

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Medição e modelação de uma bateria térmica localizada num pavimento aquecido

Tomás Alexandre Gonçalves Simões

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:
Prof. Marta Oliveira Panão

Agradecimentos

Agradecer primeiramente à Professora Marta Panão pela sua total disponibilidade na orientação desta dissertação, e ainda pela flexibilidade e compreensão face aos constrangimentos existentes no desenvolvimento da mesma. Ao Sr. Dmitri Boutov por todo o auxílio prestado no sentido de se reunirem condições à realização da componente laboratorial.

Para a realização deste trabalho foi necessário a construção de um modelo, o qual não apresentaria tal primor sem a imprescindível ajuda do meu pai.

A todos os meus companheiros e amigos que fizeram desta uma bela caminhada, e em determinados momentos não tão penosa.

A toda a minha família que sempre me acompanhou bem de perto, e em particular ao meu avô pelo apoio e o bichinho que demonstrava pelas energias renováveis.

Um agradecimento especial aos meus pais por toda a educação transmitida e pelo suporte dado sobre diversas formas, que permitiram fazer desta uma jornada bem-sucedida.

Resumo

Uma das bandeiras apresentadas pela União Europeia é a preocupação com o meio ambiente, direcionando esforços para uma Europa mais verde e sustentável. Nesse sentido o tema da energia é inevitável, pela maior aposta nas energias renováveis, e na eficiência energética. Os edifícios são naturalmente uma parte significativa do consumo de energia, pelo que novos objetivos têm sido estabelecidos. As novas diretivas preveem que edifícios construídos após 2020 devam ser classificados como *nearly Zero Energy Buildings* (nZEB).

Com este trabalho pretende-se estudar se é possível aumentar a penetração das energias renováveis através da gestão inteligente de energia dedica a um sistema de climatização de edifícios. Neste caso é estudada a possibilidade de utilizar a inércia térmica de um pavimento de elevada massa, para reter calor nos momentos em que existe excedente de energia, ou em que esta é mais barata, evitando o consumo quando o seu valor é mais elevado. Como base para o estudo foi utilizada uma pequena instalação composta por um pavimento de resistência embutida, com uma área de $0,44 \text{ m}^2$ e espessura de 6 cm, ao qual foi acrescentada ainda uma envolvente no sentido de criar uma “divisão”.

A primeira abordagem ao problema consiste na realização de uma série de testes experimentais, em que é aplicado aquecimento na instalação, através da resistência do pavimento, ou outro sistema que permita o aquecimento direto do espaço interior. O registo de valores de temperatura obtidos em vários pontos, para consideráveis intervalos de tempo, durante e após o período de aquecimento, permitem assim avaliar o desempenho da instalação.

Uma das metas principais deste trabalho é aplicação do modelo resistência-capacitância (RC), ao fluxo de calor em edifícios. Concretamente é utilizado um modelo 2R2C aplicado em código MatLab, que considera a existência de duas resistências e duas capacitâncias. O modelo com base em dados obtidos experimentalmente realiza as simulações e determina o valor de cada uma das resistências e capacitâncias. Sendo atribuído especial ênfase à resistência R_1 , que reflete as perdas de calor para o exterior, e ao principal objetivo da dissertação a capacitância C_2 , que quantifica a capacidade do pavimento em reter calor.

Palavras-Chave: Inércia Térmica, Armazenamento de calor em Edifícios, Retenção de Calor em Pavimentos, Modelos RC.

Abstract

One main goal of the European Union is the protection of the environment aiming efforts to a cleaner and sustainable Europe. In this path, the theme of energy is inevitable through raising work in renewable energies and energy efficiency. The buildings are a big part of consumption so new objectives have been established. The new instructions are that buildings after 2020, should be classified as nearly Zero Energy Buildings (nZEB).

This study pretends to increase the penetration of renewable energies with help of intelligent management of energy applied in the climatization of buildings. In this case, is studied the use of thermal inertia from a high mass floor to retain some heat when exists an excess of energy or it is cheaper. As a base to the study is used a small installation composed of two main components, one of them is a floor with internal resistance, an area of 0.44 m² and a 6 cm height, and the other is a cubic cover in way of forming a “room”.

The first approach to the problem is to realize series of experimental tests applying heating in installation through the floor’s internal resistance or another system capable of heat directly the interior environment. The values of temperature are registered in different locations, during and before de heating cycle which allows evaluate the installation’s performance.

One of the main tasks of this study is applying the resistance-capacitance model (RC) to the heat flow in buildings. Specifically, the model used to contemplate the existence of two resistances and two capacitances so is designated as the 2R2C model, which is applied in MatLab code and realizes the simulations based on the previous experimental data. This work gives a special focus to the resistance R1 that designates the losses of heat to the exterior, and the capacitance C2 that quantifies the capacity of the floor in retain heat.

Keywords: Thermal Inertia, Heat Storage in Buildings, Heat Retention in High Mass Floors, RC Models.

Índice

Agradecimentos.....	I
Resumo.....	II
Abstract	III
Índice.....	IV
Índice de Figuras	VI
Índice de Tabelas.....	VII
Acrónimos	VIII
Simbologia e Notações.....	VIII
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura da Dissertação	3
2. Estado de Arte	4
2.1. Consumo elétrico e a sua flexibilidade.....	4
2.2. Inércia térmica em edifícios	5
2.2.1. Introdução ao conceito de inércia térmica.....	5
2.2.2. Descrição qualitativa da inércia térmica.....	6
2.2.3. Modelação da inércia térmica.....	7
2.2.4. Efeito da inércia térmica nos edifícios	8
2.3. Baterias térmicas	10
3. Caso de Estudo	12
3.1. Descrição da instalação experimental	12
3.1.1. Pavimento.....	12
3.1.2. Envolvente.....	13
3.2. Condições experimentais.....	14
4. Método experimental.....	15
4.1. Condições experimentais.....	15
4.2. Testes Preliminares.....	16
4.3. Avaliação de desempenho da envolvente.....	17
4.4. Diminuição do consumo pelo sistema de aquecimento auxiliar.....	19
4.4.1. Consumo sem pré-aquecimento do pavimento.....	19
4.4.2. Consumo com pré-aquecimento do pavimento	20
4.5. Capacidade de retenção de calor por parte do pavimento	21
5. Método numérico	23

5.1.	Introdução ao modelo 2R2C.....	23
5.1.1.	Equações do modelo.....	24
5.1.2.	Aplicação do modelo.....	25
5.1.3.	Simulações realizadas.....	26
5.2.	Simulação livre do modelo.....	27
5.3.	Simulação com condicionamento de variáveis.....	28
5.3.1.	Definição do intervalo de valores da resistência R_2	28
5.3.1.1.	Resultados da definição do valor R_2	30
5.3.2.	Aproximação ao valor de C_1	30
5.3.3.	Resultados	31
5.4.	Perdas de calor.....	33
6.	Conclusão	35
7.	Referências Bibliográficas	37

Índice de Figuras

Figura 2.1: No primeiro de cima, está a sombreado a penalização aplicada a cada momento, a linha contínua vermelha representa a intensidade do aquecimento com controlo convencional, o tracejado verde representa o aquecimento com controlo inteligente. O gráfico de baixo à esquerda representa as temperaturas registadas, sendo o tracejado preto os limites de conforto superior e inferior a cada momento do dia. O gráfico de baixo à direita demonstra a penalização acumulada para os dois tipos de controlo. (Junker et al., 2018).....	5
Figura 2.2: Representação esquemática do time lag, ϕ , e do decrement factor $f=A_{in}/A_{out}$, e perfis de temperatura. (Ulgen, 2002)	7
Figura 2.3: Esquema da localização de termopares e tubagens no pavimento com 1.22 m de espessura. (Tahersima et al., 2018).....	11
Figura 2.4: Registo diário de temperaturas a várias alturas do pavimento. Foi aplicado aquecimento contínuo entre os dias 5 a 15 de fevereiro (250 a 490 horas). (Tahersima et al., 2018).....	11
Figura 3.1: Superfície do pavimento utilizado com uma dimensão de 68 x 65 cm.....	13
Figura 3.2: As várias camadas do pavimento com diferentes espessuras. Ao topo tijolo de burro (6 cm), ao centro poliestireno extrudido (3 cm), e na base um tampo de madeira (3 cm).....	13
Figura 3.3: Vista exterior da envolvente com tampa colocada.....	13
Figura 3.4: Interior da envolvente, com utilização de fita adesiva nas junções de placas, e presença de lâmpadas.....	13
Figura 3.5: Esquema da localização dos termopares, e condições utilizadas em cada estudo. Na primeira instalação foi utilizada uma placa de isolamento na base e lâmpada; A segunda instalação utiliza apenas o pavimento maciço para estudar a sua autonomia; A última instalação utiliza o pavimento, e a lâmpada como sistema auxiliar de aquecimento.....	14
Figura 4.1: Perfil de temperaturas, em diferentes locais da instalação experimental aplicando aquecimento no pavimento durante 45 minutos com uma potência de 89,7 W.	16
Figura 4.2: Perfil de temperaturas em diferentes locais da instalação experimental, aplicando aquecimento através de lâmpadas com uma potência de 87 W durante 45 minutos.	17
Figura 4.3: Gráfico da potência de aquecimento em função da diferença de temperatura em regime permanente; O declive da regressão linear dos pontos corresponde ao coeficiente de transmissão térmica da instalação.	18
Figura 4.4: Imposição e manutenção de uma temperatura de conforto durante um período de 6 horas, com o recurso exclusivo ao sistema auxiliar de aquecimento (lâmpada).....	19
Figura 4.5: Imposição do intervalo de conforto através do pavimento com resistência embutida e manutenção da temperatura através da lâmpada.	20
Figura 4.6: Intervalo de aplicação de aquecimento a uma potência de 89.7 W, para determinada variação de temperatura.	20
Figura 4.7: Imposição de temperaturas acima do intervalo de conforto, no sentido possuir temperaturas de conforto posteriormente.....	21
Figura 5.1: Esquema da rede de calor referente ao modelo RC utilizado para a modelação. O esquema da esquerda é referente um sistema de convencional onde a climatização é realizada diretamente com o espaço interior. O esquema da direita trata-se da adaptação realizada para este trabalho, onde o aquecimento é realizado no interior do pavimento.....	23
Figura 5.2: Gráfico resultante da simulação sem condicionamento de variáveis do ensaio para o ensaio em que se é imposto um aumento de temperatura de 15°C.....	27
Figura 5.3: Gráfico resultante da simulação sem condicionamento de variáveis, para o ensaio em que se é imposto um aumento de temperatura de 13°C.....	27

Figura 5.4: Discriminação das resistências constituintes da resistência R ₂ ; R _{si} é a resistência superficial entre o pavimento e o ar, sendo R _p a resistência do próprio pavimento.....	28
Figura 5.5:Gráfico resultante da simulação com condicionamento de variáveis (x ₁ =0.801; x ₄ =0.226), para o ensaio em que se aplicou o aquecimento durante 45 minutos.	32
Figura 5.6: Gráfico resultante da simulação com condicionamento de variáveis (x ₁ =0.801; x ₄ =0.226), para o ensaio em que se é imposto um aumento de temperatura de 15°C.	32
Figura 5.7:Gráfico resultante da simulação com condicionamento de variáveis (x ₁ =1.23; x ₄ =0.43), para o ensaio em que se é imposto um aumento de temperatura de 17°C.....	33

Índice de Tabelas

Tabela 3.3.1:Propriedades físicas dos materiais predominantes na instalação.....	14
Tabela 4.1:Valores de temperatura e transmissão térmica registados em situação de aproximação ao regime permanente.	18
Tabela 5.1:Resultados da simulação através do modelo 2R2C, sem qualquer condicionamento das variáveis.	27
Tabela 5.2:Resultados da simulação modelo atribuido os valores de 0,226 e 0,43 °C/W a R ₂	30
Tabela 5.3:Resultados da simulação através do modelo 2R2C, com condicionamento de variáveis (x ₁ =0.801; x ₄ =0.226).....	31
Tabela 5.4: Resultados da simulação através do modelo 2R2C, com condicionamento de variáveis (x ₁ =1.23; x ₄ =0.43).....	32
Tabela 5.5: O consumo de energia realizado, e calor armazenado pelo pavimento tendo em conta a sua variação de temperatura.....	34
Tabela 5.6: Resultados da simulação, considerando perdas de calor de 10	34

Acrónimos

UE	União Europeia
<i>nZEBs</i>	<i>nearly Zero-Energy Buildings</i>
RC	Resistência-capacitância
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado
TABS	<i>thermally activated building systems</i>
PCM	<i>Phase change materials</i>
DEGGE	Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia
XPS	Poliestireno extrudido
IC	Intervalo de Conforto
RMSE	<i>Root mean square error</i>

Simbologia e Notações

ϕ	<i>Time lag</i>
f	<i>decrement factor</i>
Φ_L	Potência de aquecimento pela lâmpada [W]
H_{tr}	Coefficiente de transmissão térmica [W/°C]
ΔT	Diferença de temperatura [°C]
H_{ve}	Coefficiente de transmissão térmica por ventilação [W/°C]
A_p	Área interior útil de pavimento [m ²]
P_d	Pé direito da fração [m]
Φ_{HP}	Potência de aquecimento do pavimento [W]
T_r	Temperatura do ar interior [°C]
T_m	Temperatura da massa exposta [°C]
C_1	Capacitância 1 [kJ/°C]
C_2	Capacitância 2 [kJ/°C]
R_1	Resistência 1 [°C/W]
R_2	Resistência 2 [°C/W]
T_0	Temperatura exterior [°C]
R_{si}	Resistência térmica superficial interior [°C/W]
R_p	Resistência térmica do pavimento [°C/W]
V	Volume [m ³]
ρ	Massa volúmica [kg/m ³]
C_p	Capacidade térmica mássica [J/kg.°C]

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Nunca em nenhum outro momento da história se verificou tanta preocupação com as questões climáticas, como a que se assiste neste preciso momento. Esta é uma temática que requer a maior das precauções, no entanto as grandes potências económicas responsáveis por grande parte da degradação do planeta, face aos interesses económicos tendem a deixar esta problemática para segundo plano. A União Europeia ainda assim apresenta esforços no sentido de reverter a situação, procurando a descarbonização da economia através da pesquisa, inovação e consequentemente uma maior eficiência energética.

A área das energias renováveis é aquela onde se tem verificado um maior investimento nos últimos anos e que parece ser a solução mais óbvia para a resolução de algumas questões energéticas. No entanto a solução não passa exclusivamente por esse caminho, é necessário o desenvolvimento de outras áreas que permitam a utilização sustentável e inteligente das renováveis, como é o caso da eficiência energética em edifícios; estima-se que estes sejam responsáveis pelo consumo de cerca de 40% da energia consumida na União Europeia e por 36% das emissões de dióxido de carbono. A UE apresenta como diretivas que os novos edifícios a partir de 2020 sejam todos *nearly Zero-Energy Buildings (nZEBs)*, ou seja que uma parte significativa da energia consumida seja de origem renovável (Europeia, 2019).

Tendo em conta o que foi dito anteriormente entende-se facilmente, que é necessário realizar uma gestão eficiente da geração renovável e do consumo da mesma por parte dos edifícios. Sendo este um momento de transição energética, em que é necessário lidar com a variabilidade e por vezes imprevisibilidade das fontes renováveis, surge o desafio de incutir alguma flexibilidade ao sistema de forma a conseguir equilibrar a oferta e procura de energia na rede. O consumo energético dos edifícios e nomeadamente a energia dedicada à climatização é uma parte bastante significativa do consumo elétrico, que utilizando técnicas específicas é possível atribuir alguma elasticidade a este encargo energético. O comportamento térmico dos elementos estruturais e da envolvente do edifício como o pavimento, teto e paredes permitem o armazenamento de calor, e a sua consequente libertação quando necessário, ocorrendo estes processos geralmente nos momentos mais convenientes à rede.

Com a progressiva transição do setor elétrico dos combustíveis fósseis para as fontes renováveis variáveis no tempo, surge o caso de em alguns momentos existir excedente de produção renovável, sendo que o contrário também se verifica e nesse caso existe necessidade de recorrer a fontes não renováveis. Também o consumo é variável no tempo, verificando-se momentos de maior (*peak*) e menor (*off-peak*) procura de energia na rede, estes factos levam a que sejam adotadas estratégias entre a produção e consumo, no sentido de que seja retirado o máximo aproveitamento das fontes renováveis, desenvolvendo um setor elétrico sustentável.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo estudar a flexibilidade do consumo dedicado ao aquecimento ambiente de uma divisão explorando a acumulação de calor nos materiais de construção com maior inércia. A inércia do edifício permite armazenar calor durante os momentos em que existe excesso de produção renovável ou que a energia é mais barata, assim verifica-se um retardamento na libertação do calor para o espaço a climatizar, evitando o consumo elétrico nos momentos mais dispendiosos. Em resultado daquilo que é a rotina generalizada da sociedade, os momentos de maior necessidade de energia elétrica apresentam uma considerável simultaneidade com as maiores necessidades residenciais a verificarem-se a partir do final da tarde e início da noite.

Especificamente neste caso será estudado experimentalmente o armazenamento de calor num pavimento com uma considerável massa, analisando primeiramente o seu comportamento à indução de calor através de uma resistência elétrica embutida no seu interior e de seguida o decaimento de temperatura do pavimento com a libertação de calor para o espaço. Para além do pavimento com elevada massa térmica, é necessário criar uma envolvente que desempenhe as funções de uma parede e de um teto, simulando desta forma uma divisão. Para a análise desta instalação foi colocado ainda o objetivo de utilizar modelos simplificados de resistência-capacitância (RC).

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente tese demonstra uma alternativa à climatização de edifícios, que visa atribuir uma maior flexibilidade ao consumo, com especial ênfase no setor residencial. Para estudar esta alternativa será necessário abordar temáticas aparentemente distintas, e adotar diferentes métodos a fim de chegar a conclusões concretas.

2. Estado de Arte: Nesta fase são revistos dois tópicos principais, essenciais ao desenvolvimento deste trabalho. O primeiro deles, sendo este um sistema de climatização elétrico é importante rever as características do consumo e relacionar essas mesmas características com o paradigma das redes elétricas atuais. O outro tópico prende-se com as propriedades físicas que permitem o desenvolvimento deste tipo de sistemas, e as implicações que estas apresentam no desempenho dos edifícios.
3. Caso de Estudo: Este capítulo pretende dar a conhecer o contexto da instalação utilizada, realizando toda a caracterização física do pavimento já existente e da envolvente a construir ao nível de dimensões e dos materiais utilizados. É ainda apresentada a acomodação dos instrumentos necessários para recolha de dados, e as configurações adotadas na instalação consoante o teste que se pretende realizar.
4. Método experimental: Este capítulo começa por apresentar algumas considerações importantes, para a recolha de dados experimentalmente em laboratório. Inicialmente são realizados alguns testes que permitem conhecer a dinâmica da instalação face ao aquecimento através do pavimento, e por outro lado recorrendo ao aquecimento direto do ar sem qualquer inércia térmica. Aqui é possível retirar conclusões sobre o desempenho da instalação e realizar uma abordagem simplificada das formas como esta pode ser aplicada num cenário real.
5. Método Numérico: Neste capítulo é realizada toda a descrição do modelo 2R2C, que por sua vez é adaptado em código MatLab. Este modelo recorre aos dados registados no capítulo anterior para a modelação das resistências e capacitâncias da instalação. Numa primeira abordagem não é colocado qualquer tipo de condicionamento ao modelo permitindo a sua livre simulação. Pelo contrário nos testes seguintes são definidas algumas variáveis, com objetivo de enquadrar os resultados ao problema, e evitar obter valores pouco coerentes.
6. Conclusão: Por fim serão apresentadas as conclusões retiradas da presente dissertação de mestrado, realizando um balanço global sobre a forma como este tema foi abordado, e as possibilidades para um trabalho futuro.

2. Estado de Arte

2.1. Consumo elétrico e a sua flexibilidade

Tradicionalmente os sistemas de produção elétrica de origem fóssil, eram concebidos em grandes unidades de produção e operavam no sentido de ir diretamente ao encontro das necessidades de consumo. Por sua vez, os sistemas de geração renovável são muitas vezes pequenas unidades descentralizadas. Essas são caracterizadas pela flutuação e intermitência, pelo que o aumento da sua penetração exige uma certa adaptação, que permita a contínua transição para estes sistemas mais sustentáveis. Desta forma, contrariamente ao que era realizado anteriormente, é sugerido que o consumo seja ajustado à potencia disponível (Junker et al., 2018).

A carga na rede é um fenómeno que, analisando fatores como a agregação de consumo e a sua distribuição na rede, é representativo da atividade existente a nível residencial e laboral. Isto assume especial importância na forma como a sociedade pode partilhar práticas e hábitos, no sentido de aumentar a flexibilidade do consumo. Posto isto o desenvolvimento das *smart grids* assume uma enorme relevância, uma vez que estas de forma sustentável e económica, asseguram a fornecimento de energia, integrando as ações de todos os utilizadores, e favorecendo a comunicação entre a geração e o consumo. A troca de informação em tempo real entre sistemas inteligentes, permite delimitar com precisão, os momentos mais propícios à realização de determinado consumo (Powells et al., 2014).

De forma bastante simplificada o consumo pode apresentar diversas formas e características, o que na hora da sua gestão pode ser importante:

- a) Consumo armazenável: O armazenamento de carga para utilização posterior. É o caso de baterias químicas utilizadas em carros elétricos, ou armazenamento de calor por inércia térmica em águas quentes sanitárias.
- b) Consumo flexível: Quando funcionamento do equipamento é independente do momento ou de terceiros. Nomeadamente máquinas de lavar roupa, louça.
- c) Consumo momentâneo: O consumo resultado da atividade em tempo real das pessoas, e que não pode ser realizado noutro momento. É o caso da televisão, computador ou iluminação.

A figura 1 mostra um exemplo concreto de flexibilidade, na climatização de edifícios, onde é utilizado um sistema de penalização para o consumo. Neste contexto pretende-se manter um edifício no interior de um intervalo de conforto (IC), comparando a utilização de um sistema de climatização com controlo inteligente e do outro lado um sistema de controlo convencional. Este sistema caracteriza-se por manter a temperatura no interior do IC, pelo menor custo possível, realizando o consumo durante os momentos de menor penalização.

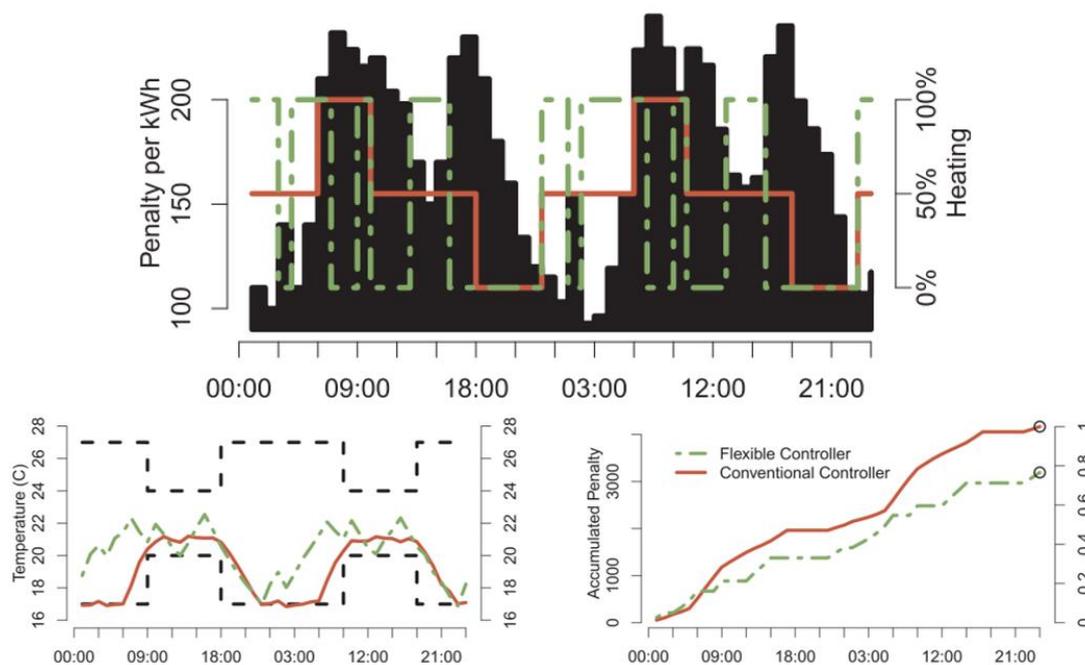


Figura 2.1: No primeiro de cima, está a sombreado a penalização aplicada a cada momento, a linha contínua vermelha representa a intensidade do aquecimento com controlo convencional, o tracejado verde representa o aquecimento com controlo inteligente. O gráfico de baixo à esquerda representa as temperaturas registadas, sendo o tracejado preto os limites de conforto superior e inferior a cada momento do dia. O gráfico de baixo à direita demonstra a penalização acumulada para os dois tipos de controlo (Junker et al., 2018).

2.2. Inércia térmica em edifícios

2.2.1. Introdução ao conceito de inércia térmica

Uma vez que a questão deste trabalho se centra nas necessidades de energia dos edifícios, salienta-se que é aceite pela generalidade dos especialistas, que a resistência térmica da envolvente dos edifícios é o fator mais determinante para a diminuição da procura de energia dedicada à climatização (Kaynakli, 2012). Parâmetros como a resistência térmica ou transmitância permitem estudar de forma simples o fluxo de calor através da envolvente do edifício em regime permanente. No entanto em cenários reais este regime dificilmente é atingido, pois os vários fatores envolvidos no estudo apresentam um comportamento dinâmico. O facto de se possuir uma situação de regime transiente, implica a inclusão de algumas noções que em regime permanente não eram tidas em conta. Como é o caso da possibilidade do armazenamento ou libertação de calor por parte da massa térmica do edifício dependendo da temperatura dos elementos. Os próprios edifícios são capazes de armazenar calor na sua estrutura (paredes, teto, chão), esta capacidade é determinada pelas propriedades térmicas dos materiais. O calor que pode ser armazenado é diretamente influenciado pela massa volúmica e pela capacidade térmica das soluções construtivas, sendo a condutividade térmica responsável pela velocidade com que ocorre a transferência de calor (Verbeke & Audenaert, 2018).

2.2.2. Descrição qualitativa da inércia térmica

A utilização de massa térmica em edifícios é discutível, uma vez que essa depende de outros fatores como os ganhos internos, a movimentação do ar por infiltração e ventilação, ganhos solares através de superfícies transparentes, a transmissão térmica por condução na envolvente, e também o clima local. Essa é, em muitos casos uma mais valia uma vez que diminui as flutuações da temperatura interior, e provoca um atraso de reação comparativamente à temperatura exterior, diminuindo as necessidades de climatização. O efeito da inércia térmica é facilmente percebido em edifícios históricos com elevada massa, como é o caso de monumentos e igrejas. Nestes casos é notório que as flutuações da temperatura interior são bastante pequenas, não necessitando de climatização, mesmo durante os meses mais quentes de verão.

Contudo é necessário ter em conta que a utilização de massa para o armazenamento de calor nem sempre é favorável. Apesar do efeito da inércia térmica trazer benefícios ao nível de consumo e conforto, é errado pensar no aumento descomedido da massa nos edifícios como uma medida sustentável a adotar. Caso seja necessário recorrer à climatização, edifícios com excessiva massa requerem maiores intervalos de tempo, para o pré-aquecimento ou pré-arrefecimento, o que resulta por vezes em desconforto para os ocupantes e maior dispêndio de energia (Slee et al., 2013).

O desempenho de edifícios é algo pouco linear, pelo que a sua complexidade advém essencialmente da variabilidade dos fluxos de energia existentes, e de como isso se relaciona, com o armazenamento térmico nos materiais dos edifícios. Um desses fluxos são os ganhos internos resultantes da atividade metabólica dos ocupantes e da utilização de equipamentos libertadores de calor como é o caso da iluminação. A incidência de radiação direta é outro fluxo de calor, e que é tanto maior quanto maior a irradiância e a área de vão envidraçados. Os dois fluxos anteriormente referidos resultam sempre em ganhos de calor, no entanto existem outros fluxos que dependendo das condições existentes tanto poderão resultar em ganhos como perdas. É o caso do fluxo de calor por condução através das superfícies opacas, que dependendo do seu nível de isolamento e da diferença entre as temperaturas interior e exterior, influenciam a troca de calor com o exterior. Algo de semelhante ocorre com as movimentações das massas de ar por infiltração ou ventilação natural, que estão fortemente relacionadas com o diferencial de temperatura e o caudal de renovação de ar (Verbeke & Audenaert, 2018). A conjugação destes fluxos determina o balanço de energia nos edifícios, que dependendo do valor do mesmo resulta numa variação da temperatura interior. Se essa for superior à temperatura da envolvente interior, verifica-se armazenamento de calor, caso contrário verifica-se libertação do calor armazenado.

O regime transiente deve-se à variabilidade da temperatura e da radiação solar inerente ao ciclo diário. Para considerar essa variação, é comum atribuir um perfil sinusoidal às curvas de temperaturas, através das quais será permitido avaliar a ação da inércia térmica nos edifícios, aplicando os parâmetros *time lag* (Φ) e *decrement factor* (f). Ambos os conceitos pretendem entender a reação dos edifícios face aos estímulos exteriores. No caso do *time lag* este permite avaliar a velocidade de resposta térmica do edifício face às condições exteriores. A título de exemplo, assumindo um perfil sinusoidal, existe um primeiro momento em que a temperatura exterior atinge um valor mínimo, a temperatura interior do edifício face à influência exterior irá num segundo momento atingir um valor mínimo, esta diferença temporal é designada por *time lag*. O *decrement factor* é um indicador utilizado para estudar a influência do exterior na temperatura interior, sendo calculado através da razão entre a amplitude da temperatura interior e a amplitude da temperatura exterior. O armazenamento e a libertação de calor por parte dos materiais influenciam significativamente o *time lag* e o *decrement factor*, e essas são função da difusão térmica, massa volúmica e calor específico do material. A utilização de materiais com maior massa volúmica e calor específico, permitem armazenar mais calor melhorando assim o desempenho dos edifícios (Ulgen, 2002). O aumento da difusividade térmica, apesar de possibilitar um armazenamento

de calor mais rápido, permite também uma libertação mais rápida. Isto leva a que se realizem demasiadas trocas de calor, comprometendo o comportamento térmico do edifício. A utilização de várias camadas e a seleção adequada de materiais permite aumentar significativamente a qualidade construtiva dos edifícios. Tradicionalmente são utilizadas soluções de isolamento térmico nas camadas mais exteriores, para evitar trocas de calor por condução com o exterior, e nas camadas mais interiores recorre-se a materiais mais pesados que forneçam não só isolamento, mas também inércia térmica ao edifício (Al-Sanea et al., 2013; Asan, 1998; Ulgen, 2002).

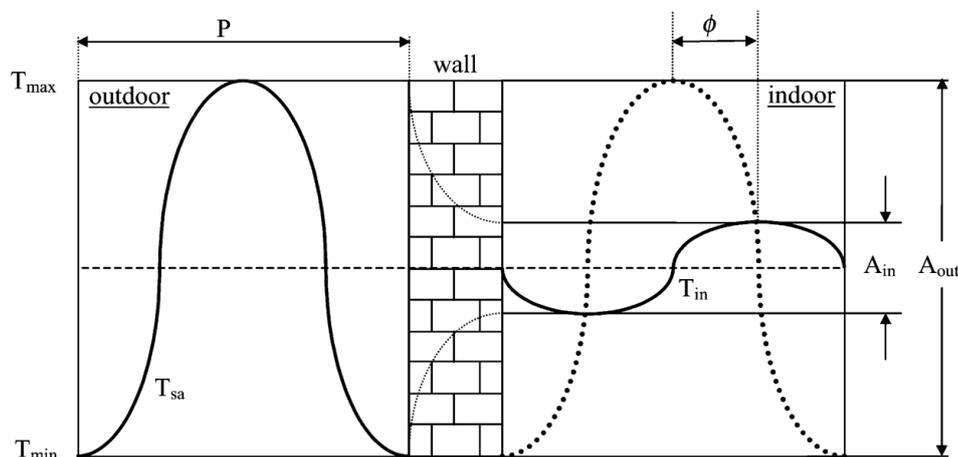


Figura 2.2: Representação esquemática do time lag, ϕ , e do decrement factor $f=A_{in}/A_{out}$, e perfis de temperatura. (Ulgen, 2002)

2.2.3. Modelação da inércia térmica

Para estudar o efeito da inércia térmica pode recorrer-se a medições experimentais, embora sejam um método pouco prático e dispendioso, pelo que são preferencialmente adotados modelos teóricos e simulações computacionais (Kalema et al., 2008). Os estudos analíticos são uma via cada vez menos utilizada, pois os resultados obtidos pelos mesmos são bastante insuficientes, para as necessidades atuais. A formulação teórica, com base nas leis da física, como a lei de Fourier, e os perfis sinusoidais de temperatura são bastante úteis no sentido de perceber as trocas de calor nos edifícios, permitindo realizar uma primeira aproximação ao problema. Estas técnicas são bastante limitadas uma vez que são utilizadas essencialmente em regime permanente, dificultando a inclusão do estudo da inércia térmica. Existem algumas formulações teóricas mais detalhadas, que em complementaridade com a análise de Fourier e os perfis sinusoidais de temperatura, permitem obter resultados relativamente ao impacto da inércia térmica. É possível estudar por exemplo a influência da inércia térmica e da ventilação noturna nas necessidades de climatização de edifícios. No entanto estas formulações já apresentam um nível de complexidade bastante considerável, pelo que torna difícil o estudo analítico (Yang & Li, 2008).

Atualmente os modelos numéricos e a simulação computacional são os métodos mais utilizados, para o estudo do desempenho energético dos edifícios, uma vez que permite obter boas aproximações. Os progressos conseguidos neste campo permitem realizar uma análise mais completa e dinâmica, e incluir parâmetros, que outros métodos de estudo dificilmente teriam em conta. Alguns desses parâmetros como a massa do edifício, sistemas AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado), ganhos solares e em especial os dados climáticos do local são fatores relevantes no desempenho energético do edifício, pelo que devem ser considerados (Verbeke & Audenaert, 2018). Os programas utilizados na simulação computacional de edifícios possuem no seu código diferentes vias para a obtenção de resultados. Podendo ser realizada uma aproximação através de complexos cálculos

numéricos de multivariáveis, que visam traduzir o mais fielmente possível o balanço de energia aos edifícios. Outro meio utilizado pelos programas é a utilização de dados estatísticos de medições reais, que através de regressões permite realizar previsões bastante satisfatórias. Em alternativa existem ainda os métodos híbridos que recorrem à utilização dos dois métodos anteriores. Esta via recorre num primeiro momento a cálculos numéricos, para a obtenção de resultados, sendo por sua vez os dados estatísticos tentam avaliar a fiabilidade dos resultados obtidos anteriormente. Os programas de simulação são constantemente comparados a dados experimentais e a testes empíricos, no sentido de aumentar a segurança na sua utilização, mas também diagnosticar possíveis falhas melhorando a sua qualidade (Fumo, 2014).

Durante anos de investigações em diversas áreas da Física, um dos maiores problemas era a dificuldade de chegar a uma solução analítica ou numérica, que permitisse o estudo de forma relativamente mais simples sem um consumo excessivo de tempo. Percebeu-se então que existiam descrições matemáticas semelhantes entre diferentes áreas da física, permitindo realizar analogias entre elas, como é o caso do fluxo de corrente elétrica e o fluxo de calor. Este paralelismo possibilita adotar técnicas que são utilizadas nos circuitos elétricos, e aplicar na dinâmica comportamental do calor em edifícios (Robertson & Gross, 1958). Nos circuitos elétricos um dos modelos mais simples é o resistor-condensador (RC), o qual é aceite como uma boa aproximação para o de estudo do desempenho dos edifícios. Os materiais que compõem os edifícios apresentam uma determinada resistividade ao fluxo de calor, o que pode ser comparado às resistências elétricas. Da mesma forma a capacidade dos materiais para armazenar calor pode ser comparado à ação dos condensadores. Esta abordagem pode apresentar algumas variantes, pois consoante o problema, podem ser utilizados modelos com diferentes números de elementos resistivos ou capacitivos. O modelo assume que o edifício ou os seus elementos apresentam uma temperatura uniforme, o que não traduz de forma fiel a realidade uma vez que existe a constante presença de variáveis como pontes térmicas, ventilação ou ganhos solares. Apesar de esta aproximação não representar uma boa distribuição de temperatura, apresenta uma boa aproximação geral ao comportamento térmico do edifício (Danza et al., 2016).

2.2.4. Efeito da inércia térmica nos edifícios

Verifica-se que os resultados obtidos experimentalmente para o estudo da inércia são pouco conclusivos e difíceis de ser comparados entre si. As conclusões obtidas pelos vários autores podem ser bastante díspares, resultado não só das considerações adotadas por cada um, mas também das condições em que essas experiências foram realizadas. Fatores como ganhos solares e internos, o nível de isolamento térmico da envolvente, quantidade de massa térmica, taxa de ventilação e essencialmente o clima local têm um efeito crucial no desempenho dos edifícios.

Um estudo realizado numa região a cerca de 120 km a Norte de Madrid revelou a inércia térmica dos edifícios bastante proveitosa. Esta é uma zona que apresenta amplitude térmica bastante considerável, registando no mês mais quente uma temperatura máxima média de 35.7°C, e uma temperatura mínima média de 10.3°C. Este estudo foi realizado, com o recurso a três edifícios, dois dos quais apresentam uma construção tradicional e vernacular de elevada inercia térmica, o outro edifício trata-se de um pré-fabricado de madeira. No sentido de perceber como a inercia térmica influencia a temperatura interior foi estudada a razão entre a variação de temperatura interior e exterior, em várias locais dos edifícios. O estudo concluiu que para o pré-fabricado de madeira este valor era cerca de 3 a 4 vezes superior, relativamente aos edifícios tradicionais. Durante o verão apenas os edifícios tradicionais proporcionam eficazmente conforto térmico, sem qualquer recurso a climatização. Já durante o inverno todos edifícios requerem a utilização de climatização, sendo expectável um menor consumo para os

edifícios tradicionais. Isto deve-se ao maior isolamento destes edifícios e não tanto à sua inércia térmica (Martín et al., 2010). Um outro estudo relativamente aos efeitos da inércia térmica foi realizado para o clima frio e marítimo de Belfast nos meses de outubro a março. Os dados climáticos revelam que mesmo o mês mais quente (outubro) apresenta uma temperatura média a rondar os 10°C, sendo que a temperatura máxima dificilmente ultrapassa os 15°C. Este edifício tem paredes com uma espessura de 40 cm, constituídas por material isolante, blocos de cimento e tijolo. Face às baixas temperaturas não existe uma retenção de calor significativa, pelo que é necessário um grande consumo de energia, para o aquecimento não só do ambiente como da estrutura do edifício. O estudo conclui que as necessidades de aquecimento durante um período de quase 6 meses (1 de outubro a 22 de março) são de 40.9 MJ/m². Se a parede não tivesse qualquer capacidade de armazenar calor seria necessário apenas 15 MJ/m². Após o aquecimento dos espaços ao fim do dia existe alguma retenção de calor por parte do edifício, sendo visível esse efeito na temperatura interior da manhã seguinte. Ainda assim acaba por ser dar um consumo excessivo de energia, pelo que a utilização da massa térmica é uma estratégia desadequada, para o rigoroso inverno de Belfast (Reilly & Kinnane, 2017).

Um estudo realizado no clima quente e desértico de Las Vegas revelou que a utilização de uma construção mais pesada permitia reduzir as necessidades de aquecimento durante os meses frios, mas aumentava as necessidades de arrefecimento durante o Verão. Este estudo considera dois edifícios semelhantes, sendo que o primeiro utilizava a tradicional estrutura em madeira, e o segundo utilizava materiais mais pesados como o betão. Verificou-se que o edifício com maior massa térmica apresentava capacidade para absorver o calor durante o dia, o que regulava a temperatura interior moderando a sua subida. Este é um local que atinge elevadas temperaturas e apresenta altos níveis de irradiância solar, levando à acumulação excessiva de calor. Seria de esperar que o excesso de calor fosse removido durante a noite, no entanto a temperatura noturna não é suficientemente baixa, para que isso aconteça. Como resultado era necessário recorrer à climatização do edifício, levando a um consumo adicional de energia (Zhu et al., 2009).

De um modo geral é possível reter, que a utilização da inércia térmica nos edifícios é especialmente eficaz em climas moderados. Locais que apresentam alguma amplitude térmica, com um regime de temperatura próximo da temperatura de conforto, permitindo momentos de absorção e libertação de calor. O próprio edifício assume um especial papel de moderador da variação da temperatura interior, aumentando o nível de conforto, ou diminuindo o consumo dedicado à climatização. Em ambientes mais extremos é recomendável um estudo mais aprofundado, a fim de perceber se a inércia térmica é uma estratégia viável, ou se por outro lado resulta num aumento do consumo em climatização. Anteriormente foram apresentados exemplos do efeito da inercia térmica nos edifícios para um determinado mês ou estação. No entanto os estudos devem ser realizados tendo em conta a variabilidade climática anual. Apesar da inercia térmica registar efeitos benéficos em determinado momento o mesmo não é garantido para o resto do ano, podendo até ser prejudicial e apresentar um balanço final negativo.

Este estudo encontra-se essencialmente direcionado para edifícios residenciais, embora estas estratégias de gestão energética possam ser aplicadas em edifícios de comércio e serviços que se diferenciam dos edifícios residenciais pelos maiores ganhos internos devido a ocupação e equipamentos. Por exemplo, os escritórios atuais apresentam uma grande concentração de pessoas e equipamentos como computadores e iluminação, o que contribui fortemente, para o aquecimento do espaço. Assim a inércia térmica do edifício com o auxílio da ventilação noturna poderá também fazer parte do plano de climatização do edifício.

2.3. Baterias térmicas

Uma tecnologia consideravelmente bem conhecida e próxima da estudada neste trabalho, são os *thermally activated building systems* (TABS). Consiste na utilização da massa térmica juntamente com sistemas de climatização. Usualmente são aplicados pavimentos, ou até mesmo tetos, com consideráveis massas de betão ou tijolo. Interiormente encontram-se tubagens destinadas à circulação algum tipo de fluido que regula termicamente toda a massa. O condicionamento é tendencialmente realizado de forma intermitente, e a temperaturas próximas do intervalo de conforto, com a utilização mais comum de painéis solares térmicos ou bombas de calor. Este modo de operação permite a redução dos custos de utilização, tendo em conta que possibilita recorrer a sistemas de baixa potência e que operam com um elevado nível de eficiência (Olesen, 2012).

Os *phase change materials* (PCM) são uma tecnologia ainda com pouco mercado, que se encontra em fase de desenvolvimento, sendo por isso dispendiosa. Neste caso o que se pretende é aproveitar a capacidade dos materiais em armazenar ou libertar calor latente, beneficiando do processo de mudança de fase das substâncias. Estes materiais apresentam assim maior capacidade de armazenar calor por unidade de volume, comparativamente com os materiais convencionais. Os estudos desenvolvidos pretendem encontrar e desenvolver materiais com as propriedades termo físicas mais apropriadas para aplicação em edifícios. A temperatura de fusão e a capacidade térmica mássica dos materiais a utilizar são fatores fundamentais no sentido de maximizar o desempenho energético dos edifícios (Baetens et al., 2010). Existem algumas variações destas duas tecnologias, sendo atualmente estudadas alternativas onde as duas são utilizadas em conjunto. Concretamente a utilização de camadas de PCM adjacentes a lajes de betão ou gesso, ou empregando várias porções deste material no interior da própria laje. Estes sistemas de retenção de calor para além de pavimentos e tetos, são utilizados ainda em tetos falsos, incorporados nos sistemas de ventilação e de ar condicionado. Ao nível das paredes existem também estudos da aplicação de PCM em fachadas duplas ventiladas. (Navarro et al., 2016)

Neste trabalho o conceito de *buildings as thermal battery* ainda que seja um pouco similar aos TABS, é um objeto de estudo mais recente e pouco explorado. De forma bastante semelhante esta tecnologia pretende fornecer ainda maior flexibilidade energética ao consumo energético dedicado à climatização. Esta é uma alternativa que visa diminuir o pico de consumo durante o fim da tarde e início da noite, não só através do consumo durante o dia, mas assim como o período da noite especialmente nos momentos de menor consumo. O maior diferencial aqui presente face às técnicas já utilizadas reside na utilização de maior massa térmica. Esta permite a retenção de maior quantidade de calor e durante mais tempo, funcionando assim como uma bateria térmica. Uma vez que este tipo de sistema apresenta uma resposta lenta é crucial que exista algum tipo de planeamento para a sua utilização. O seu ciclo de funcionamento deve ser conjugado com os horários de ocupação, no sentido de evitar situações de desconforto por sobreaquecimento ou sobrearrefecimento do espaço. Esta situação apresenta especial importância durante as horas seguintes ao fim do aquecimento da bateria térmica. Neste momento é atingido o pico de calor armazenado, o que resulta naturalmente num aumento da temperatura do edifício, podendo até chegar a valores fora da zona de conforto. A excessiva climatização é justificada pela possível necessidade de compensar as perdas de calor existentes até ao momento da ocupação ao qual se pretende efetivamente proporcionar conforto. Tahersima et al. (2018) estudou o desempenho de dois pavimentos de betão aquecidos por sistemas geotérmicos. Estes pavimentos possuem uma espessura de 1.22 m e 0.18 m, possuindo tubagens destinadas ao aquecimento colocadas a uma profundidade de 0.15 m e a 0.18 m respetivamente.

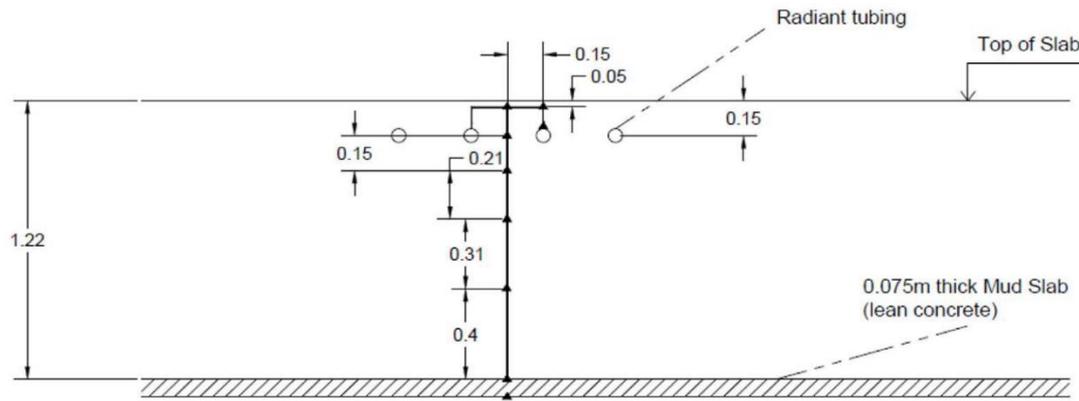


Figura 2.3: Esquema da localização de termopares e tubagens no pavimento com 1.22 m de espessura. (Tahersima et al., 2018)

Ambos os pavimentos foram submetidos a vários ciclos de aquecimento com a duração de aproximadamente 10 dias, através da circulação de água a uma temperatura de 26.7 e 32.2°C. Tal como era pretendido, terminado o aquecimento verifica-se a capacidade de reter calor no pavimento, uma vez que a sua temperatura diminui gradualmente. O pavimento de menor espessura apresenta uma queda abrupta de temperatura, quando comparando com o pavimento de maior espessura. Este pavimento com a espessura de 1.22 m, revela uma elevada capacidade para armazenar calor, uma vez que decorreram vários dias, até que se aproximasse da temperatura de estabilização. É importante mencionar que nos primeiros dias após o fim do aquecimento, a temperatura das camadas superiores e em contacto com o exterior diminuiram rapidamente. No entanto, nas camadas inferiores dá-se um aumento da temperatura, o que revela a resposta lenta do pavimento. Tendo em conta que as tubagens se encontram a uma profundidade de 0.15 m num pavimento de elevada espessura (1,22 m), o calor está essencialmente armazenado nas camadas superiores. Esta situação resultará eventualmente em maiores perdas de calor pela superfície, e subaproveitamento dos estratos inferiores do pavimento.

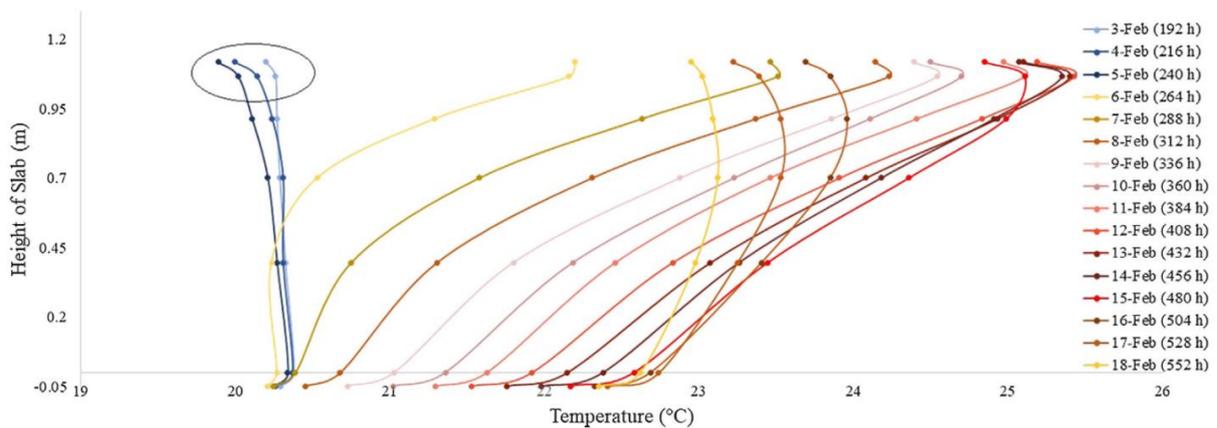


Figura 2.4: Registo diário de temperaturas a várias alturas do pavimento. Foi aplicado aquecimento contínuo entre os dias 5 a 15 de fevereiro (250 a 490 horas). (Tahersima et al., 2018)

3. Caso de Estudo

O foco deste trabalho é o estudo de um pavimento maciço, que assume a função de bateria térmica, e é aquecido através de uma resistência embutida. Em consequência da sua inércia térmica o pavimento retém calor durante longos períodos, retardando a libertação do mesmo. Este estudo teve por base uma instalação experimental, já construído anteriormente no âmbito de um projeto de licenciatura da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, constituída pelo pavimento maciço com a resistência elétrica. Para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado a instalação foi ampliada com a construção de uma envolvente, a fim de obter uma aproximação a uma divisão, assumindo o pavimento a função de bateria térmica. Todo o modelo construído utiliza técnicas pouco avançadas, ou até mesmo artesanais, não podendo ser encarado como uma fiel representação da realidade.

As experiências tiveram lugar no laboratório de circuitos elétricos, do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia (DEGGE). Face à natureza do tema desta dissertação estava prevista a sua execução, para os meses de fevereiro e março de 2020, no sentido de beneficiar das baixas temperaturas, típicas dessa época do ano. No entanto devido aos constrangimentos pandémicos, e com a faculdade encerrada, a parte prática foi forçosamente interrompida no início de março, só tendo sido possível retomar em outubro.

3.1. Descrição da instalação experimental

3.1.1. Pavimento

- I. O pavimento foi concebido através de tijolo-burro maciço ou refratário, feito em argila avermelhada. A escolha deste tipo de material deve-se essencialmente à sua constituição compacta, e boa capacidade de armazenamento de calor por volume. Foi também importante o facto de não ser um material inflamável, e que suportasse de forma segura aumentos de temperatura. Os tijolos foram unidos através de argamassa refratária, formando um pavimento com a dimensão de 68 x 65 cm, e uma espessura de 6 cm. (Figura 3.1)
- II. Na face inferior do pavimento foram colocadas as resistências destinadas ao aquecimento do mesmo. Para isso foram feitas ranhuras com uma profundidade e largura de 3 mm, espaçadas paralelamente entre si por uma distância de 1,5 cm. A resistência elétrica foi então colocada nas ranhuras, tendo sido utilizados 28 metros de filamento, obtendo-se uma impedância de 565 Ω .
- III. De forma a evitar perdas de calor inferiormente, o pavimento maciço foi colado através de argamassa a uma placa isolante de poliestireno extrudido (XPS), com uma espessura de 3 cm. Por fim foi ainda colocado um tampo de madeira como base. (Figura 3.2)



Figura 3.2: As várias camadas do pavimento com diferentes espessuras. Ao topo tijolo de burro (6 cm), ao centro poliestireno extrudido (3 cm), e na base um tampo de madeira (3 cm).



Figura 3.1: Superfície do pavimento utilizado com uma dimensão de 68 x 65 cm.

3.1.2. Envolvente

- I. Uma vez que o material base desta envolvente são placas de isolamento térmico, foi construída uma estrutura exterior em madeira, capaz de fornecer rigidez e proteção.
- II. Novamente foram utilizadas placas de poliestireno extrudido, sendo agora adotada uma espessura de 6 cm. Apesar de ser difícil realizar uma aproximação a um edifício real, foi escolhida uma espessura considerável, a fim de obter um nível de isolamento satisfatório. Perante estas condições é conseguido um valor de coeficiente de transmissão térmica semelhante, ao de uma fachada de paredes duplas de tijolo com uma espessura de 11 cm cada, e espaço de ar totalmente preenchido por isolamento com espessura de 4 cm (Santos, Pina dos; Matias, 2006).
- III. As placas de isolamento foram então colocadas no interior da estrutura em madeira, e fixas à mesma. Nas zonas de junção das placas foi colocada fita adesiva, com o objetivo de diminuir as perdas por infiltração de ar.
- IV. Colocada a envolvente sobre o pavimento foi obtida uma divisão de 70 x 70 cm e uma altura de 48 cm.

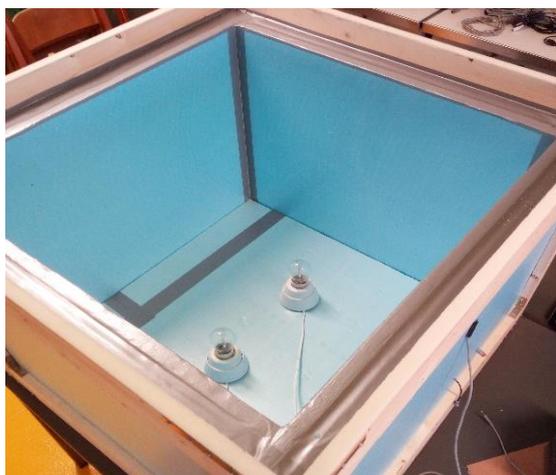


Figura 3.4: Interior da envolvente, com utilização de fita adesiva nas junções de placas, e presença de lâmpadas.



Figura 3.3: Vista exterior da envolvente com tampa colocada.

Tabela 3.3.1: Propriedades físicas dos materiais predominantes na instalação

	Massa volúmica [kg/m ³]	Calor específico [J/°Ckg]	Condutividade térmica [W/mK]	Resistência térmica [m ² k/W]	Espessura [mm]
Tijolo	1970	837.2	0.666	-	-
Isolamento	-	-	0.035	1.7	60

3.2. Condições experimentais

Para realizar o estudo do pavimento maciço e de todo o modelo, nomeadamente o seu comportamento térmico, é fundamental o registo regular de temperaturas. Esse registo foi realizado em intervalos de 1 minuto através de *data loggers* estrategicamente colocados, em pontos interiores e exteriores. Numa das experiências recorreu-se a lâmpadas incandescentes como fonte de aquecimento. Para mitigar o efeito da radiação nos sensores, estes foram semicobertos por cartão de pacote de leite, utilizando a face prateada e espelhada voltada para o exterior. O aquecimento através de lâmpadas cria naturalmente por convecção um fluxo de calor ascendente, verificando-se um especial aumento de temperatura na zona exatamente acima da lâmpada. Perante este facto tomou-se especial precaução com a colocação dos sensores, a fim de obter um registo o mais global possível da temperatura no interior da instalação.

As experiências foram realizadas utilizando o pavimento com resistência embutida ou uma lâmpada incandescente de 57W como fonte de aquecimento. Estas fontes de calor por sua vez encontravam-se ligadas a um controlador de tensão, que permitia realizar o aquecimento com a potência desejada.

Ao longo do trabalho a instalação apresenta diferentes configurações, em justificação do que se pretende estudar em cada momento. Foram realizados 3 estudos especialmente importantes, que necessitaram de condições em particular, para a sua realização:

1. Calcular o coeficiente de transmissão térmica da envolvente. De forma a diminuir a inercia térmica do modelo foi necessário retirar o pavimento maciço, e colocar por sua vez uma placa de isolamento com 5 cm de espessura; (Figura 3.5, esquerda)
2. Conhecer a autonomia temporal do pavimento, para manter o modelo dentro de determinado intervalo de temperatura, sem recurso qualquer sistema de aquecimento auxiliar; (Figura 3.5, centro)
3. Calcular a diminuição do consumo de sistemas auxiliares de aquecimento, realizando o pré-aquecimento através do pavimento maciço; (Figura 3.5, direita)

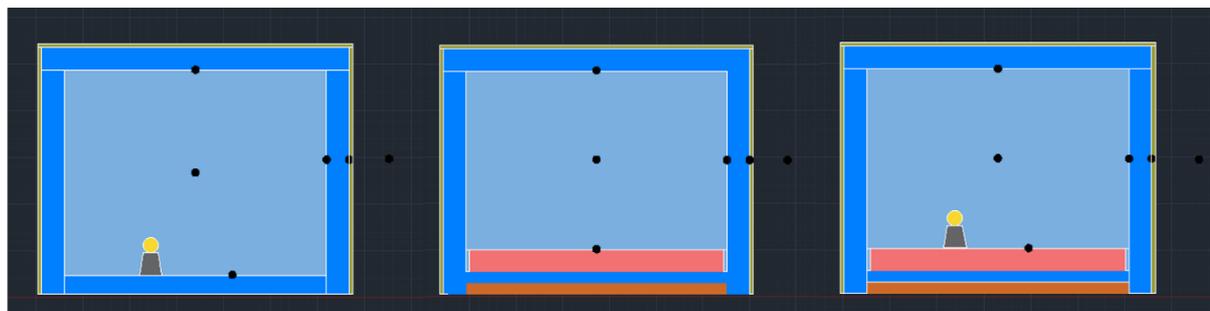


Figura 3.5: Esquema da localização dos termopares, e condições utilizadas em cada estudo. Na primeira instalação foi utilizada uma placa de isolamento na base e lâmpada; A segunda instalação utiliza apenas o pavimento maciço para estudar a sua autonomia; A última instalação utiliza o pavimento, e a lâmpada como sistema auxiliar de aquecimento.

4. Método experimental

4.1. Condições experimentais

É importante salientar que esta instalação ao contrário de edifícios reais, não se encontra exposta ao clima e ao ciclo diurno de temperatura. Verificou-se que esta mesma sala, onde foi realizado o trabalho, não regista consideráveis variações de temperatura ao longo do dia. O que é facilmente justificável, uma vez que a mesma apresenta orientação a norte, e está localizada no rés de chão de um edifício de 6 andares. Para além de não ter quaisquer ganhos solares relevantes, não existiam equipamentos em funcionamento, encontrando-se normalmente desocupada, com exceção de alguns momentos em que ocorria a recolha de dados.

Essa mesma recolha foi realizada durante o mês de outubro, momento durante a qual se verificou um considerável decaimento da temperatura ambiente. O que por sua vez resultou numa diminuição de temperatura da sala de 24°C para 20°C, valores estes considerados dentro do intervalo de conforto. Uma vez que a temática deste estudo é o aquecimento de edifícios faria sentido a existência de um certo gradiente de temperatura, entre a temperatura interior e exterior do modelo. Face à proximidade dos valores de temperatura da sala, e da temperatura de conforto, foi necessário criar uma estratégia de forma a viabilizar o estudo. Para isso procurou-se o valor médio de temperatura para os meses mais frios em Lisboa, valor este próximo dos 12°C. Em seguida foi definido 22°C como valor de temperatura de conforto ideal permitindo uma oscilação de -1°C e +1°C. Utilizando estes dois valores como referência, verifica-se uma diferença de temperatura de 10° C, entre o exterior e ambientes interiores para a época de aquecimento. Este valor de gradiente será usado como base para as experiências realizadas. Ou seja, para este trabalho será considerado o IC, [9°C,11°C] acima da temperatura da sala, independentemente do valor desta. De forma semelhante para toda a experiência não serão utilizados valores absolutos de temperatura, mas sim valores de diferenças de temperatura.

O controlo do aquecimento, quer através das resistências embutidas no pavimento, quer com recurso às lâmpadas, é sempre realizado manualmente. O modelo apresenta uma resposta lenta principalmente quando se utiliza o pavimento maciço. O pavimento apresenta respostas diferenciadas consoante as condições em que os ensaios são realizados, sendo necessário alguns testes preliminares, com o fim de conhecer o comportamento do mesmo. Por essa razão é importante, planear antecipadamente os momentos em que o aquecimento é ligado ou desligado de forma a obter valores de temperatura próximos do pretendido.

4.2. Testes Preliminares

No sentido de testar a sensibilidade da instalação experimental, para as experiências que se seguiriam foram realizados alguns testes iniciais. Primeiramente, utilizando o conjunto da envolvente e do pavimento maciço foi realizado o aquecimento durante curtos períodos de tempo, nomeadamente 45 minutos. Rapidamente entendeu-se que seria conveniente recorrer a uma potência de aquecimento considerável, pois utilizando potências mais baixas seria difícil realizar determinados testes num intervalo de tempo viável. Neste momento foi possível verificar uma diferença de temperatura, entre a superfície do pavimento e o ar interior. Esta diferença chega a atingir os 1.5 °C, no momento em que são registadas as temperaturas máximas no pavimento maciço e no ar interior. Ao nível do ar interior é perceptível a existência de uma distribuição de calor bastante homogénea, uma vez que a temperatura registada no ponto central da instalação é próxima da registada na superfície interior da envolvente. Verticalmente chega a ser registada uma diferença de 0.5 °C, entre o ar no centro e o topo do modelo. O mesmo teste foi repetido, para a aplicação do aquecimento durante 75 e 120 minutos. Isto permitiu verificar de forma ainda mais expressiva a capacidade de retenção de calor através do lento decaimento de temperatura, e entender a dinâmica da instalação experimental para os testes seguintes.

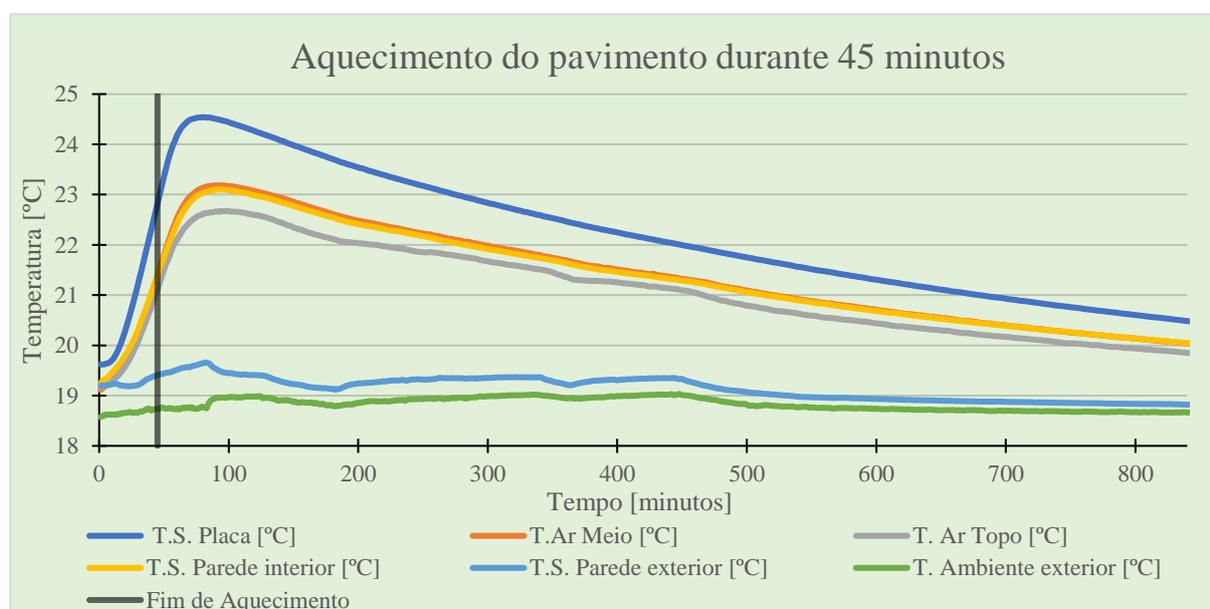


Figura 4.1: Perfil de temperaturas, em diferentes locais da instalação experimental aplicando aquecimento no pavimento durante 45 minutos com uma potência de 89,7 W.

O teste seguinte consistiu na realização do aquecimento novamente durante 45 minutos, e utilizando a mesma potência de aquecimento, no entanto utilizando lâmpadas. Imediatamente foi visível a diferença de reação ao aquecimento, registando-se um enorme aumento de temperatura num curto intervalo de tempo atingindo um valor elevado. De forma semelhante deu-se um rápido decaimento da temperatura, verificando-se por comparação com o pavimento a falta de capacidade de reter calor.

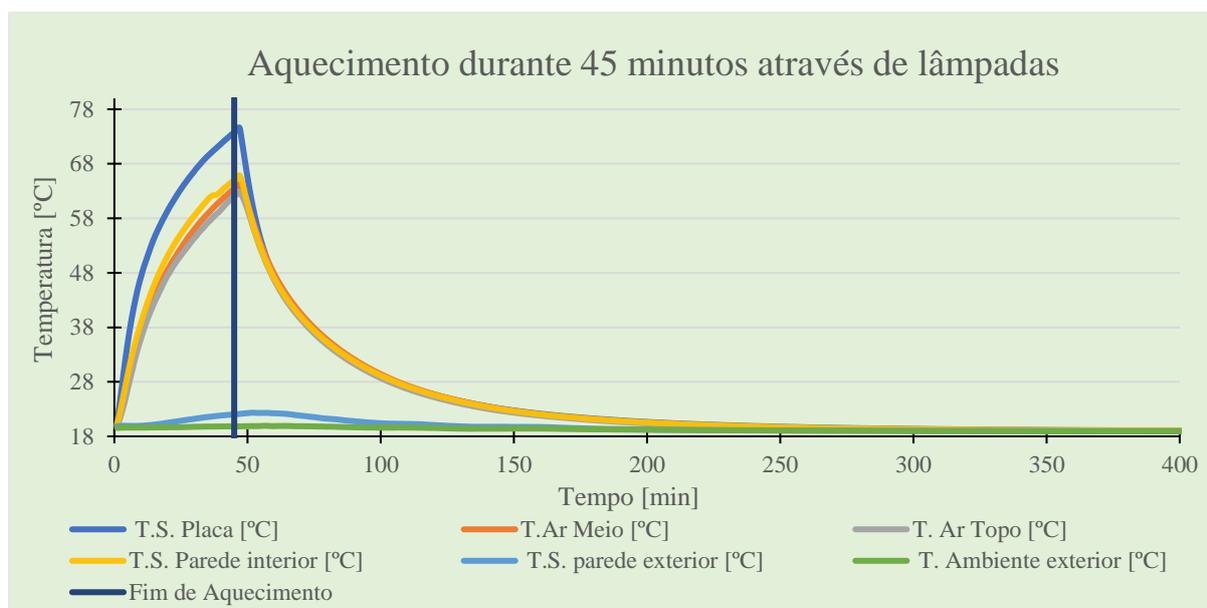


Figura 4.2: Perfil de temperaturas em diferentes locais da instalação experimental, aplicando aquecimento através de lâmpadas com uma potência de 87 W durante 45 minutos.

4.3. Avaliação de desempenho da envolvente

As primeiras condições de teste pretendiam determinar o desempenho térmico da envolvente recentemente construída, nomeadamente calcular o seu coeficiente de transmissão térmica. Outro ponto importante seria entender se existia necessidade de inserir algum tipo de ventilação no modelo. Para calcular o coeficiente de transmissão térmica da envolvente foi necessário recorrer ao aquecimento através da lâmpada, e conseguir uma boa aproximação ao regime permanente. O volume foi aquecido utilizando a lâmpada com três níveis de potência, e aguardou-se até a temperatura interior estabilizar. Neste momento sabe-se à partida que, em condições de regime permanente, o calor gerado pela lâmpada no interior do modelo é igual ao calor dissipado pela envolvente para o exterior. Inicialmente tentou-se realizar o aquecimento utilizando o pavimento maciço no interior da envolvente, no entanto devido à sua inércia térmica foi bastante difícil conseguir uma estabilização da temperatura. Por esta razão o pavimento maciço foi retirado, sendo substituído por uma placa isolante com 5 cm de espessura, ainda que presente alguma incerteza foi possível obter um regime próximo do permanente. Os dados obtidos foram colocados graficamente segundo a expressão 4.1, sendo Φ_L a potência de aquecimento utilizada pela lâmpada, e ΔT a diferença entre a temperatura interior estacionária e temperatura exterior. Por fim foi realizada a regressão linear dos dados, cujo declive representa o valor do coeficiente de transmissão térmica H_{tr} , sendo este 1.56 W/°C.

$$\Phi_L = H_{tr} * \Delta T \quad [W] \quad (4.1)$$

Tabela 4.1: Valores de temperatura e transmissão térmica registados em situação de aproximação ao regime permanente.

Potência de Aquecimento [W]	20	30	40
T. Regime Permanente [°C]	34.0	40.7	46.8
T. Laboratório [°C]	20.4	20.4	20.4
ΔT [°C]	13.6	20.3	26.5
H_{tr} [W/°C]	1.47	1.47	1.51

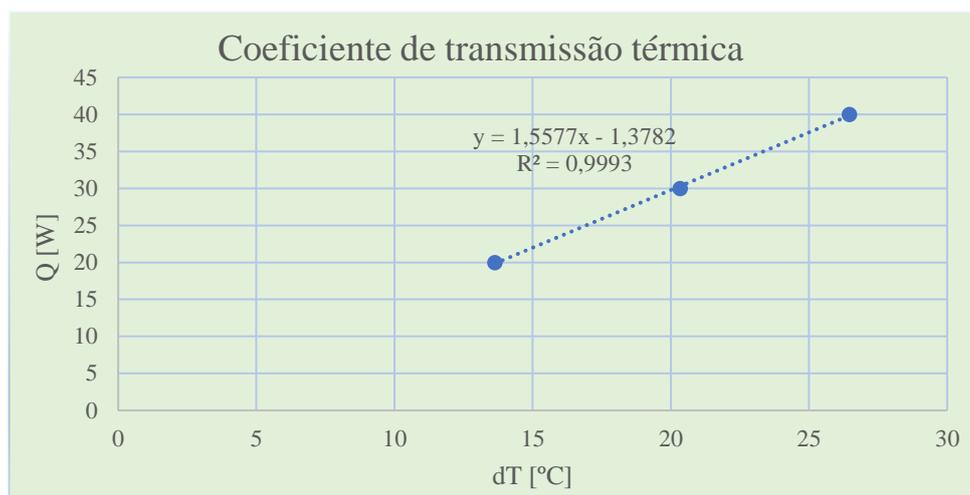


Figura 4.3: Gráfico da potência de aquecimento em função da diferença de temperatura em regime permanente; O declive da regressão linear dos pontos corresponde ao coeficiente de transmissão térmica da instalação.

Durante a abordagem preliminar foi considerada a hipótese de ser necessário instalar algum tipo de ventilador, no sentido de obter um cenário mais próximo do real. Por essa razão a construção da envolvente envolveu particular precaução, em assegurar que não existisse qualquer tipo de ventilação não controlada. Assim os locais especialmente propícios a infiltrações foram devidamente tapados com fita adesiva.

Para o dimensionamento do sistema de ventilação foi considerado o valor mínimo legislado de 0.4 renovações de ar por hora (RPH) em habitações (ADENE, 2016), e recorrendo à expressão 4.2 foi obtido um coeficiente de transferência de calor por ventilação de 0.032 W/°C. Este valor corresponde a cerca de 2.05% do valor do coeficiente de transmissão térmica da envolvente demonstrado anteriormente. Este valor é indicador das consideráveis perdas existentes por transmissão pela envolvente, verificando-se não ser justificável a implementação de qualquer ventilação.

$$H_{ve} = 0,34 * RPH * A_p * P_d \text{ [W/°C]} \quad (4.2)$$

A_p - Área interior útil de pavimento

P_d - Pé direito da fração

$$H_{ve} = 0,34 * 0,6 * (0,7 * 0,7) * 0,48 = 0,032 \text{ W/°C}$$

4.4. Diminuição do consumo pelo sistema de aquecimento auxiliar

Nesta fase do trabalho pretende-se conhecer as poupanças energéticas resultantes do pré-aquecimento do modelo através do pavimento maciço. Os hábitos e rotinas das populações podem variar bastante face a questões como a região, o dia, ou e até as condições meteorológicas. Embora existam longos períodos que verifiquem uma maior ocupação residencial, uma grande parte desse período é dedicado ao descanso. Por sua vez o intervalo entre as 17 e 23 horas, verifica considerável ocupação e atividade, fazendo deste o momento onde faz mais sentido o recurso à climatização (Hu et al., 2019). Este horário será então a referência, para a definição do intervalo de tempo (6 horas), durante a qual será mantida uma temperatura no interior do modelo entre 9°C a 11°C, acima da temperatura exterior. Serão realizados dois ensaios, com procedimentos específicos, um primeiro onde o aquecimento será efetuado durante 6 horas exclusivamente através da lâmpada. O segundo consistirá no pré-aquecido inicial através do pavimento maciço com resistência embutida, e de seguida será utilizada a lâmpada para manutenção da temperatura através da dissipação de calor diretamente para o ar por convecção. Ao longo destas horas foi necessário ligar e desligar a lâmpada por várias vezes, a fim de evitar que a temperatura interior deixasse o considerado intervalo de conforto.

4.4.1. Consumo sem pré-aquecimento do pavimento

Como referido anteriormente é considerado um ambiente de conforto, quando a temperatura interior se encontra entre 9°C a 11°C acima da temperatura exterior. No momento inicial em que se inicia o aquecimento não existe conforto sendo necessário alguns minutos até se atingir uma diferença de temperatura de 9°C, apenas nesse momento se começa a considerar as 6 horas de conforto.

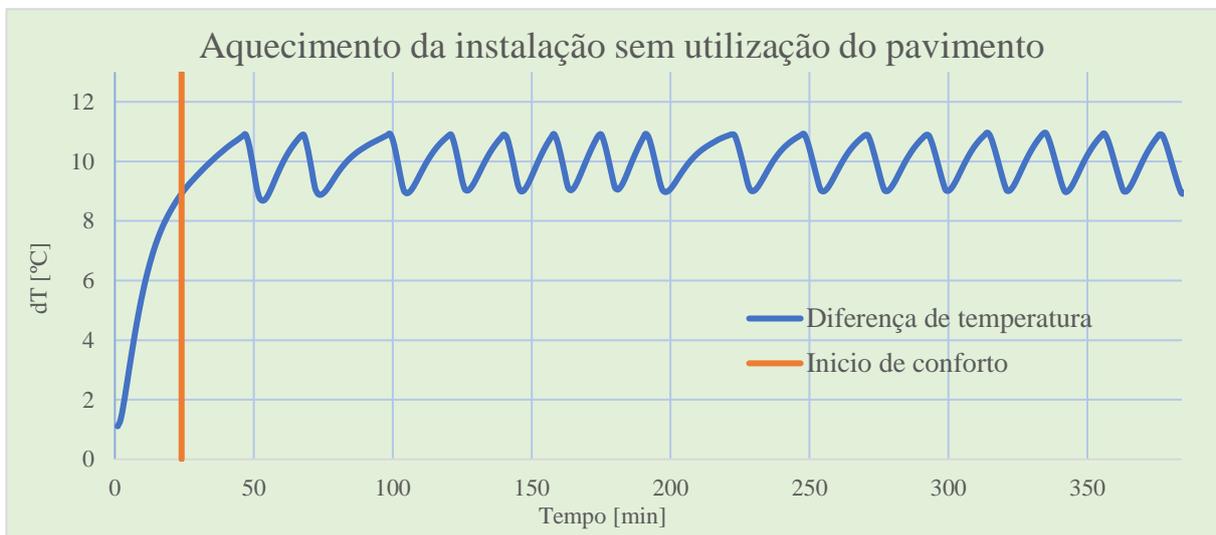


Figura 4.4: Imposição e manutenção de uma temperatura de conforto durante um período de 6 horas, com o recurso exclusivo ao sistema auxiliar de aquecimento (lâmpada).

Ao longo do tempo verificam-se algumas diferenças de comportamento nos ciclos de aquecimento, diminuindo o tempo necessário para se atingir determinada temperatura. Este facto é resultado da diminuição do efeito de inércia térmica de toda a estrutura do modelo, uma vez que a sua temperatura aumenta gradualmente. Posto isto a potência de aquecimento foi adaptada ao longo do tempo, de forma a diminuir a quantidade de ciclos de aquecimento. A elevação da temperatura para a zona conforto, e a sua manutenção durante 6 horas necessitou de um consumo de 163.3 Wh.

4.4.2. Consumo com pré-aquecimento do pavimento

De forma semelhante ao ensaio anterior foram utilizadas as mesmas condições de temperatura, tendo-se alterado apenas a forma como estas foram impostas. Face à considerável inércia do pavimento, após ser desligado o aquecimento do pavimento, a temperatura da instalação continua a aumentar, atingindo apenas o seu valor máximo momento depois. Perante esta situação e face à necessidade de colocar a instalação a determinada temperatura, foi importante entender como esta reage à aplicação do aquecimento. Através de vários ensaios anteriores verificou-se o aumento de temperatura existente para determinado intervalo de aquecimento, e realizou-se a regressão destes dados. Partindo desta regressão foi possível uma aproximação do tempo de aquecimento necessário, de forma a obter a temperatura desejada no interior da instalação.

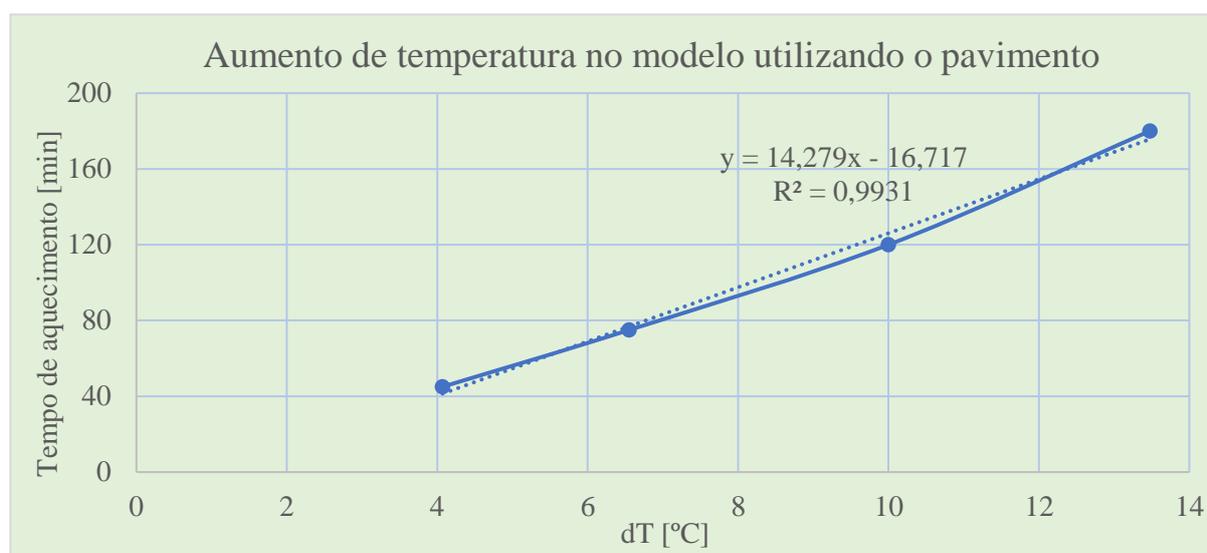


Figura 4.5: Intervalo de aplicação de aquecimento a uma potência de 89.7 W, para determinada variação de temperatura.

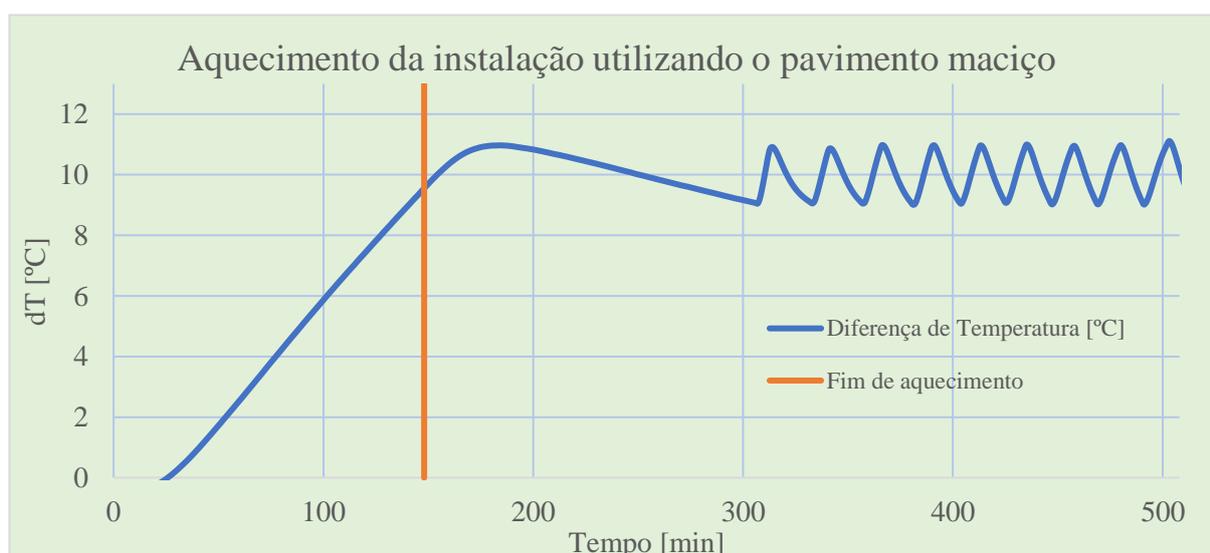


Figura 4.6: Imposição do intervalo de conforto através do pavimento com resistência embutida e manutenção da temperatura através da lâmpada.

Como se verifica pelos gráficos foi necessário manter o aquecimento durante cerca de 148 minutos até ser atingida uma diferença de temperatura de 11°C para o exterior. Ressalvar ainda que após ser desligado o aquecimento a temperatura interior aumentou cerca de 1.4 °C. Através da capacidade de armazenamento de calor por parte do pavimento, este foi capaz de manter a temperatura em zona de conforto durante quase 3 horas (159 minutos). Durante os 201 minutos seguintes até completar as 6 horas foi necessário recorrer de forma intermitente à lâmpada, para a manutenção da temperatura, o que resultou no consumo adicional de 30.8 Wh. A ideia neste caso seria realizar o pré-aquecimento do pavimento recorrendo a possíveis excedentes de energia, especialmente tendo em conta que estou levou a um consumo considerável de 221.3 Wh.

4.5. Capacidade de retenção de calor por parte do pavimento

Neste trabalho o objetivo da utilização da inércia térmica dos elementos não é necessariamente diminuir o consumo global de energia, mas sim como estas técnicas permitem aumentar a flexibilidade de consumo, aumentando a penetração das fontes renováveis na rede. A utilização do pavimento maciço permite realizar o consumo dedicado à climatização durante outros momentos do dia, com recurso, por exemplo, a micro geração. Face à possibilidade de não existir ocupação residencial durante o dia, surge a oportunidade de elevar a temperatura a níveis acima do intervalo de conforto. Através de um planeamento adequado, o sobreaquecimento poderá ser uma medida compensatória à inevitável perda de calor, até ao momento em que existe ocupação, e se pretende proporcionar conforto. De forma a analisar este cenário foram realizados alguns ensaios, permitindo a ultrapassar 2°C, 4°C e 6°C o considerado IC. Os dados obtidos foram então analisados no sentido de perceber como se dá o decaimento de temperatura até o IC, e durante quanto tempo esta se mantém no mesmo.

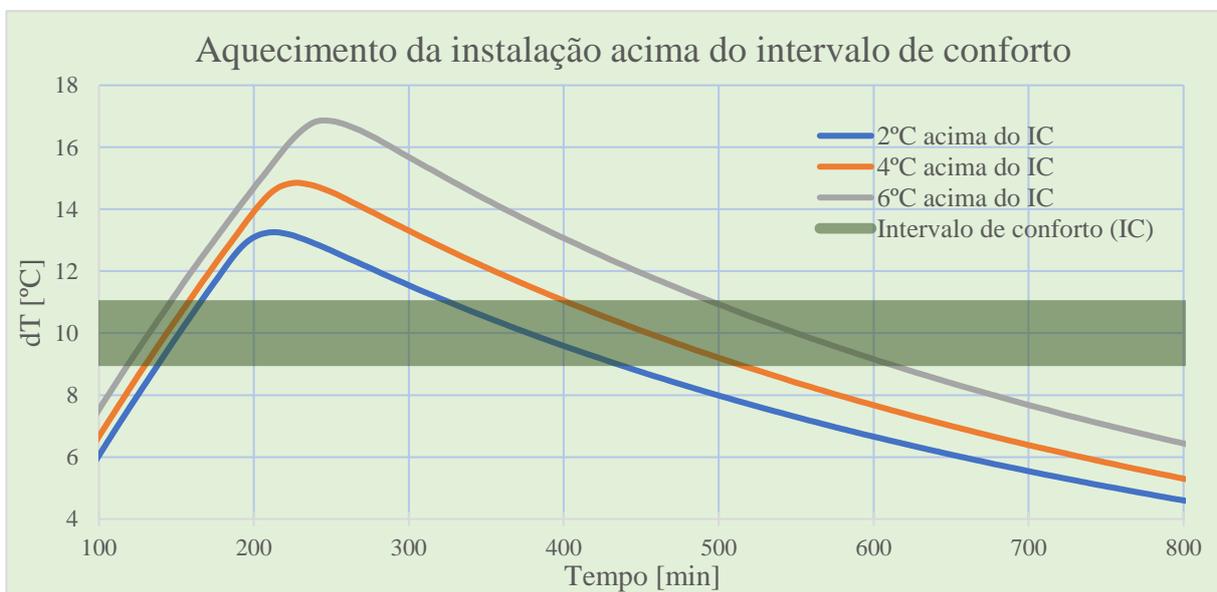


Figura 4.5: Imposição de temperaturas acima do intervalo de conforto, no sentido possuir temperaturas de conforto posteriormente.

Como seria expectável, quanto maior a elevação de temperatura, maior será o período até que esta retorne ao considerado intervalo de conforto. Especificamente no caso de se atingir uma temperatura 2°C acima do IC, será necessário decorrer cerca de 2 horas (114 minutos) até que se obtenha novamente um ambiente de conforto. Já para o caso em que se eleva a temperatura 6°C acima do IC, só será recomendada a ocupação ao fim de mais de 4 horas (252 minutos). Esta abordagem é importante no sentido de entender como realizar antecipadamente o aquecimento do pavimento, e evitar constrangimentos na utilização dos espaços, ao proporcionar um ambiente de desconforto por sobreaquecimento do espaço. A utilização deste tipo de aquecimento é indissociável de sistemas inteligentes de gestão de energia. Seja o consumo realizado com excedente de energia ou em momentos em que esta é mais barata, a sua gestão visa a minimização de custos.

Seria de esperar que quanto maior o aumento de temperatura aplicado, maior o intervalo de tempo em que a temperatura se mantém no interior do considerado intervalo de conforto, o que de facto se veio a verificar, embora de forma pouco significativa. Os casos testados mantiveram a temperatura no IC durante quase 2 horas (107, 109 e 113 minutos), sendo que após este período será certamente mais recomendável a utilização de um sistema de aquecimento convencional.

5. Método numérico

5.1. Introdução ao modelo 2R2C

Esta fase consistia na aplicação de um modelo RC, previamente desenvolvido em código Matlab, no estudo das propriedades termofísicas do conjunto pavimento e envolvente que se tem vindo a estudar. Os modelos RC são uma boa aproximação ao comportamento térmico de edifícios, existindo vários modelos que apresentam diferentes níveis de detalhe. Cada modelo apresenta certas especificidades que os torna mais apropriados para determinadas condições ou escalas temporais.

Para este caso recorreu-se a um modelo 2R2C, ou seja, composto por duas resistências e duas capacitâncias. Para o funcionamento do modelo são necessários alguns *inputs* obtidos experimentalmente, e que são fornecidos através de um ficheiro csv. Estes *inputs* são nomeadamente valores registados ao minuto das temperaturas exteriores e interiores, a temperatura da massa interior exposta, e ainda a potência de funcionamento da fonte de calor. De forma bastante simplificada a função do modelo é tentar encontrar os valores das resistências e das capacitâncias, que melhor se ajustam numericamente aos dados obtidos experimentalmente.

Um elemento ao qual é conveniente prestar especial atenção, é a fonte de calor (Φ_H), que usualmente debita calor diretamente no ar interior, sendo este cenário para o qual o modelo se adequava. No entanto essa não é a situação existente neste trabalho, uma vez que a resistência elétrica se encontra no interior do pavimento, existindo assim resistência térmica entre a fonte de calor e o ar interior. Tendo isto em consideração foi necessário perceber que correções seria necessário tomar, no sentido de adaptar o modelo às circunstâncias deste trabalho.

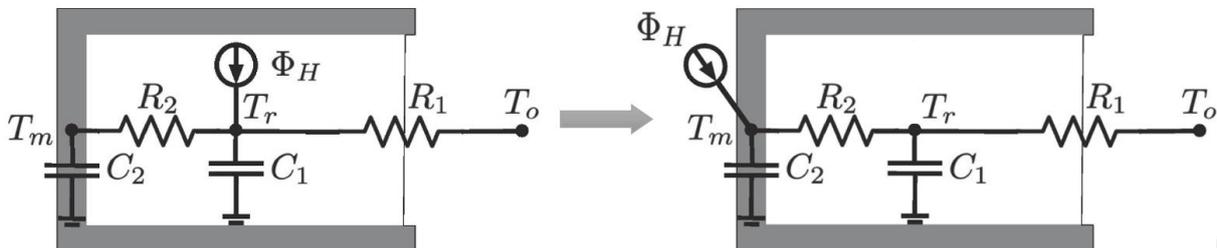


Figura 5.1: Esquema da rede de calor referente ao modelo RC utilizado para a modelação. O esquema da esquerda é referente um sistema de convencional onde a climatização é realizada diretamente com o espaço interior. O esquema da direita trata-se da adaptação realizada para este trabalho, onde o aquecimento é realizado no interior do pavimento.

Na figura anterior encontram-se esquematizada toda a rede térmica considerada pelo modelo 2R2C, e ainda a alteração realizada para este trabalho. A fonte de calor (Φ_H) que se encontrava inicialmente ligado ao nódulo de temperatura do ar interior (T_r), foi realocada ligando-se agora ao nódulo de temperatura da massa térmica exposta (T_m). Estão ainda presentes os já mencionados elementos capacitivos (C_1 , C_2), que apresentam a capacidade de reter calor, e ainda os elementos resistivos (R_1 , R_2), representando a resistência ao fluxo de calor.

- C_1 ($J/^\circ C$) é a capacidade de retenção do calor a curto prazo por parte do ar, ou até de outros elementos leves presentes. Neste caso a “divisão” encontra-se vazia, pelo que será considerado exclusivamente a massa de ar existente.
- C_2 ($J/^\circ C$) representa a elevada capacidade de retenção de calor para uma maior escala temporal, por parte de grandes massas como a própria estrutura dos edifícios. O pavimento de elevada massa é nesta situação o elemento de elevada massa capaz de reter maiores quantidades calor durante um maior intervalo de tempo.

- R_1 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) é a resistência térmica existente entre o ar ambiente interior (T_r), e o exterior (T_0). Este elemento inclui simultaneamente as trocas de calor por transmissão e ventilação.
- R_2 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) é a resistência térmica entre o ar ambiente interior (T_r), e a massa térmica interna exposta (T_m).

5.1.1. Equações do modelo

A temperatura exterior é obtida experimentalmente e faz parte dos inputs do modelo. Já as temperaturas nos nódulos T_r e T_m podem de ser descritas através das seguintes equações:

$$C_1 \frac{dT_r}{dt} = \frac{T_0 - T_r}{R_1} + \frac{T_m - T_r}{R_2} \quad (5.1)$$

$$C_2 \frac{dT_m}{dt} = \frac{T_r - T_m}{R_2} + \Phi_H \quad (5.2)$$

Uma vez que $R_{eq} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$, as equações anteriores podem tomar a seguinte forma:

$$R_{eq} C_1 \frac{dT_r}{dt} = R_2^* (T_0 - T_r) + R_1^* (T_m - T_r) \quad (5.3)$$

$$R_2 C_2 \frac{dT_m}{dt} = T_r - T_m + R_2 \Phi_H \quad (5.4)$$

Os termos $R_{eq} C_1$ e $R_2 C_2$ são parâmetros de tempo (em segundos) de curto e longo termo, τ_1 e τ_2 respetivamente. As resistências térmicas adimensionais são $R_1^* = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$, $R_2^* = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$, pelo que $R_2^* = 1 - R_1^*$.

$$\tau_1 \frac{dT_r}{dt} = R_2^* (T_0 - T_r) + R_1^* (T_m - T_r) \quad (5.5)$$

$$\tau_2 \frac{dT_m}{dt} = T_r - T_m + R_2 \Phi_H \quad (5.6)$$

Apresentando quatro parâmetros RC independentes, as seguintes equações serão resolvidas numericamente.

$$\tau_1 \frac{dT_r}{dt} = (1 - R_1^*) (T_0 - T_r) + R_1^* (T_m - T_r) \quad (5.7)$$

$$\tau_2 \frac{dT_m}{dt} = T_r - T_m + R_2 \Phi_H \quad (5.8)$$

Para resolver estas equações recorreu-se ao método de Cranck-Nicolson.

$$\left(\frac{\tau_1}{\Delta t} + \frac{1}{2}\right) T_r^{t+1} - \frac{R_1^*}{2} T_m^{t+1} = \left(\frac{\tau_1}{\Delta t} - \frac{1}{2}\right) T_r^t + \frac{R_1^*}{2} T_m^t + (1 - R_1^*) T_0^t \quad (5.10)$$

$$-\frac{1}{2} T_r^{t+1} + \left(\frac{\tau_2}{\Delta t} + \frac{1}{2}\right) T_m^{t+1} = \frac{1}{2} T_r^t + \left(\frac{\tau_2}{\Delta t} - \frac{1}{2}\right) T_m^t + R_2 \Phi_H^t \quad (5.11)$$

Colocando as equações sobre a forma de matriz, obtém-se:

$$\Theta^{t+1} = A^{-1} B \Theta^t + A^{-1} S^t \quad (5.12)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} T_r \\ T_m \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

$$A = \begin{bmatrix} \tau_1^* + 0.5 & -0.5 R_1^* \\ -0.5 & \tau_2^* + 0.5 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

$$B = \begin{bmatrix} \tau_1^* - 0.5 & 0.5 R_1^* \\ 0.5 & \tau_2^* - 0.5 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

$$S = \begin{bmatrix} (1 - R_1^*) T_0 \\ R_2 \Phi_H \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

5.1.2. Aplicação do modelo

O objetivo da utilização deste modelo é descobrir o valor de uma série de variáveis, que numericamente melhor se ajustam aos valores obtidos experimentalmente. Os ensaios experimentais utilizadas nesta fase foram recolhidas de diferentes formas, parte deles foram obtidos aplicando o aquecimento durante determinado intervalo de tempo, nomeadamente durante 45, 75 e 120 minutos. Os restantes testes consistiram na aplicação do aquecimento de forma a atingir uma temperatura 13, 15 e 17°C acima da temperatura exterior. As amostras utilizadas na simulação apresentam um intervalo de valores até ao decaimento de 80% da temperatura após atingido o pico. Estes dados são inputs necessários ao funcionamento do modelo, e são fornecidos através de um ficheiro csv. Os valores experimentais são dispostos no ficheiro em quatro colunas, sendo cada uma delas destina a um tipo de dados diferente.

- Na 1ª coluna são colocados os valores da temperatura interior, registados na zona central da divisão;
- Na 2ª coluna são dispostos os valores de temperatura da massa interior exposta, registada à superfície do pavimento;
- Na 3ª coluna é colocada a potência de aquecimento aplicada a cada momento;
- Na 4ª coluna encontram-se os valores da temperatura ambiente, registados no exterior da caixa;

Nas equações anteriores as expressões τ_1^* , $1 - R_1^*$, τ_2^* e R_2 presentes nas matrizes, encontram-se representadas no código Matlab pelas variáveis x_1 , x_2 , x_3 e x_4 respetivamente. Num primeiro momento o modelo realiza a melhor aproximação possível a estas variáveis, utilizando-as de seguida no cálculo das resistências e capacitâncias, pelas seguintes equações:

$$R_1 = x_4 * (1 - x_2)/x_2 \quad (5.17)$$

$$R_2 = x_4 \quad (5.18)$$

$$C_1 = x_1 * \frac{\text{Delta}T * 1000}{R_{ast}} \quad (5.19)$$

$$C_2 = x_3 * \frac{\text{Delta}T * 1000}{R_2} \quad (5.20)$$

$$R_{ast} = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.21)$$

5.1.3. Simulações realizadas

O código utilizado permite o controlo das simulações realizadas, através da definição dos intervalos de valores possíveis de serem tomados pelas variáveis x_1 , x_2 , x_3 e x_4 . Face a esta possibilidade foram realizadas simulações utilizando diferentes metodologias.

- Na 1ª fase de simulações foi concedida liberdade total às variáveis, no sentido de que os resultados das simulações se aproximassem o mais possível dos valores experimentais. De facto, essa proximidade foi conseguida, no entanto não existia coerência entre simulações, e os resultados obtidos não eram fisicamente credíveis.
- Na 2ª fase foram adotadas medidas no sentido de evitar os problemas anteriores, realizando as simulações condicionando algumas variáveis. Estas foram definidas utilizando com valores conhecidos, ou intervalos de valores com considerável grau de confiança.

5.2. Simulação livre do modelo

Na primeira abordagem à simulação, com o intuito de atribuir um elevado nível de liberdade ao modelo, não foi colocada qualquer condicionante às variáveis, pelo que estas podiam tomar qualquer valor entre zero e infinito. Isto permitiria à partida uma melhor aproximação dos valores do modelo aos valores obtidos experimentalmente. No quadro seguinte é possível observar os resultados obtidos nestas condições, para várias amostras experimentais.

Tabela 5.1: Resultados da simulação através do modelo 2R2C, sem qualquer condicionamento das variáveis.

	C_1 [KJ/°C]	C_2 [KJ/°C]	R_1 [°C/W]	R_2 [°C/W]	RMSE [°C]	x1	x2	x3	x4
45 min	24,78	1,48	0,653	0,508	0,0593	118,0	0,437	12,51	0,508
75 min	0,846	4,1	0,732	3,732	0,0674	8,63	0,836	254,8	3,732
120 min	0,995	0,043	0,640	416,8	0,0619	10,60	0,998	298,9	416,8
+13°C	0,895	30,57	0,615	0,024	0,6562	0,341	0,037	12,1	0,024
+15°C	16,54	12,44	0,587	0,107	0,1274	24,94	0,154	22,18	0,107
+17°C	29,73	0,046	0,601	14,38	0,1177	285,9	0,960	11,14	14,38

Analisando estes dados verifica-se facilmente a falta de consistência dos resultados. Todas as variáveis que descrevem fisicamente a divisão, apresentam valores bastante díspares entre amostras, o que não permite realizar uma descrição concreta relativamente à mesma. Exceção no parâmetro R_1 , este demonstra desde logo alguma solidez nos resultados obtidos, neste caso para além dos valores bastante próximos entre amostras, estes vão ao encontro do valor calculado experimentalmente no capítulo 4.3. No caso da capacitância C_1 , que tendencialmente mede a capacidade do ar em reter calor, os valores mais elevados são claramente impossíveis. De forma semelhante o mesmo acontece com C_2 , que apresenta valores extremamente baixos, tendo em conta que este indica a capacidade do pavimento em armazenar calor. Na maior parte dos casos C_1 apresenta-se maior do que C_2 o que não faz qualquer sentido. A resistência R_2 , tendo em conta as dimensões do pavimento, e que se trata da resistência entre o ar interior e a massa interior exposta, apresenta também valores desconexos. Se é difícil encontrar um padrão nos parâmetros que caracterizam fisicamente a divisão, o cenário é semelhante relativamente às variáveis iniciais.

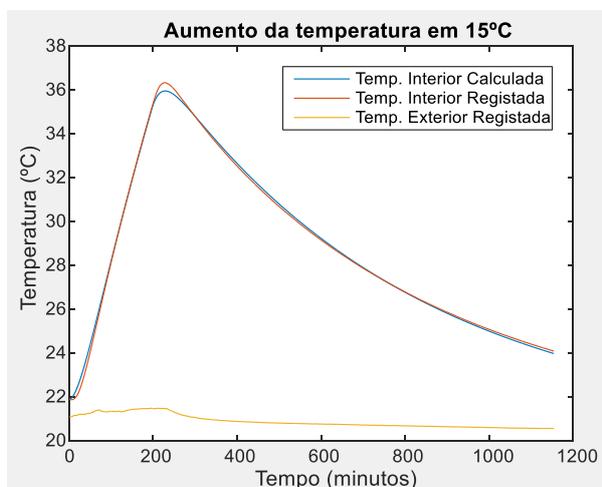


Figura 5.2: Gráfico resultante da simulação sem condicionamento de variáveis do ensaio para o ensaio em que se é imposto um aumento de temperatura de 15°C.

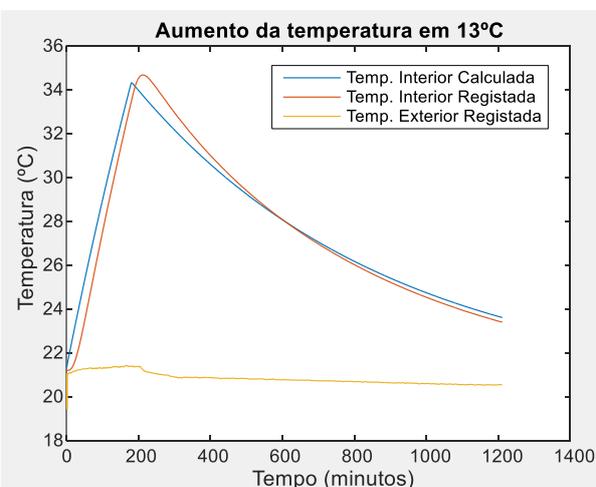


Figura 5.3: Gráfico resultante da simulação sem condicionamento de variáveis, para o ensaio em que se é imposto um aumento de temperatura de 13°C.

Com exceção do caso em que se realizou um aumento de temperatura de 13°C , o modelo apresentou capacidade de calcular perfis de temperatura bastante próximos dos experimentais fornecidos. As simulações realizadas apresentam gráficos bastante semelhantes ao gráfico esquerdo, onde as temperaturas calculadas e as experimentais são coincidentes ao longo da amostra, com exceção de alguns momentos como os picos de temperatura. No caso da amostra do aumento de 13°C , embora a aproximação das temperaturas não seja tão perfeita, esta apresenta uma forma bastante próxima da verificada experimentalmente. O parâmetro *root mean square error* (RMSE) presente no quadro anterior, confirma o desvio dos resultados obtidos relativamente ao que era expectável. Sendo que para esta último caso o valor do RMSE é maior em relação aos restantes. Se é difícil encontrar um padrão nos parâmetros que caracterizam a divisão, o cenário piora relativamente às variáveis iniciais. É notório que alguns dos resultados são claramente absurdos, como efeito do elevado grau de liberdade da simulação. O modelo tem a capacidade de encontrar valores que numericamente se adequam bastante aos dados experimentais, mas que estão fisicamente errados.

5.3. Simulação com condicionamento de variáveis

Devido ao elevado grau de liberdade atribuído ao modelo, não foi possível retirar conclusões relativamente às características da divisão, com exceção da resistência R_1 , que apresentou valores consistentes e ao encontro do esperado. Perante isto procurou-se criar vias que permitam obter valores mais conclusivos, nomeadamente condicionando ou definindo as variáveis iniciais. O facto de alguns valores serem visivelmente desprovidos de sentido físico, deve-se à possibilidade de realizar uma aproximação razoável destes, e de forma relativamente simples. Estas aproximações revelam-se assim essenciais para definição das variáveis como é o caso da resistência R_2 .

5.3.1. Definição do intervalo de valores da resistência R_2

A tentativa de definir R_2 é um bom ponto de partida tendo em conta que pela equação 5.18, esta não está dependente de outros parâmetros ou variáveis, uma vez que assume o valor da variável x_4 . Importa relembrar que R_2 representa a resistência térmica existente entre os nódulos de temperatura da massa interior exposta e a temperatura interior. Calcular o valor exato desta é algo complexo, no entanto é possível acertar um intervalo de valores com alguma segurança, sendo para isso necessário dividir R_2 em duas resistências.

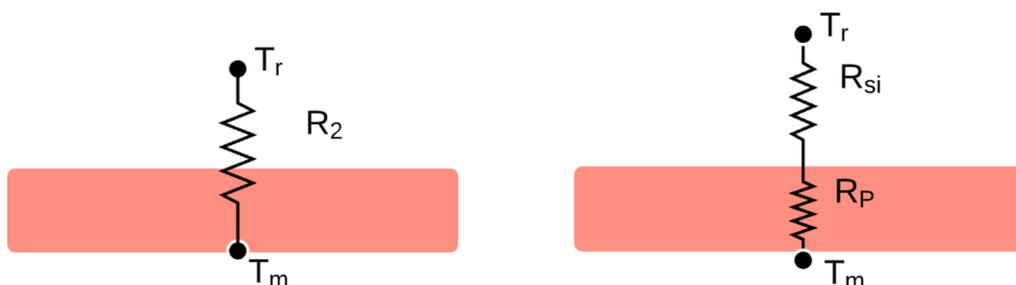


Figura 5.4: Discriminação das resistências constituintes da resistência R_2 ; R_{si} é a resistência superficial entre o pavimento e o ar, sendo R_p a resistência do próprio pavimento.

Esta divisão da resistência assume uma certa relevância, pois a resistência superficial térmica (R_{si}) estará inevitavelmente sempre presente, podendo este ser considerado o valor mínimo a atribuir a R_2 . Relativamente à resistência do pavimento (R_p) a questão poderá não ser assim tão simples, uma vez que T_m é temperatura média de toda a massa do pavimento, não se encontrando necessariamente esse nodo de temperatura na sua base. Apesar de essa situação provavelmente não se verificar, a espessura total do pavimento será considerada no valor da resistência térmica máxima que R_2 poderá tomar. Assim sendo serão realizadas simulações atribuindo a R_2 , o valor da resistência R_{si} como o valor mínimo, e a soma das resistências R_{si} e R_p como valor máximo.

Sabendo que a resistência superficial térmica num plano horizontal interior e com fluxo ascendente (R''_{si}) é aproximadamente $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$ e a área do pavimento (A) 0.442 m^2 , é possível calcular a resistência superficial do pavimento.

$$R_{si} = \frac{R''_{si}}{A} \quad (5.22)$$

$$R_{si} = \frac{0.1}{0.442} = 0.226 \text{ °C}/\text{W}$$

Uma vez que o pavimento apresenta uma espessura (L) de 6 cm, e sendo a sua construção à base de tijolo de burro considerou-se uma condutividade térmica (k) de $0.666 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{°C}$, calculou-se a resistência térmica do pavimento (R_p).

$$R_p = \frac{L}{kA} \quad (5.23)$$

$$R_p = \frac{0.06}{0.666 * 0.442} = 0.204 \text{ °C}/\text{W}$$

$$R_p + R_{si} = 0.226 + 0.204 = 0.43 \text{ °C}/\text{W}$$

Assim sendo a resistencia R_2 tomará certamente um valor entre entre $0.204 \text{ °C}/\text{W}$ e $0.43 \text{ °C}/\text{W}$, sendo estes extremos utilizados nas simulações.

5.3.1.1. Resultados da definição do valor R_2 Tabela 5.2: Resultados da simulação modelo atribuído os valores de 0,226 e 0,43 °C/W a R_2

	$R_2=0,226$ [°C/W]				$R_2=0,43$ [°C/W]			
	C_1 [KJ/°C]	C_2 [KJ/°C]	R_1 [°C/W]	R_2 [°C/W]	C_1 [KJ/°C]	C_2 [KJ/°C]	R_1 [°C/W]	R_2 [°C/W]
45 min	22,7	3,67	0,648	0,226	24,5	1,77	0,652	0,430
75 min	23,3	3,41	0,641	0,226	25,0	1,65	0,645	0,430
120 min	24,6	3,38	0,615	0,226	26,3	1,65	0,616	0,430
+13°C	5,42	18,9	0,590	0,226	28,2	1,84	0,588	0,430
+15°C	26,1	3,67	0,588	0,226	28,0	1,79	0,588	0,430
+17°C	26,3	3,39	0,600	0,226	28,1	1,66	0,601	0,430

É evidente que a definição do valor de R_2 limitou os restantes valores, principalmente comparando com a livre simulação do modelo. Com exceção de um caso, verifica-se bastante concordância entre os valores das capacitâncias, no entanto tendo em conta as características da “divisão” entende-se facilmente que estes valores não fazem sentido. Um dos indicativos mais claros nesse sentido é facto de o valor de C_1 ser bastante superior ao de C_2 , quando na verdade é o contrário que se verifica. O pavimento massivo face às suas características possui elevada capacidade de retenção de calor, no entanto isso não se reflete nos resultados, já o termo da capacidade de retenção de calor por parte de elementos leves apresenta-se bastante elevado. No sentido de se obter resultados mais conclusivos foram colocadas novamente restrições às variáveis.

5.3.2. Aproximação ao valor de C_1

Ao contrário do que acontecia com o caso anterior, C_1 não está dependente unicamente de uma variável, ainda assim é possível atribuir um valor a este. O parâmetro C_1 contabiliza a capacidade de retenção de pequenas quantidades calor por parte do ar ou outros elementos leves presentes. Neste caso específico não existindo elementos relevantes no interior da “divisão”, será contabilizado exclusivamente a massa de ar para o cálculo de C_1 . No entanto a incerteza do valor atribuído a esta variável é bastante elevada, outros elementos como a envolvente, ainda que apenas a camada interior mais superficial, apresentam capacidade de reter calor. A importância deste procedimento deve-se não tanto a conhecer o valor de C_1 , mas sim a forçar a simulação numa gama de valores admissíveis para as restantes variáveis.

Tendo em conta as dimensões da “divisão”, existe um volume de ar (V) de 0.235 m^3 , sendo a massa volúmica do ar (ρ) 1.23 kg/m^3 e a sua capacidade térmica mássica (C_p) $1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, é possível calcular C_1 .

$$C_1 = V * \rho * C_p \quad (5.24)$$

$$C_1 = 0.235 * 1.23 * 1000 = 287.5 \text{ J/}^\circ\text{C} = 0.288 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

Como se pode verificar pela equação 5.19, atribuir um determinado valor C_1 , não será tão direto como o caso de R_2 . Neste caso C_1 está depende de várias variáveis como é o caso de R_{ast} , a qual resulta pela equação 5.21 do cálculo das resistências R_1 e R_2 em paralelo. Desta forma utilizando valores de referência de R_1 obtidos experimentalmente ou através de simulação, e através dos valores de R_2 obtidos anteriormente é possível calcular R_{ast} . A outra variável presente é x_1 , que é calculada em função do valor de C_1 , da seguinte forma:

$$x_1 = \frac{C_1 * R_{ast}}{\Delta T * 1000} \quad (5.25)$$

5.3.3. Resultados

Esta série de simulações foi assim realizada permitindo a total liberdade às variáveis x_2 e x_3 , já às variáveis x_1 e x_4 foram atribuídos valores de 0.801 e 0.226 respetivamente.

Tabela 5.3: Resultados da simulação através do modelo 2R2C, com condicionamento de variáveis ($x_1=0.801$; $x_4=0.226$).

	C_1 [KJ/°C]	C_2 [KJ/°C]	R_1 [°C/W]	R_2 [°C/W]	RMSE [°C]	x_1	x_2	x_3	x_4
45 min	0,286	23,20	0,653	0,226	0,3249	0,801	0,257	87,39	0,226
75 min	0,287	22,43	0,650	0,226	0,4307	0,801	0,258	84,48	0,226
120 min	0,287	22,49	0,645	0,226	0,5297	0,801	0,259	84,72	0,226
+13°C	0,290	23,69	0,623	0,226	0,6371	0,801	0,266	89,23	0,226
+15°C	0,289	23,41	0,626	0,226	0,6386	0,801	0,265	88,20	0,226
+17°C	0,289	23,04	0,628	0,226	0,5885	0,801	0,265	86,80	0,226

Verifica-se que as simulações realizadas nas condições em que R_2 toma o valor mínimo, o pavimento apresenta a capacidade de reter calor até 23.69 kJ/°C. O valor de RMSE regista um aumento bastante significativo em relação às simulações sem condicionamento de variáveis. O que confirma desde já que as temperaturas interiores registadas experimentalmente e as calculadas através da simulação não serão tão coincidentes como se verificava anteriormente. É exceção a amostra em que se aumentou a temperatura em 13°C, aqui verificou-se de forma inesperada que o condicionamento das variáveis resultou numa ligeira diminuição do RMSE relativamente à simulação livre das mesmas.

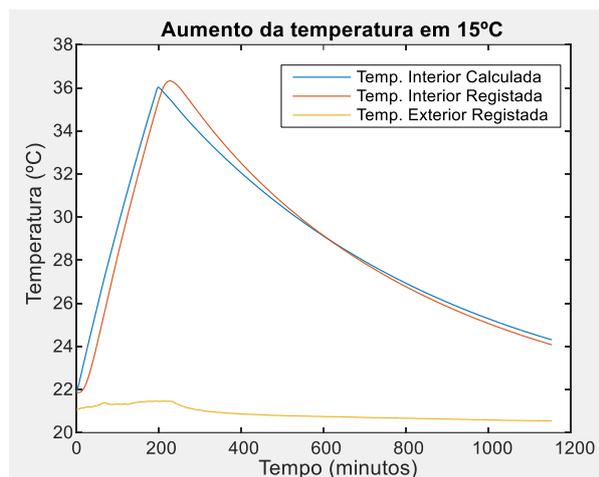


Figura 5.5: Gráfico resultante da simulação com condicionamento de variáveis ($x_1=0.801$; $x_4=0.226$), para o ensaio em que se é imposto um aumento de temperatura de

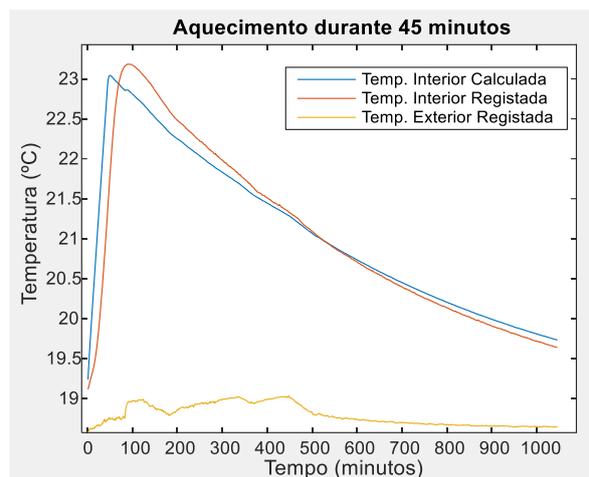


Figura 5.6: Gráfico resultante da simulação com condicionamento de variáveis ($x_1=0.801$; $x_4=0.226$), para o ensaio em que se aplicou o aquecimento durante 45

Para o caso em que R_2 toma o valor máximo de 0.43, x_1 por consequência altera também o seu valor para 1.23, sendo que as restantes variáveis continuam com liberdade total.

Tabela 5.4: Resultados da simulação através do modelo 2R2C, com condicionamento de variáveis ($x_1=1.23$; $x_4=0.43$).

	C_1 [KJ/°C]	C_2 [KJ/°C]	R_1 [°C/W]	R_2 [°C/W]	RMSE [°C]	x_1	x_2	x_3	x_4
45 min	0,282	18,57	0,672	0,430	0,2980	1,23	0,390	133,1	0,430
75 min	0,282	17,81	0,674	0,430	0,3860	1,23	0,390	127,6	0,430
120 min	0,286	18,17	0,649	0,430	0,4998	1,23	0,399	130,2	0,430
+13°C	0,290	19,12	0,628	0,430	0,6176	1,23	0,407	137,0	0,430
+15°C	0,289	18,84	0,633	0,430	0,5998	1,23	0,405	135,0	0,430
+17°C	0,288	18,44	0,637	0,430	0,5264	1,23	0,403	132,1	0,430

É assim claro que o aumento da resistência R_2 resulta na diminuição do valor de C_2 , que regista como menor valor uma retenção de calor de 17.81 kJ/°C. Nestas condições deu-se uma ligeira subida de R_1 , e diminuição de RMSE, o que neste último revela uma maior aproximação aos dados experimentais.

À semelhança do exercício realizado para o parâmetro C_1 o mesmo cálculo será utilizado para uma aproximação ao valor de C_2 . Neste momento pretende-se realizar uma avaliação ao valor de C_2 obtido através de simulação comparado com o valor obtido analiticamente com base nas características físicas do pavimento. Este parâmetro contabiliza a capacidade de retenção de calor por parte do pavimento com um volume próximo de 0.0265 m³, constituído maioritariamente por tijolo de burro, e por uma pequena porção de argamassa. Para o cálculo de C_2 será utilizada novamente a expressão 5.24, considerando o pavimento constituído exclusivamente por tijolo de burro com uma massa volúmica de 1970 Kg/m³ e uma capacidade térmica mássica de 837.2 J/Kg°C.

$$C_2 = 0.0265 * 1970 * 837.2 = 43706.0 \text{ J/°C} = 43.706 \text{ KJ/°C}$$

Os valores de C_2 obtidos através do modelo RC são cerca de metade do valor obtido analiticamente. Embora seja uma diferença significativa estes encontram-se na mesma escala de valores, o que fornece alguma confiança aos resultados do modelo.

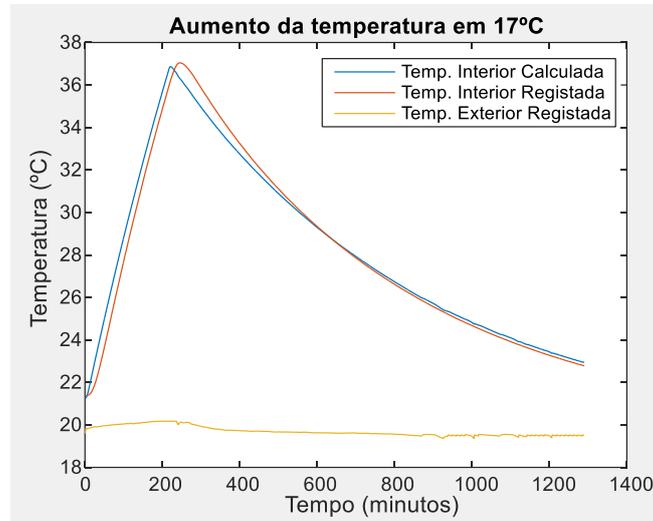


Figura 5.7: Gráfico resultante da simulação com condicionamento de variáveis ($x1=1.23$; $x4=0.43$), para o ensaio em que se é imposto um aumento de temperatura de 17°C .

5.4. Perdas de calor

Uma vez que a fonte de calor se encontra embutida na base do pavimento, a aplicação de aquecimento levará naturalmente a um aumento de temperatura nessa mesma zona, e à dispersão de calor. Apesar de o material isolante que se encontra inferiormente apresentar uma condutividade térmica bastante mais baixa, com o aumento da temperatura do pavimento e do gradiente, é possível que se verifiquem perdas de calor pelas camadas inferiores ao pavimento. Por estas razões foram realizados alguns estudos no sentido de aferir se realmente as perdas de calor são significativas. Um desses mesmos estudos foi verificar a variação de temperatura do pavimento tendo em conta a sua massa, e comparar com o consumo realizado pela fonte de calor. Apresentando o pavimento uma massa (m) de 52.24 kg, e o possuindo o tijolo de burro um calor específico (c) de $837 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$, calcula-se a capacidade térmica mássica (C) total do pavimento.

$$C = m * c \quad (5.26)$$

$$C = 52.24 * 837 = 43728.56 \text{ J/}^{\circ}\text{C}$$

A variação de temperatura verificada no pavimento permite assim realizar uma aproximação da energia mínima absorvida sob a forma de calor por parte do mesmo.

$$\text{Energia Mínima Absorvida} = C * \Delta T \quad (5.27)$$

A comparação desta retenção de calor com o consumo realizado pela fonte de calor, e ainda tendo em conta as condições presentes, permite uma primeira abordagem no sentido de perceber se existem perdas de calor significativas.

$$Energia Consumida = \Phi_H * t \quad (5.28)$$

$$\% Energia M\u00ednima Absorvida = \frac{Energia M\u00ednima Absorvida}{Energia Consumida} \quad (5.29)$$

Tabela 5.5: O consumo de energia realizado, e calor armazenado pelo pavimento tendo em conta a sua varia\u00e7\u00e3o de temperatura.

	45 min	75 min	120 min	+13°C	+15°C	+17°C
Varia\u00e7\u00e3o de Temperatura [°C]	4,9	7,9	12,5	16,8	18,1	19,2
Energia M\u00ednima Armazenado [kJ]	215,0	346,9	547,5	736,8	789,5	841,3
Consumo de Energia [kJ]	243	405	648	972	1063,8	1177,2
% Energia M\u00ednima Absorvida	88,5	85,6	84,5	75,8	74,2	71,5

Desta forma tendo em conta a varia\u00e7\u00e3o de temperatura verificada no pavimento, a percentagem de energia m\u00ednima absorvida pelo mesmo \u00e9 consider\u00e1vel, no entanto estima-se que este valor seja superior por v\u00e1rias raz\u00f5es. Uma dessas raz\u00f5es \u00e9 o facto de a temperatura ser registada \u00e0 superf\u00edcie do pavimento em contacto com o ar a uma temperatura inferior, quando a varia\u00e7\u00e3o global da temperatura do pavimento ser\u00e1 certamente superior. \u00c9 necess\u00e1rio ter ainda em conta, que desde o in\u00edcio do aquecimento at\u00e9 ao momento em que se regista a temperatura m\u00e1xima existe inevitavelmente dispers\u00e3o de calor por parte do pavimento, que n\u00e3o ser\u00e1 contabilizado.

Foram ainda realizadas simula\u00e7\u00f5es considerando a perda de 10% do calor, no sentido de perceber que interfer\u00eancia essas perdas teriam nos resultados. Estas altera\u00e7\u00f5es resultaram assim na descida do valor da capacit\u00e2ncia C_2 e um aumento consider\u00e1vel da resist\u00eancia R_1 . Ao longo das v\u00e1rias simula\u00e7\u00f5es realizadas e at\u00e9 mesmo na componente pr\u00e1tica, R_1 apresentou sempre bastante proximidade de resultados. Tendo isto em conta, o consider\u00e1vel aumento de R_1 para uma perda de calor de apenas 10%, \u00e9 indicador de que a dispers\u00e3o de calor pelas camadas abaixo do pavimento ser\u00e1 m\u00ednima.

Tabela 5.6: Resultados da simula\u00e7\u00e3o, considerando perdas de calor de 10%

90%	$R_2=0,226$ [°C/W]				$R_2=0,43$ [°C/W]			
	C_1 [KJ/°C]	C_2 [KJ/°C]	R_1 [°C/W]	R_2 [°C/W]	C_1 [KJ/°C]	C_2 [KJ/°C]	R_1 [°C/W]	R_2 [°C/W]
45 min	0,287	21,45	0,723	0,226	0,281	17,40	0,743	0,430
75 min	0,288	20,77	0,718	0,226	0,281	16,71	0,744	0,430
120 min	0,288	20,76	0,716	0,226	0,281	16,71	0,744	0,430
+13°C	0,288	20,76	0,716	0,226	0,288	17,91	0,696	0,430
+15°C	0,290	21,63	0,694	0,226	0,287	17,65	0,701	0,430
+17°C	0,290	21,31	0,696	0,226	0,287	17,29	0,706	0,430

6. Conclusão

Com este trabalho pretendia-se verificar se seria possível beneficiar da inércia térmica dos edifícios para armazenamento de calor, aumentando a flexibilidade do consumo dedicado à climatização. O estudo foi realizado utilizando dois componentes fundamentais, o pavimento de elevada massa e a estrutura envolvente, ambos concebidos utilizando técnicas rudimentares bastante longe das exigências atuais. É importante ter noção da relação das dimensões entre a divisão que apresenta um volume de 0.24 m³, e o pavimento com um volume próximo de 0.027 m³ e uma massa de 52 kg. Este é um tipo de sistema pouco desenvolvido que visa o futuro, apresentando característica que o diferem do piso radiante mais comum, pelo que requer algum estudo no sentido de maximizar as suas potencialidades. Ao contrário do que foi realizado neste trabalho é essencial que os pavimentos sejam cuidadosamente dimensionados, apresentando proporções adequadas à situação, e recorrendo a materiais com características físicas apropriadas a este tipo de aplicações. Neste caso foi utilizada uma resistência para o aquecimento, no entanto a tendência é a utilização de sistemas de climatização mais eficientes, como as bombas de calor. O rendimento conseguido através deste tipo sistemas, varia em função das condições em que são utilizadas, o que permitiria recorrer a diferentes estratégias de aquecimento do pavimento.

O estudo realizado nestas condições permitiu observar de forma explícita o efeito da inercia térmica do pavimento, nomeadamente a nível do aquecimento inicial e no lento decaimento da temperatura. Os dados laboratoriais revelam que a imposição inicial de uma diferença de temperatura através do aquecimento direto do espaço, requer apenas 14% da energia exigida pelo aquecimento através do pavimento. Posteriormente o consumo de energia para a manutenção da temperatura durante 6 horas, após o aquecimento do espaço através do pavimento, é cerca de 24% menor relativamente ao caso em que o aquecimento é aplicado diretamente no espaço interior. Neste cenário a aplicação de aquecimento no pavimento resultou num consumo global de energia 57% superior face a um sistema convencional. No entanto cerca de 88% desse consumo resulta do aquecimento inicial, o qual apresenta flexibilidade, e se pretende que seja alimentado por excedente renovável, ou de forma mais sustentável.

Uma outra abordagem pensada e testada foi a possibilidade de se atingir temperaturas acima da temperatura de conforto, em momentos sem ocupação do espaço. Deste modo seria obtida uma excessiva retenção de calor, no sentido compensar as perdas existentes até aos momentos de ocupação, nas quais se pretende efetivamente apresentar um ambiente de conforto. Para este caso verificou-se que a colocação da temperatura 2°C acima do intervalo de conforto, permitia armazenar calor de forma a ser obtido um ambiente de conforto ao fim de quase 2 horas.

Este modo de climatização fornece ainda mais flexibilidade ao consumo, sendo especialmente importante a utilização de sistemas inteligentes de gestão de energia que permitam operar minimizando os custos dedicados à climatização. Para que esta gestão de energia ocorra com maior eficiência é de maior importância o desenvolvimento e agregação de sistemas como os *Smart Buildings* ou as *Smart Grids*.

A segunda fase deste estudo foi definida como o principal objetivo deste trabalho e talvez o seu maior diferencial, no entanto a sua realização encontrava-se totalmente dependente do trabalho anterior. Uma vez que a modelação do pavimento de elevada inércia através de modelos RC em *Matlab*, exigia a recolha de dados experimentais do modelo estudado. Sendo este tema ainda pouco desenvolvido e o método pouco utilizado para o estudo do mesmo, as referências bibliográficas são quase inexistentes. O que resulta numa certa dificuldade e incerteza relativamente ao funcionamento e aplicação do modelo em edifícios.

Num primeiro momento foi realizada a livre simulação do modelo através dos dados experimentais, obtendo-se resultados bastante díspares e pouco conclusivos, com exceção da variável

R1. Esta variável representativa da resistência térmica entre o ambiente interior e o exterior apresentou relativa proximidade entre os resultados, assim como proximidade com o valor experimental. No sentido de tornar os resultados mais conclusivos procurou-se condicionar algumas variáveis, realizando gradualmente algumas aproximações de valores minimamente conhecidos. A primeira aproximação adotada foi para a variável R_2 , que apesar de não ser definido um valor específico, foi possível definir o seu intervalo. Com os extremos encontrados foi então realizada a simulação com esse valor máximo e mínimo de R_2 . Nesta fase os resultados verificam-se bastante coerentes entre si, no entanto não fazem qualquer sentido fisicamente tendo em conta as características do modelo. Mantendo-se os resultados pouco conclusivos, limitou-se novamente variáveis no caso C_1 , que nesta situação toma um valor exato ao contrário do que aconteceu anteriormente. Assim foram novamente realizadas simulações utilizando o valor fixo calculado para C_1 , e o valor mínimo e máximo atribuído a R_2 . Desta forma os resultados obtidos para o valor mínimo de R_2 , foi uma capacitância média de 23.04 KJ/°C para C_2 , e uma resistência de 0.638 °C/W para R_1 . Nas simulações para o valor máximo de R_2 , obteve-se para C_2 e R_1 os valores 18.49 KJ/°C e 0.648 °C/W respetivamente.

Por fim de forma incerta e até rudimentar tentou-se verificar se existiam perdas de calor a ocorrer inferiormente, ou seja, se existe energia que não chega a entrar no sistema. Um dos exercícios realizados foi tentar comparar o consumo realizado durante o aquecimento, com a variação de temperatura do pavimento. Aqui surge novamente o problema, verificado ao longo de todo o trabalho, de apenas se conhecer a temperatura superficial do pavimento e não da sua temperatura global, que seria o mais correto. O estudo através da simulação não permitindo quantificar as perdas de calor existentes, permitiu verificar que considerando a existência de perdas relativamente baixas, existiam variações consideráveis de valores. Face à confiança e coerência de alguns resultados entre experimentos, esta situação é indicativa de que as perdas de calor inferiormente serão bastante residuais.

Em trabalhos futuros seria de maior importância um estudo mais pormenorizado do pavimento, neste caso a sua temperatura foi medida utilizando exclusivamente um *data logger* de temperatura à superfície no centro do pavimento. No entanto seria interessante encontrar alternativas que possibilitem conhecer a sua temperatura global, levando em conta toda a sua área e espessura, permitindo um estudo mais consistente e preciso. A aplicação do modelo 2R2C ao comportamento térmico dos edifícios foi o principal foco deste trabalho, no entanto existe ainda espaço para a continuação do seu desenvolvimento. A realização de mais testes em condições diversificadas, permitiria um maior domínio e a calibração do modelo, assim como maior entendimento das suas limitações. À instalação experimental utilizada seria possível a realização modificações que se considerem relevantes para estudos futuros, assim como aplicação de outros modelos como o 3R2C ou outros. Seria ainda interessante a aplicação destes modelos e da instalação experimental, no estudo mais detalhado da viabilidade deste modo de climatização de edifícios, tendo em conta o contexto das Smart Grids e outros sistemas inteligentes de gestão de energia.

7. Referências Bibliográficas

- ADENE. (2016). Sistemas de Ventilação. *10 Soluções de Eficiência Energética*, 12.
- Al-Sanea, S. A., Zedan, M. F., & Al-Hussain, S. N. (2013). Effect of masonry material and surface absorptivity on critical thermal mass in insulated building walls. *Applied Energy*, *102*, 1063–1070. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.016>
- Asan, H. (1998). Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, *28*(3), 299–305. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(98\)00030-9](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(98)00030-9)
- Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, *42*(9), 1361–1368. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.026>
- Danza, L., Belussi, L., Meroni, I., Salamone, F., Floreani, F., Piccinini, A., & Dabusti, A. (2016). A Simplified Thermal Model to Control the Energy Fluxes and to Improve the Performance of Buildings. *Energy Procedia*, *101*(September), 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.013>
- Europeia, C. (2019). *Energy performance of buildings directive*. https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
- Fumo, N. (2014). A review on the basics of building energy estimation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *31*, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.040>
- Hu, S., Yan, D., An, J., Guo, S., & Qian, M. (2019). Investigation and analysis of Chinese residential building occupancy with large-scale questionnaire surveys. *Energy and Buildings*, *193*(June), 289–304. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.007>
- Junker, R. G., Azar, A. G., Lopes, R. A., Lindberg, K. B., Reynders, G., Relan, R., & Madsen, H. (2018). Characterizing the energy flexibility of buildings and districts. *Applied Energy*, *225*(April), 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.037>
- Kalema, T., Jhannesson, G., Pylsy, P., & Hagengran, P. (2008). Accuracy of energy analysis of buildings: A comparison of a monthly energy balance method and simulation methods in calculating the energy consumption and the effect of thermal mass. *Journal of Building Physics*, *32*(2), 101–130. <https://doi.org/10.1177/1744259108093920>
- Kaynakli, O. (2012). A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(1), 415–425. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.006>
- Martín, S., Mazarrón, F. R., & Cañas, I. (2010). Study of thermal environment inside rural houses of Navapalos (Spain): The advantages of reuse buildings of high thermal inertia. *Construction and Building Materials*, *24*(5), 666–676. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.002>
- Navarro, L., de Gracia, A., Colclough, S., Browne, M., McCormack, S. J., Griffiths, P., & Cabeza, L. F. (2016). Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. active storage systems. *Renewable Energy*, *88*, 526–547. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.040>
- Olesen, B. W. (2012). Using building mass to heat and cool. *ASHRAE Journal*, *54*(2), 44–52.
- Powells, G., Bulkeley, H., Bell, S., & Judson, E. (2014). Peak electricity demand and the flexibility of everyday life. *Geoforum*, *55*, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2014.04.014>
- Reilly, A., & Kinnane, O. (2017). The impact of thermal mass on building energy consumption. *Applied Energy*, *198*(April 2017), 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.024>
- Robertson, A. F., & Gross, D. (1958). An electrical-analog method for transient heat-flow analysis. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, *61*(2), 105. <https://doi.org/10.6028/jres.061.016>
- Santos, Pina dos; Matias, L. (2006). *LNEC_ITE_50.pdf*. LNEC.
- Slee, B., Parkinson, T., & Hyde, R. (2013). *Can You Have Too Much Thermal Mass? November 2013*, 325–333. <http://anzasca.net/wp-content/uploads/2014/08/97.pdf>
- Tahersima, M., Tikalsky, P., & Revankar, R. (2018). An experimental study on using a mass radiant floor with geothermal system as thermal battery of the building. *Building and Environment*, *133*(September 2017), 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.010>

-
- Ulgen, K. (2002). Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 34(3), 273–278. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00087-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00087-1)
- Verbeke, S., & Audenaert, A. (2018). Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(May 2017), 2300–2318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>
- Yang, L., & Li, Y. (2008). Cooling load reduction by using thermal mass and night ventilation. *Energy and Buildings*, 40(11), 2052–2058. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.014>
- Zhu, L., Hurt, R., Correia, D., & Boehm, R. (2009). Detailed energy saving performance analyses on thermal mass walls demonstrated in a zero energy house. *Energy and Buildings*, 41(3), 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.10.003>