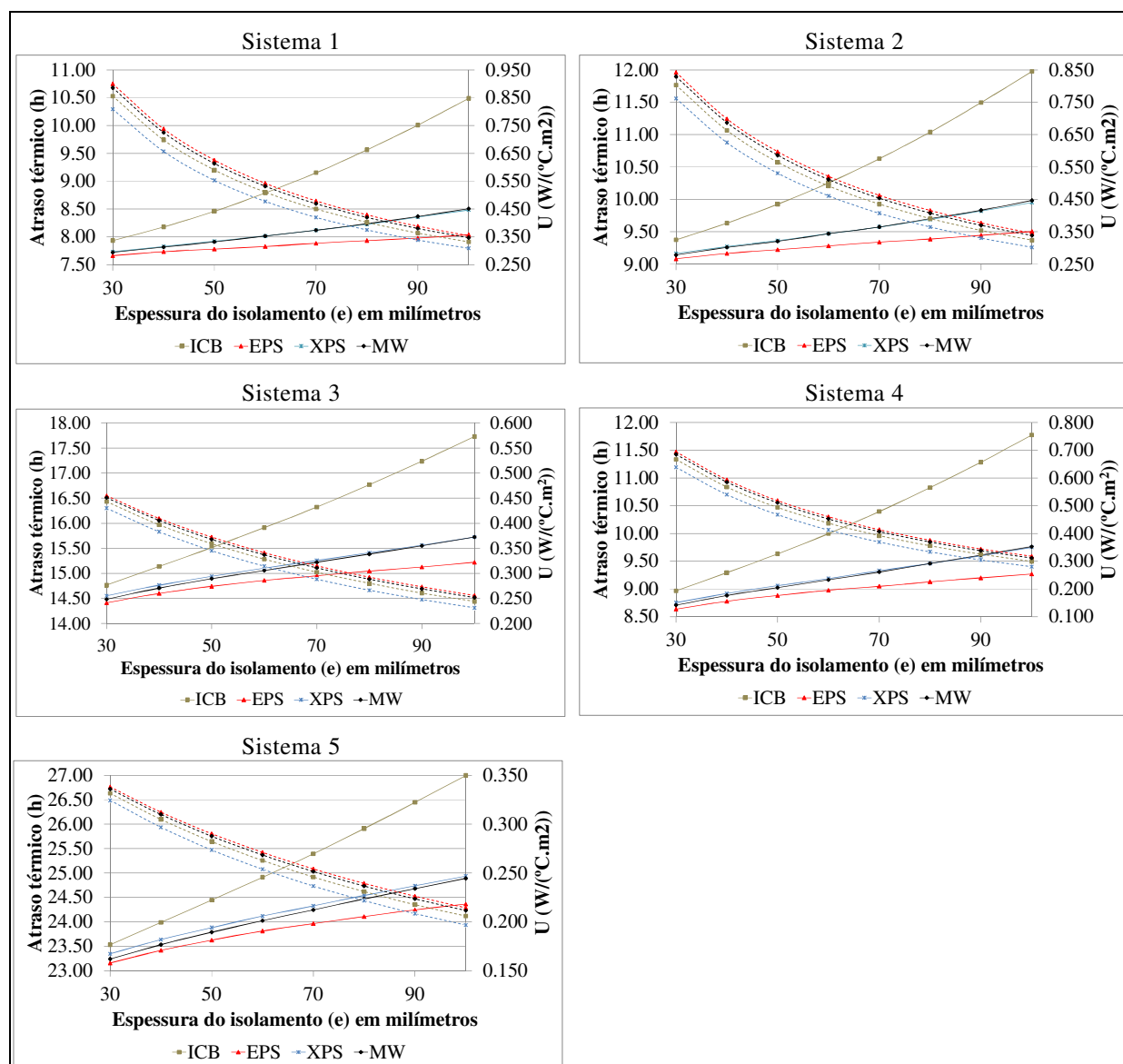


Figura 8. Evolução do atraso térmico (linha contínua) e coeficiente de transmissão térmica (linha interrompida) dos sistemas estudados considerando revestimento cerâmico do tipo 1 com 6 mm de espessura, considerando os diferentes tipos de isolamento térmico em análise com espessuras desde os 30 mm a 100 mm.

Quando é analisado o coeficiente de transmissão térmica, o isolamento que oferecer maior resistência térmica é o XPS, seguido do ICB, MW e EPS. Note-se que o cálculo do atraso

térmico considera o coeficiente de condutibilidade térmica e espessura dos materiais, mas depende também da massa volúmica e calor específico dos mesmos, enquanto o coeficiente de transmissão térmica só considera o coeficiente de condutibilidade térmica e espessura. Note-se que, para menores espessuras de isolamento a diferença entre o valor do atraso térmico conferido pelos diferentes isolamentos é muito reduzido (inferior a meia hora). Contudo, para uma espessura de 100 mm de isolamento, a diferença de atraso térmico é de aproximadamente 2:30 h (comparando EPS a ICB).

Analisando as soluções construtivas que incorporam 100 mm de ICB, constata-se que a solução que apresenta o maior valor de atraso térmico é o Sistema 5 (bloco térmico), seguido dos Sistemas 3 (painel de madeira), 2 (betão armado), 4 (tijolo cerâmico) e 1 (pedra granítica). Uma vez que o Sistema 2 apresenta um atraso térmico ligeiramente superior ao Sistema 4, apesar deste último oferecer maior resistência térmica, conclui-se que o atraso térmico não depende apenas das propriedades térmicas dos materiais constituintes da solução, mas também da composição do próprio sistema.

Quando se analisam as diferenças relativamente ao atraso térmico e coeficiente de transmissão térmica, devido à alteração das propriedades térmicas do revestimento cerâmico, nestas soluções construtivas multicamada, conclui-se que a influência é muito pequena: no caso do atraso térmico existe uma variação inferior a 0.16 % e no caso do coeficiente de condutibilidade térmica inferior a 0.011 %.

Relativamente à espessura do revestimento cerâmico, o aumento da espessura de 6 mm para 12 mm conduz a uma variação do coeficiente de transmissão térmica de 0.053%, não existindo repercussões no valor de atraso térmico da solução construtiva.

Comparando uma solução de ETICS convencional (sem revestimento cerâmico) e a solução com revestimento cerâmico do tipo 1 com 6 mm de espessura, a variação de atraso térmico é inferior a 0.56 %, sendo que o primeiro apresenta atrasos térmicos inferiores à segunda solução.

## **12. CONCLUSÕES**

No presente artigo foi realizada uma análise de transferência de calor através de sistemas construtivos aplicados em envolventes verticais exteriores caracterizados pela aplicação de isolamento térmico pelo exterior (ETICS) cujo revestimento exterior é constituído por revestimento cerâmico. Esta análise considerou a determinação do atraso térmico de diferentes soluções construtivas. O atraso térmico foi determinado para diferentes paredes que incorporam isolamento térmico do tipo aglomerado de cortiça expandida, lã de rocha e poliestireno extrudido e poliestireno expandido. Os sistemas construtivos possuíam o mesmo número de camadas, mas diferentes materiais de suporte: pedra granítica, betão armado, madeira, tijolo cerâmico furado e bloco térmico. Foi ainda avaliada a influência no atraso térmico da espessura do revestimento cerâmico, as suas propriedades térmicas e cor. A espessura do isolamento térmico no sistema foi uma das variáveis considerada ao longo deste estudo.

O atraso térmico foi assumido como o intervalo de tempo entre uma variação térmica num meio e a sua manifestação na superfície oposta da solução construtiva, quando submetida a um regime periódico de transmissão de calor. A transferência de calor através dos sistemas

estudados foi efectuada com base em soluções analíticas, no domínio da frequência. Este modelo numérico foi previamente validado (experimentalmente) pelos autores.

Os resultados obtidos permitiram concluir, como expectável, que o atraso térmico aumenta com o aumento de espessura de isolamento térmico. Observou-se que os isolamentos com menores valores de coeficientes de condutibilidade térmica, não conduzem obrigatoriamente a maiores atrasos térmicos. A diferença de atraso térmico oferecido pelos diferentes isolamentos é maior para espessuras superiores. Nos casos estudados esta diferença foi de aproximadamente de 2 h 30 min, para 100 mm de isolamento.

A cor do revestimento cerâmico não contribui para o atraso térmico da solução, contudo influencia as temperaturas máximas atingidas na superfície interior da parede: cores mais escuras apresentam maiores amplitudes térmicas na superfície interior. As propriedades térmicas do revestimento e espessura têm uma contribuição no atraso térmico da solução inferior a 1 %.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho insere-se no projecto de acrónimo ISOL TILE SYSTEM, com a ref<sup>a</sup> FCOMP-01-0202-FEDER-38676 que visa desenvolver um sistema que possibilite a colagem de elementos cerâmicos sobre isolamento térmico aplicado pelo exterior. Este projeto insere-se no Sistema de Incentivos à Investigação e Desenvolvimento Tecnológico, financiado pelo COMPETE no âmbito do QREN.

Este trabalho é ainda enquadrado na Iniciativa Energia para a Sustentabilidade da Universidade de Coimbra e apoiado pelo projeto Energy and Mobility for Sustainable Regions - EMSURE (CENTRO-07-0224-FEDER-002004).

## REFERÊNCIAS

- [1] European Community, “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings,” Off. J. Eur. Union, pp. 13–35, 2010.
- [2] Guia da eficiência energética, Lisboa: ADENE - Agência para a energia, 2012.
- [3] K.A. Antonopoulos e S.P. Valsamakis, “Effects of indoor and outdoor heat transfer coefficients and solar absorptance on heat-flow through walls”. *Energy* Vol. 18(3), pp. 259-271, (1993).
- [4] K.A. Antonopoulos, F. Democritou, “Correlations for the maximum transient nonperiodic indoor heat-flow through 15 typical walls”. *Energy*, Vol. 18(7), pp. 705-715, (1993).
- [5] ETAG 004 - Guideline for European Technical Approval of External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering, Bruxelas: EOTA, 2011.
- [6] N. Aste, A. Angelotti, M. Buzzetti M, “The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings”. *Energy and Buildings*, Vol. **41**, pp. 1181-1187, (2009).
- [7] J. Pfafferott, S. Herkel, J. Wapler, “Thermal building behavior in summer: long term data evaluation using simplified models”. *Energy and Buildings*, Vol. **37**, pp. 844 852, (2005).

- [8] ISO/FDIS 13786:2006 - Thermal performance of building components — Dynamic thermal characteristics — Calculation methods
- [9] K.A. Antonopoulos, E.P. Koronaki. “Effect of indoor on the time constant and thermal delay of buildings”. *International Journal of Energy Research*, Vol. **24**, pp. 391-402, (2000).
- [10] K.A. Antonopoulos, E.P. Koronaki, “Thermal parameter components of building envelope”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. **20**, pp. 1193-1211, (2000).
- [11] F. Alhama, J.F. López-Sánchez, C.F. González-Fernández, “Heat Conduction through a multilayered wall with variable boundary conditions”. *Energy*, Vol. **22(8)**, pp. 797-803, (1997).
- [12] G. Athanassouli, “Thermal restoration of a wall after the interruption of solar radiation flux”. *International Journal of Energy Research*, Vol. **13**, pp. 443-454, (1989).
- [13] G. Athanassouli, “Evaluation of the ability of an opaque wall to store and exploit solar radiation.” *International Journal of Energy Research*, Vol. **13**, pp. 717-725.
- [14] G. Athanassouli, P. Massouros. “A model of the thermal restoration transient state of an opaque wall after the interruption of solar radiation”, *Solar Energy*, Vol. **66(1)**, pp. 21-31, (1999).
- [15] I. Simões, N. Simões, A. Tadeu, “Thermal delay simulation in multilayer systems using analytical solutions”. *Energy and Buildings*, Vol. 49, pp. 631–639, (2012).
- [16] M.I.V. Simões, “Desenvolvimento de modelos numéricos e aplicação da termografia na deteção e caracterização de defeitos em elementos de construção”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra (2013)