



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Eletromecânica

Avaliação experimental do coeficiente global de transmissão de calor em elementos construtivos

Pedro Miguel Marques Alves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinho Silva
Coorientador: Prof. Doutor Luís Pires

Covilhã, Outubro de 2014

Agradecimentos

Queria desde já deixar o meu sincero agradecimento ao meu orientador Prof. Doutor Pedro Dinho Silva e ao coorientador Prof. Doutor Luís Pires pela hipótese de desenvolver este trabalho sobre as suas orientações. Queria ainda agradecer todo o apoio, dedicação e, acima de tudo a paciência que revelaram ao longo da realização deste trabalho.

E, por fim, gostaria de agradecer aos meus pais por todo o carinho e estímulo que me demonstraram ao longo deste percurso académico.

Resumo

Tendo em conta que a construção dos edifícios muitas das vezes implicam gastos excessivos de energia bem como perdas da mesma, sentiu-se a necessidade de contribuir com este estudo para a educação energética e preservação ambiental. Assim, este trabalho foi elaborado numa câmara climática situada no parque de estacionamento da Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior. Para tal, recorreu-se aos modos de transmissão de calor - condução, convecção e radiação - em elementos construtivos (uma parede de viroc e uma parede de viroc, cortiça e plantas com substrato). Por este meio, calculou-se experimentalmente os coeficientes globais e convectivos de transmissão de calor, verificando-se que a parede de viroc, cortiça e plantas com substrato (câmara climática 2) é mais eficiente energeticamente do que a parede apenas de viroc (câmara climática 1). Pelo exposto, atingiram-se os objetivos propostos, uma vez que se conclui ser possível reduzir energeticamente o consumo dos edifícios e assim contribuir para a preservação ambiental.

Palavras-chave

Consumo energético, elementos construtivos, preocupação ambiental, coeficiente global de transmissão de calor, coeficiente convectivo de transmissão de calor, câmara climática, fluxo de calor

Abstract

Considering that, in the building construction, are implied an excessive expenses in energy and their losses. It felt the necessity to contribute with this work for a better energy education and environmental preservation. This work was made in a climatic chamber located in the parking lot of the Faculdade de Engenharia of the Universidade da Beira Interior. To this end, we resorted to modes of heat transfer - conduction, convection and radiation - in constructive elements (one wall of viroc and a wall of viroc, cork and plants with substrate). By this means, it was estimated experimentally the global and convective heat transfer coefficients, it has been found that the wall viroc, cork and plants substrate (climatic chamber, 2) is more energy efficient than the wall only viroc (chamber climate 1). Aforementioned, it is reached the proposed objectives, since it can be concluded reduce the energy consumption of buildings, thus contributing to environmental preservation.

Keywords

Energy consumption, construction elements, environmental concern, overall heat transfer coefficient, convective heat transfer coefficient, climatic chamber, heat flux

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xi
Nomenclatura	xiii
1. Introdução	15
1.1. Perspetiva geral.....	15
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	15
1.3. Revisão bibliográfica	16
1.4. Objetivos e contribuição da dissertação	19
1.5. Visão geral e organização da dissertação	19
2. Transmissão de calor em elementos construtivos	21
2.1. Introdução	21
2.2. Modos de transmissão de calor	21
2.2.1. Condução	22
2.2.2. Convecção	23
2.2.3. Radiação	25
2.3. Caracterização dos elementos construtivos	27
2.4. Coeficiente global de transmissão de calor	31
3. Procedimento experimental.....	35
3.1. Introdução	35
3.2. Câmara de ensaio.....	35
3.3. Equipamento auxiliar	37
3.3.1. Ar condicionado	38
3.4. Estação meteorológica.....	40
4. Estudo de casos	42
4.1. Condições exteriores.....	42
4.2. Elemento construtivo simples	46
4.3. Elemento construtivo composto	52
4.4. Comparação dos elementos construtivos.....	58
4.5. Nota conclusiva	60
5. Conclusão	62
5.1. Recapitulação e principais conclusões.....	62
5.2. Sugestão para trabalho futuro	63

Referências bibliográficas 65

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Condução de calor em regime permanente.	22
Figura 2.2 - Esquema de Convecção.	24
Figura 2.3 - Esquema representativo de convecção no caso de estudo.	25
Figura 2.4 - Esquema de radiação.	26
Figura 2.5 - Representação das câmaras climáticas em estudo.	28
Figura 2.6 - Analogia elétrica.	30
Figura 2.7 - Cálculo da resistência térmica equivalente.	30
Figura 2.8 - Esquema de transmissão de calor de uma parede homogénea.	31
Figura 2.9 - Esquema elétrico de uma parede homogénea.	32
Figura 3.1 - Dimensões da câmara climática utilizada (em metros).	36
Figura 3.2 - Diagrama representativo da câmara climática.	37
Figura 3.3 - Data logger Grant modelo 2040.	38
Figura 3.4 - Ar condicionado General unidade exterior e interior.	39
Figura 3.5 - Estação meteorológica Vantage Pro2 Plus.	40
Figura 4.1 - Diagrama representativo da radiação solar.	42
Figura 4.2 - Diagrama representativo da radiação solar do dia 16 de fevereiro de 2014.	44
Figura 4.3 - Diagrama representativo de temperatura exterior.	44
Figura 4.4 - Diagrama representativo de temperatura exterior do dia 13 de Fevereiro de 2014.	46
Figura 4.5 - Elemento construtivo simples.	46
Figura 4.6 - Diagrama representativo da temperatura interior da câmara climática 1.	47
Figura 4.7 - Diagrama representativo da temperatura da parede da câmara climática 1.	47
Figura 4.8 - Diagrama representativo da temperatura da parede da câmara climática 1 do dia 13 de fevereiro de 2014.	49
Figura 4.9 - Diagrama representativo do fluxo de calor da câmara climática 1.	49
Figura 4.10 - Diagrama representativo do coeficiente convectivo da câmara climática 1.	51
Figura 4.11 - Diagrama representativo do coeficiente global de transmissão de calor da câmara climática 1.	51
Figura 4.12 - Esquema da parede composta.	52
Figura 4.13 - Diagrama representativo da temperatura interior da câmara climática 2.	53
Figura 4.14 - Diagrama representativo da temperatura parede da câmara climática 2.	53
Figura 4.15 - Diagrama representativo da temperatura da parede da câmara climática 2, do dia 16 de fevereiro de 2014.	55
Figura 4.16 - Diagrama representativo do fluxo de calor da câmara climática 2.	55
Figura 4.17 - Diagrama representativo do coeficiente convectivo da câmara 2.	57
Figura 4.18 - Diagrama representativo do coeficiente global de transmissão de calor da câmara climática 2.	57
Figura 4.19 - Diagrama representativo das temperaturas interiores das câmaras climáticas 1 e 2.	58
Figura 4.20 - Diagrama representativo das temperaturas das paredes das câmaras climáticas 1 e 2.	59
Figura 4.21 - Diagrama representativo dos coeficientes convectivos das câmaras 1 e 2.	59
Figura 4.22 - Diagrama representativo dos coeficientes globais de transmissão de calor das câmaras climáticas 1 e 2.	60

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Valores típicos do coeficiente convectivo de transmissão de calor para convecção natural. (Frota & Schiffer, 2001)	24
Tabela 3.1 - Características geométricas do ar condicionado.	39
Tabela 4.1 - Valores experimentais da radiação solar.	43
Tabela 4.2 - Valores experimentais da temperatura exterior.	45
Tabela 4.3 - Valores experimentais da temperatura da parede da câmara climática 1.	48
Tabela 4.4 - Resultados experimentais do fluxo de calor.	50
Tabela 4.5 - Valores experimentais da temperatura da parede da câmara climática 2.	54
Tabela 4.6 - Resultados experimentais do fluxo de calor.	56

Nomenclatura

A	Área [m ²];
A _s	Área da superfície [m ²];
COP	Coeficiente de desempenho;
EER	Índice de eficiência energética;
h	Coeficiente convectivo de transmissão de calor [W m ⁻² K ⁻¹];
h ₁	Coeficiente convectivo de transmissão de calor da câmara climática 1 [W m ⁻² K ⁻¹];
h ₂	Coeficiente convectivo de transmissão de calor da câmara climática 2 [W m ⁻² K ⁻¹];
I	Corrente elétrica [A];
k	Condutibilidade térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹];
q	Fluxo de calor [W m ⁻²];
Q1	Fluxo de calor da câmara climática 1 [W m ⁻²];
Q2	Fluxo de calor da câmara climática 2 [W m ⁻²];
R	Resistência térmica total [m ² K W ⁻¹];
R _e	Resistência elétrica [Ω];
T	Temperatura [°C];
T _e	Temperatura exterior [°C];
Termopar_1	Temperatura interior da câmara climática 1 [°C];
Termopar_2	Temperatura interior da câmara climática 2 [°C];
Termopar_p1	Temperatura da parede da câmara climática 1 [°C];
Termopar_p2	Temperatura da parede da câmara climática 2 [°C];
T _i	Temperatura interior [°C];
T _p	Temperatura da parede [°C];
T _s	Temperatura da superfície [°C];
T _∞	Temperatura do ambiente [°C];
U	Coeficiente global de transmissão de calor [W m ⁻² K ⁻¹];
U1	Coeficiente global de transmissão de calor da câmara climática 1 [W m ⁻² K ⁻¹];
U2	Coeficiente global de transmissão de calor da câmara climática 2 [W m ⁻² K ⁻¹];
V	Tensão elétrica [V];

Simbologia grega

$\dot{Q}_{absorvido}$	Fluxo de calor absorvido [W m ⁻²];
\dot{Q}_{cond}	Fluxo de calor de condução [W m ⁻²];
\dot{Q}_{conv}	Fluxo de calor de convecção [W m ⁻²];
$\dot{Q}_{emitido,máx}$	Fluxo de calor emitido máximo [W m ⁻²];

Nomenclatura

$Q_{incidente}$	Fluxo de calor incidente [$W m^{-2}$];
Q_{rad}	Fluxo de calor de radiação [$W m^{-2}$];
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [$5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$];
α	Absorvidade;
ε	Emissividade.

1. Introdução

A presente dissertação visa estudar a importância do coeficiente global de transmissão de calor em elementos construtivos. Realizar-se-á uma análise experimental, numa câmara climática existente na Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior.

Assim, o que se pretende com este trabalho é estudar experimentalmente, com recurso a uma câmara climática, o comportamento térmico de duas soluções construtivas diferentes - uma parede simples e uma parede composta.

1.1. Perspetiva geral

A utilização de elementos construtivos mais eficientes veio revolucionar os edifícios da atualidade. Deste modo, deve haver bastante cuidado com a seleção dos materiais das paredes e dos telhados. Antes de se efetuar uma construção, verificam-se as características energéticas de cada material, nomeadamente a condutividade térmica e a sua resistência térmica.

É importante calcular o coeficiente global de transmissão de calor, pois assim tem-se uma noção mais detalhada do custo energético dos edifícios e a poupança energética que podemos obter, consoante a utilização dos materiais adequados para o efeito.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

Pretende-se fazer uma análise experimental do U para que se possam obter dados concretos e conclusões pertinentes. A importância deste tipo de estudos (análise experimental) é ter edifícios energeticamente eficientes e com um baixo consumo energético, uma vez que atualmente existe uma grande preocupação ambiental, para que se possa preservar a qualidade de vida do Ser Humano, bem como a própria Natureza. Desta forma, também este estudo, pode contribuir para um baixo consumo energético que, afinal, é do interesse de todos.

1.3. Revisão bibliográfica

Antes de passar à fase da redação da presente dissertação, leram-se e analisaram-se vários documentos sobre a temática em questão, seguindo-se uma aprofundada reflexão para consolidação de conhecimentos, de modo a que a teoria pesquisada possa fundamentar o corpo teórico-prático aqui presente.

O coeficiente convectivo de transmissão de calor (CHTC) de uma superfície exterior de um edifício é um dos parâmetros cruciais para a avaliação exata do desempenho térmico de um edifício e está associado ao consumo energético do mesmo. Assim, constata-se que estudos demonstraram que a simulação do consumo energético pode variar de 20% a 40%, devido à escolha dos valores de CHTC para as superfícies interiores dos edifícios. Além disso, para as superfícies exteriores, o fluxo global de calor sensível do CHTC é ainda maior, devido às velocidades do ar a que as superfícies exteriores se submetem, que são iguais ou superiores do que as velocidades do ar a que as superfícies interiores também estão sujeitas. Por exemplo, os CHTC's são especialmente relevantes no estudo de coletores solares, telhados verdes e na suavização do efeito de estufa nas cidades. O CHTC é um parâmetro importante no balanço total de energia de um edifício no ambiente urbano, especialmente quando o edifício tem compartimentos com materiais de baixa resistência térmica, resultando numa elevada sensibilidade relativa ao balanço total de energia (Liu et al., 2013).

A gama de variação do coeficiente convectivo de transmissão de calor interior é aproximadamente 0,5-50 ($W / (^\circ C \cdot m^2)$), dependendo da situação e do sistema em estudo. Portanto, tal variação poderá provocar grandes alterações nos resultados da análise térmica (Kalema & Haapala, 1995).

O trabalho efetuado por Kalema e Haapala (1995) pretende estudar o efeito do coeficiente convectivo interior e de radiação de transmissão de calor sobre a dinâmica térmica de uma célula de teste, o sistema de aquecimento e refrigeração anual de energia bem como os picos de carga de um módulo de um edifício de escritórios. Para efetuar os cálculos, utilizaram um programa de simulação numérica designado TASE que trabalhou em cooperação com a Agência Internacional de Energia (IEA).

Quando se utilizam programas de simulação numérica, tanto o coeficiente de transmissão de calor de convecção como de radiação, devem ser calculados separadamente. Deste modo, quando se recorre a um programa de simulação numérica, o cálculo de convecção interior não é utilizado.

Os dois principais métodos de cálculo de convecção são:

1º Os coeficientes de transmissão de calor são constantes através do cálculo integral;

2º O coeficiente convectivo de transmissão de calor é calculado iterativamente através da diferença de temperatura entre o ar e cada superfície. Também a direção do fluxo de calor deve ser tomada em conta para superfícies horizontais; Sendo assim, a radiação é calculada utilizando a média das temperaturas das superfícies (Kalema & Haapala, 1995).

Segundo Aste et al. (2009), hoje em dia é possível projetar energeticamente um edifício apenas através do valor do coeficiente global de transmissão de calor (U), minimizando a sua transmissão através das paredes exteriores, telhados e janelas ou aumentando a espessura térmica do isolamento. Por exemplo, no Código de Construção Civil Italiana, os valores máximos aceitáveis do U são definidos mas, ao mesmo tempo e desde logo, deve ter-se em conta a inércia térmica. Esta é realizada através da especificação de um valor mínimo para a massa térmica dos componentes de construção, em relação às zonas climáticas italianas.

Muitos autores analisaram a influência das propriedades térmicas das paredes no desempenho energético dos edifícios, comparando diferentes estruturas de construção. Outros, em vez de realizarem uma comparação entre as paredes com o mesmo valor de U , ponderaram a influência da posição relativa de uma determinada espessura de isolamento (Aste et al., 2009).

Para Ferrari e Zanotto (2013), após terem definido os limites do valor U para os edifícios, analisaram que este se tornou um indicador comum na definição da qualidade térmica da envolvente dos edifícios, e a constante de desempenho térmico em regime estacionário, tornou-se a principal referência, apesar de negligenciar a capacidade que os materiais têm para armazenar e libertar calor ao longo do tempo.

Por outro lado, no que diz respeito aos climas temperados, as necessidades de arrefecimento tornaram-se as principais causas do aumento do consumo energético dos edifícios, bem como os aspetos dinâmicos da transmissão de calor, devido aos elementos da envolvente que afetam significativamente o desempenho global da energia dos edifícios (Ferrari & Zanotto, 2013).

Para além do recurso à utilização da simulação numérica anteriormente analisada, pode-se recorrer também à simulação experimental para o cálculo do U , que é a termografia infravermelha (IR), que tem vindo a aumentar drasticamente ao longo dos últimos anos.

Este método é importante e útil, pois dá espacialmente a distribuição de temperatura da superfície de forma não intrusiva, mesmo quando existem grandes variações de temperatura na

superfície. Atualmente, o uso desta técnica é mais importante para o cálculo do U, pois o seu valor U é uma pré-condição para a classificação do desempenho energético dos edifícios existentes (Fokaides, et al., 2011).

De acordo com Kuznik, et al. (2008), devido ao tempo que nós passamos dentro de espaços fechado, o conforto térmico tem vindo a aumentar, bem como a energia consumida, agravando consequentemente a poluição ambiental. Sendo assim, a utilização de materiais que mudam de fase (PCM), em paredes, tem sido um dos métodos mais eficazes para reduzir o consumo energético dos edifícios.

A principal desvantagem de edifícios leves é a baixa massa térmica. Obviamente, eles tendem a ter uma grande flutuação de temperatura, devido às cargas de arrefecimento e aquecimento extremo. Utilizando materiais de PCM nos edifícios, podemos diminuir significativamente as flutuações de temperatura, particularmente no caso de cargas de radiação solar (Kuznik, et al., 2008).

De acordo com Baldinelli (2009), as propriedades do isolamento térmico de superfícies com baixa emissividade térmica são conhecidas há muito tempo. Sabe-se que há cerca de cem anos atrás, James Edward começou a utilizar materiais com baixa emissividade para isolamento térmico. Apesar de esta técnica já ter a sua maturidade, ainda continua em aberto a sua investigação, especialmente nas aplicações em edifícios.

Saliente-se que os cálculos de arrefecimento necessitam ainda de investigação sobre o seu comportamento dinâmico. Sendo que o seu objetivo é reduzir a radiação solar que entra nos edifícios, revestimentos e pinturas são muitas vezes utilizados para cobrir o lado exterior destes mas, ainda assim, é mais utilizado para cobrir telhados - pois impõem um coeficiente de radiação com comprimentos de onda bastante elevado de maneira a emitir o máximo de radiação possível (Baldinelli, 2009).

A principal vantagem da utilização de câmaras climáticas é que representam um “meio-termo” entre as paredes de estudo naturalmente expostas ao ar livre, e os testes menos representativos de laboratório. Paredes de tamanho relativamente grande podem ser construídas dentro de uma câmara climática, seguindo as práticas normais e os efeitos realísticos de tempo e exposição, podendo assim ser simulados com precisão e monitorizados em condições laboratoriais (Hall, 2007).

1.4. Objetivos e contribuição da dissertação

O objetivo principal desta dissertação consiste em avaliar o comportamento térmico de soluções construtivas, utilizando uma câmara climática.

Entretanto, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Análise da transmissão de calor em elementos construtivos;
- Determinação por via experimental do coeficiente de transmissão de calor por convecção relativa ao ambiente interior e respetiva análise;
- Determinação por via experimental do coeficiente global de transmissão de calor em elementos construtivos e respetiva análise.

1.5. Visão geral e organização da dissertação

A presente dissertação está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo é a introdução, onde é referida a importância do cálculo do coeficiente global de transmissão de calor, seguindo-se a apresentação dos objetivos e da revisão bibliográfica.

O segundo capítulo é uma descrição de todos os mecanismos de transmissão de calor, apresentando-se as principais características de cada mecanismo e enunciando-se, em particular, o coeficiente global de transmissão de calor, bem como o coeficiente convectivo de transmissão de calor.

O terceiro capítulo destina-se à descrição e apresentação do procedimento experimental, onde se refere todo o equipamento utilizado e o processo experimental elaborado.

O quarto capítulo destina-se à análise das paredes da câmara climática em estudo, fazendo uma descrição da parede simples e da parede composta, e seguidamente a os resultados experimentais, bem como a sua análise.

O quinto capítulo apresenta as conclusões da dissertação inerentes ao trabalho realizado, bem como as perspectivas futuras sobre o tema.

2. Transmissão de calor em elementos construtivos

2.1. Introdução

O calor é a forma como a energia pode ser transferida de um sistema para o outro, como resultado das diferenças de temperatura (Cengel 2003). A ciência que estuda as trocas de energia transferida entre dois corpos é a transmissão de calor. Para além do estudo da transferência de calor, esta ciência prevê a quantidade de calor que é transferida entre os corpos em condições específicas. Esta é comumente encontrada em sistemas de engenharia e outros aspetos da vida, não sendo necessário ir muito longe para ver as áreas de aplicação da transmissão de calor. O próprio corpo humano rejeita constantemente calor à sua volta, principalmente, pelo facto do conforto térmico humano estar intimamente relacionado com essa taxa de rejeição. Assim, o ser humano tenta controlar essa taxa de transmissão de calor através da necessidade de ajustar o vestuário às condições ambientais (Cengel, 2003; Holman, 2009).

2.2. Modos de transmissão de calor

Quando falamos em transmissão de calor em edifícios, referimo-nos a mecanismos complexos que envolvem a transferência de calor por radiação e convecção nas superfícies exteriores, a condução através dos elementos sólidos e, por fim, a transferência de calor por convecção no interior do elemento em estudo. Uma vez que há variações das condições de fronteira, estamos perante um caso de regime dinâmico de transmissão de calor.

A transmissão de calor existe sempre quando ocorre um gradiente térmico entre diferentes materiais ou faces distintas de um material, havendo assim transferência de energia sob a forma de calor. A direcção da transferência de calor ocorre sempre do elemento mais quente para o elemento mais frio.

2.2.1. Condução

A condução de calor é a transferência de energia das partículas mais energéticas para uma substância onde as partículas adjacentes são menos energéticas como resultado da interação entre elas. Esta pode ter lugar nos sólidos, líquidos ou gases.

A distribuição das temperaturas nos sólidos poderá ser calculada a partir da solução da equação de condução de calor (equação 2.1), tendo que ser submetida a um conjunto de limites adequados a condições iniciais. Para a análise térmica dos corpos que têm formas, tais como placas, retângulos, ou paralelepípedos, é necessário que a equação de calor seja dada num sistema de coordenadas retangulares. Se tivermos outras formas nos corpos, o sistema de coordenadas tem que ser adequado. Nos gases e líquidos, a condução realiza-se devido à colisão e difusão das moléculas durante o seu movimento aleatório. Nos sólidos, esta dá-se devido à combinação das vibrações das moléculas numa estrutura e no transporte de energia de eletrões livres (Oziki, 1985; Cengel, 2003)

Quando existe um gradiente de temperaturas num determinado corpo, verifica-se uma transferência de energia, sobre a forma de calor, de uma superfície onde a temperatura é mais elevada, para uma superfície onde a temperatura é mais baixa, denominando-se de “calor sensível” (Holman, 2009). Tendo em conta esta situação, a condução pode ocorrer em dois regimes diferentes: permanente e dinâmico.

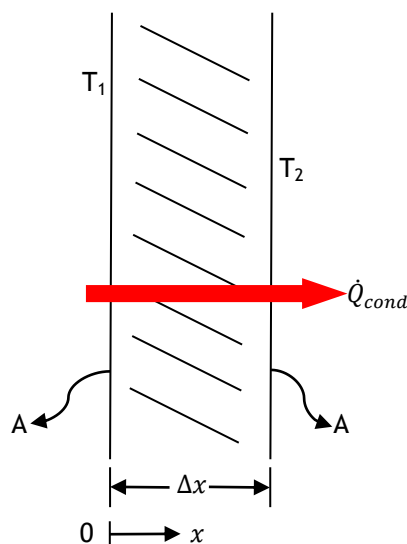


Figura 2.1 - Condução de calor em regime permanente.

Considerando uma parede plana unidimensional (figura 2.1), para quantificarmos o calor que atravessa a parede é necessário recorrer-se à **Lei de Fourier**:

$$Q_{\text{cond}} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Observando a figura 2.1, verifica-se que o fluxo de calor é considerado unidirecional, devido às condições de fronteira serem constantes ao longo do tempo, apesar de esta situação não ser recorrente assumindo, na realidade, um fluxo tridimensional.

Um dos parâmetros importantes quando se analisa a condução de calor através de uma parede plana unidirecional é a condutibilidade térmica do material (k), sendo definida como “o fluxo de calor que passa, na unidade de tempo, através da unidade de área de uma parede com espessura unitária e dimensões suficientemente grandes para que fique eliminada a influência de contorno, quando se estabelece, entre os parâmetros dessa parede, uma diferença de temperatura unitária” (Gomes, 1962).

Quando se pretende avaliar a transmissão de calor em regime dinâmico de uma parede, pode ser adotado o método de diferenças finitas, devidamente ajustado para um sistema de condução de calor, onde se verifiquem variações de temperatura ao longo do dia, como é o caso no estudo efetuado nesta dissertação. Consoante o número de “nós”, a temperatura instantânea nesses pontos pode ser calculada. Através da equação diferencial (2.2), onde está traduzido o princípio da conservação de energia ao longo do elemento de estudo e ao longo do tempo em regimes dinâmicos, inicia-se o cálculo da condução de calor em situações dinâmicas.

$$\rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.2)$$

2.2.2. Convecção

A convecção é a forma como a energia se transfere entre a superfície de um sólido e um líquido ou um gás adjacente que está em movimento, envolvendo-se os efeitos combinados de condução e movimento do fluido (Cengel, 2003).

Quando o movimento do fluido é artificial, provocado por bombas, ventoinhas, entre outros mecanismos, este é forçado. Este fenómeno designa-se por convecção forçada. (Oziki, 1985; Cengel, 2003).

Quando um fluido flui naturalmente, devido a diferenças de densidade, de temperatura ou causas naturais, sem qualquer tipo de controlo humano ou qualquer mecanismo, chama-se convecção natural ou livre (Cengel, 2003).

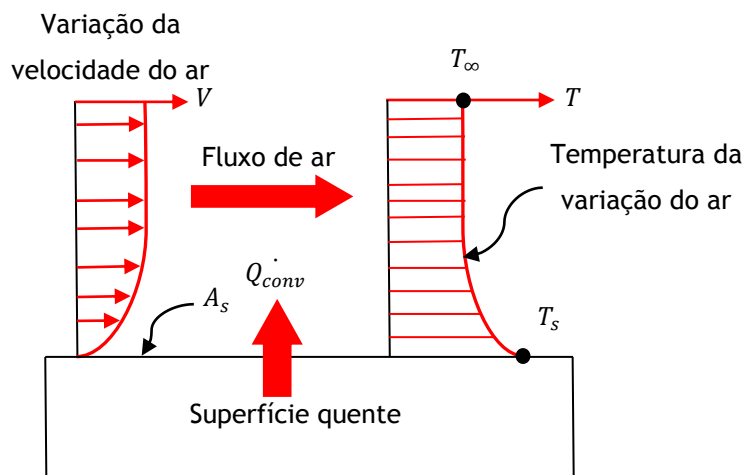


Figura 2.2 - Esquema de Convecção.

Para se quantificar o calor que atravessa a parede (figura 2.2) é necessário recorrer à **Lei de Newton para o arrefecimento**:

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

Se se estiver perante uma situação de convecção natural existem na literatura valores típicos para o coeficiente convectivo consoante a orientação do fluxo. (tabela 2.1)

Tabela 2.1 - Valores típicos do coeficiente convectivo de transmissão de calor para convecção natural. (Frota & Schiffer, 2001)

Orientação do fluxo de calor	Valor de h (W/m ²)
Fluxo descendente - superfície horizontal	1,2
Superfície vertical	4,7
Fluxo ascendente - superfície horizontal	7

No estudo realizado, impôs-se uma temperatura interior (T_i) através de um ar condicionado (figura 2.3). Para o caso em estudo, fizeram-se algumas alterações na equação 2.3, de forma a obter o coeficiente convectivo de transmissão de calor (equação 2.4).

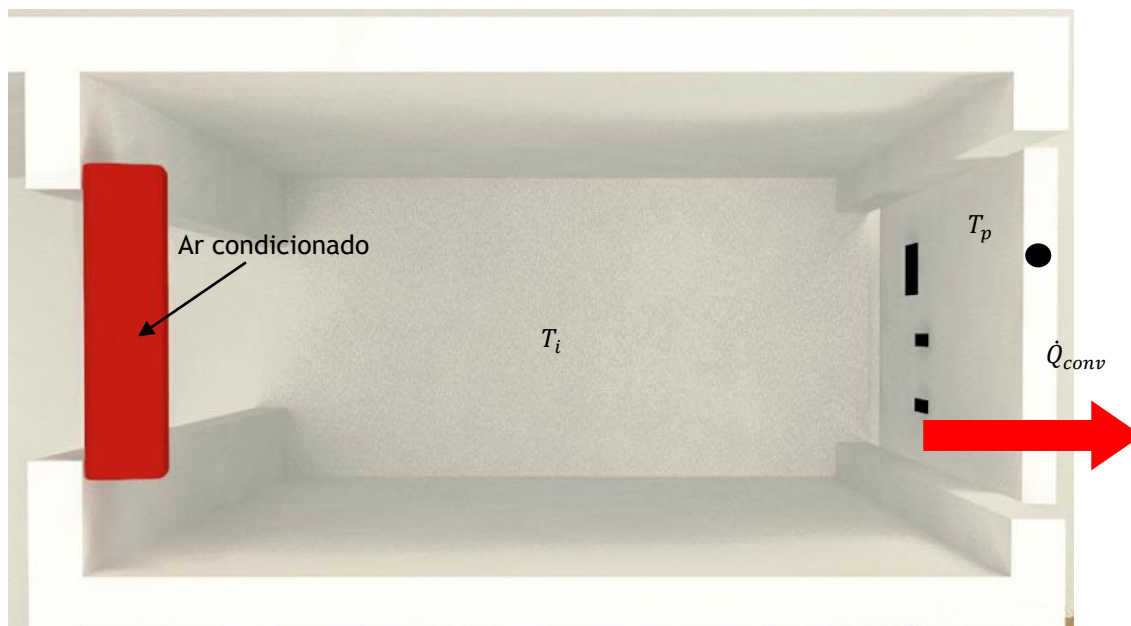


Figura 2.3 - Esquema representativo de convecção no caso de estudo.

$$h = \left| \frac{\dot{Q}_{conv}}{T_i - T_p} \right| \quad (2.4)$$

2.2.3. Radiação

A radiação é a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas, surgindo como resultado das trocas nas configurações eletrônicas dos átomos e moléculas. Ao contrário da condução e da convecção, a transferência de energia por radiação não necessita da presença de um meio material (Cengel, 2003).

Apesar de existirem diversas formas de radiação eletromagnética, no que diz respeito à transmissão de calor, a mais relevante é a radiação térmica (Cengel, 2003).

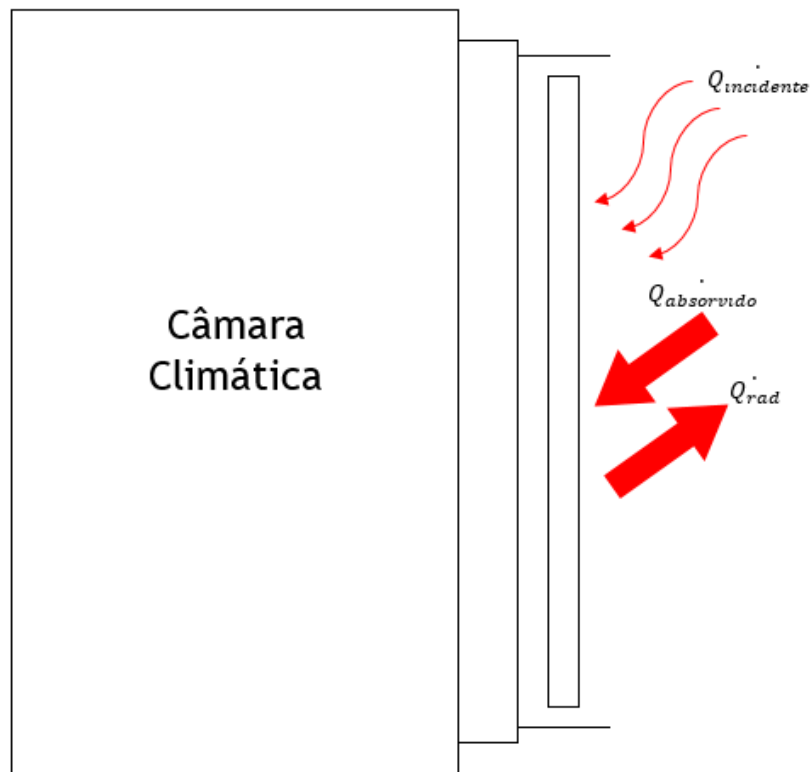


Figura 2.4 - Esquema de radiação.

A lei que quantifica a transferência de calor por radiação através de uma superfície (figura 2.3) é a **Lei de Stefan-Boltzmann**, sendo esta dada por:

$$\dot{Q}_{emitido,max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (2.5)$$

Idealmente a superfície que absorve e emite mais radiação é o corpo negro. Para um corpo real, utiliza-se a equação 2.6 com o objetivo de calcular a transferência de calor por radiação,

$$\dot{Q}_{emitido} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (2.6)$$

em que ε varia entre zero e um, sendo para um corpo negro igual a um (considerada ideal).

Outra propriedade importante da radiação é α , que depende das características de cada material, variando esta entre zero e um, sendo para um corpo negro igual a um (Cengel, 2003).

A **Lei de Kirchhoff** para o cálculo da radiação considera que tanto a emissividade como a absorvidade são utilizadas para superfícies com a mesma temperatura e com o mesmo comprimento de onda. Na maior parte dos casos, a temperatura das superfícies e da radiação incidente é da mesma ordem de grandeza e a média da emissividade e da absorvidade são consideradas iguais (Cengel, 2003). Então, a taxa de absorção da radiação é dada por:

$$Q_{\text{absorvido}} = \alpha Q_{\text{incidente}} \quad (2.7)$$

Se a radiação de calor absorvida for maior que a emitida, então o corpo diz-se que teve um ganho energético. Caso contrário considera-se que o corpo teve uma perda energética (Cengel, 2003).

2.3. Caracterização dos elementos construtivos

O maior mecanismo de perda de calor dentro de um edifício deve-se ao material de revestimento e é feita através da transmissão de calor por radiação, convecção e condução.

Para se definirem as perdas de calor de um edifício, é necessário recorrer ao cálculo de cada componente de transmissão de calor separadamente, ou definir o coeficiente global de transmissão de calor, através da equação: (Geoola et al., 2009)

$$U = \frac{Q}{A(T_h - T_c)} \quad (2.8)$$

A maior parte das pesquisas realizadas sobre materiais de revestimento concentraram-se na evolução do valor do coeficiente global de transmissão de calor como a função do vento, a condensação e a diferença de temperatura ($T_h - T_c$). Todos os estudos realizados com materiais de revestimento sobre a evolução do coeficiente global de transmissão de calor em estufas, foram considerados sem a utilização de painéis térmicos (Geoola et al., 2009).

O presente estudo foi realizado numa câmara climática dividida em duas, sendo que as paredes exteriores são constituídas por diferentes materiais, uma constituída por viroc (cimento e aglomerado de madeira), correspondendo à parede exterior da câmara climática 1, e outra constituída por plantas envolvidas em cortiça e substrato (cujos detalhes podem ser consultados em [Manso et al., 2013]), fixadas numa parede de viroc correspondente à parede exterior da câmara climática 2 (figura 2.5).

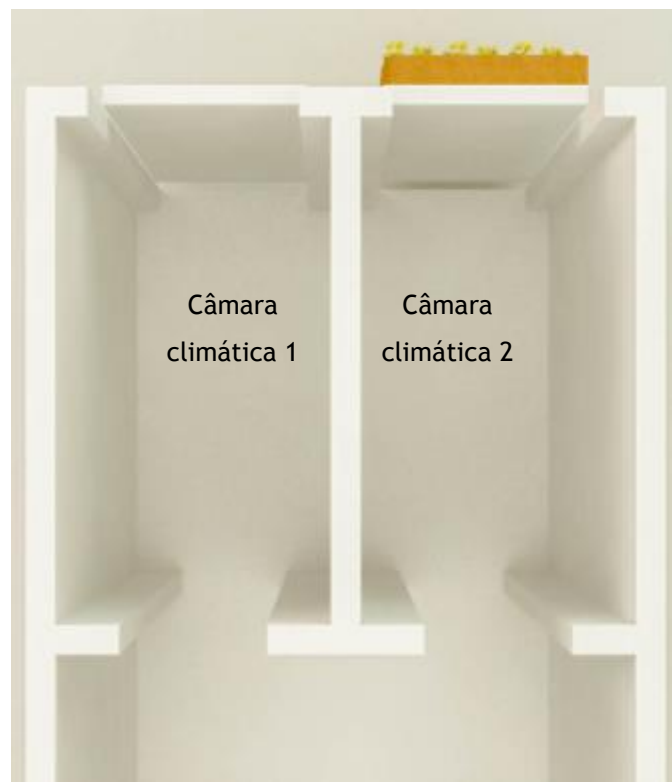


Figura 2.5 - Representação das câmaras climáticas em estudo.

A parede de viroc concilia a resistência e flexibilidade da madeira, a durabilidade e as qualidades de dureza do cimento. Tem uma baixa condutibilidade térmica ($0,22 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$) proporcionando um bom isolamento térmico da parede e, para além disso não é tóxico. Tem também um isolamento acústico de cerca de 31 ou 37 dB consoante a sua espessura, resiste a uma flexão de 9 N/mm^2 e, acima de tudo, é de simples aplicação.

A parede que é constituída por viroc, cortiça e plantas com substrato, proporciona um bom isolamento térmico devido sobretudo às plantas implementadas na cortiça, diminuindo o consumo energético de 2% a 18%, consoante a espessura das plantas com o substrato. Através da evapotranspiração, grande quantidade de radiação solar pode ser convertida em calor latente, não provocando, assim, o aumento da temperatura. Além disso, uma fachada completamente coberta por vegetação é protegida da intensa radiação solar no verão, e pode refletir ou absorver nas folhas entre 40% e 80% da radiação recebida, dependendo da qualidade e tipo de vegetação. Utilizando o isolamento de paredes com vegetação, podemos reduzir a temperatura das paredes de 10°C e 60°C para 5°C e 30°C (Wong et al., 2009).

A utilização de fachadas verdes e sistemas de paredes vivas oferece numerosos benefícios ecológicos e ambientais, que podem ter uma influência positiva sobre o conforto e bem-

estar dentro e na periferia dos edifícios, além do valor social e estético dos mesmos. Os benefícios ecológicos e ambientais dos sistemas verdes verticais, tais como telhados verdes, contribuíram para a redução do efeito de estufa nas áreas urbanas, para o melhoramento da qualidade do ar, bem como reduzem no consumo de energia. Na verdade, tanto o meio de crescimento das plantas, como as próprias plantas proporcionam um melhor isolamento que pode reduzir, especialmente na área do Mediterrâneo, a energia consumida no arrefecimento (Ottelé et al., 2011).

Considerando as plantas trepadeiras na base das fachadas dos edifícios, difundidas tradicionalmente desde os anos 2000 verifica-se que, existem atualmente várias formas de fachadas verdes. Os sistemas disponíveis no mercado podem ser classificados de fachadas verdes e sistemas de paredes vivas (Ottelé et al., 2011).

Especificando, as fachadas verdes são baseadas em trepadeiras ligadas entre si diretamente à superfície dos edifícios, ou suportadas por cabos ou treliças de aço. Os sistemas de paredes vivas, que são vulgarmente conhecidos como paredes verdes ou jardins verticais, são construídos com painéis modulares, onde cada um contém o seu próprio solo baseado na cultura hidropónica, usando soluções de nutrientes para melhorar o seu crescimento ou as necessidades de água (Ottelé et al., 2011).

Os sistemas de paredes vivas e as fachadas verdes têm diferentes características que podem ter influência em alguns benefícios, tais como arrefecimento e propriedades de isolamento. Isto acontece, entre outros aspetos, devido à espessura da folha (que cria uma camada estagnada de ar e sombra na fachada), o teor de água, as propriedades do material e possíveis cavidades de ar entre as diferentes camadas. A função da camada de ar estagnada é diminuir a taxa de transferência de calor entre o interior e o exterior dos edifícios (Ottelé et al., 2011).

Construindo fachadas verdes e telhados verdes, uma grande quantidade de radiação solar será absorvida pelo solo das plantas e verifica-se as suas funções biológicas. Quantidades significativas de radiação solar são utilizadas para a fotossíntese, transpiração, evaporação e respiração. Uma parte (5 - 30%) da radiação solar restante é atravessada através da folha e afeta o clima interior dos edifícios quando esta passa a fachada ou o telhado. Especialmente em áreas urbanas densas e pavimentadas, o impacto da evapotranspiração e da sombra das plantas poderá reduzir significativamente a quantidade de calor que seria irradiada por outro tipo de fachadas e outras superfícies. (Ottelé et al., 2011).

O estudo da transmissão de calor de paredes compostas, em regime permanente pode efetuar-se recorrendo à analogia elétrica. Introduzindo o conceito de resistência térmica de maneira análoga aos problemas de circuitos elétricos, sabemos que a resistência

térmica corresponde à resistência elétrica, a diferença de temperatura corresponde à tensão e a taxa de transmissão de calor corresponde à corrente elétrica (figura 2.6).

Considerando a condução de calor através de uma parede de um edifício, sabemos que o calor é constantemente transferido para o exterior, através das paredes.

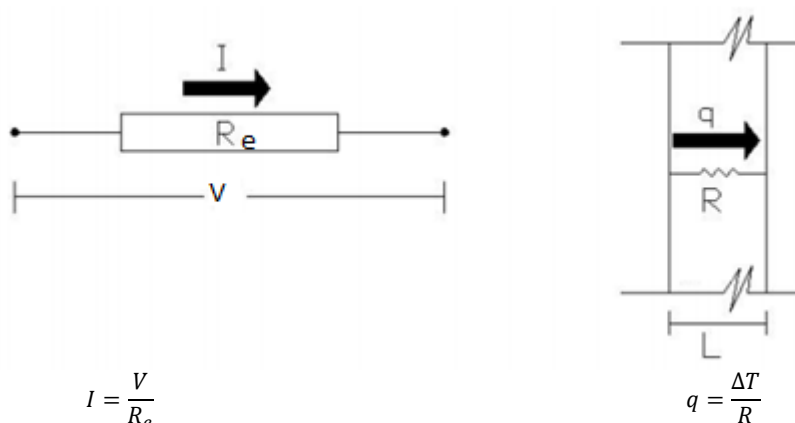


Figura 2.6 - Analogia elétrica.

No caso de termos uma parede composta por diferentes materiais, podemos construir um circuito térmico da mesma forma que um circuito elétrico, pois as regras do cálculo das resistências térmicas são as mesmas para somar resistências elétricas em série ou em paralelo, consoante a disposição das camadas dos materiais da parede (figura 2.7).

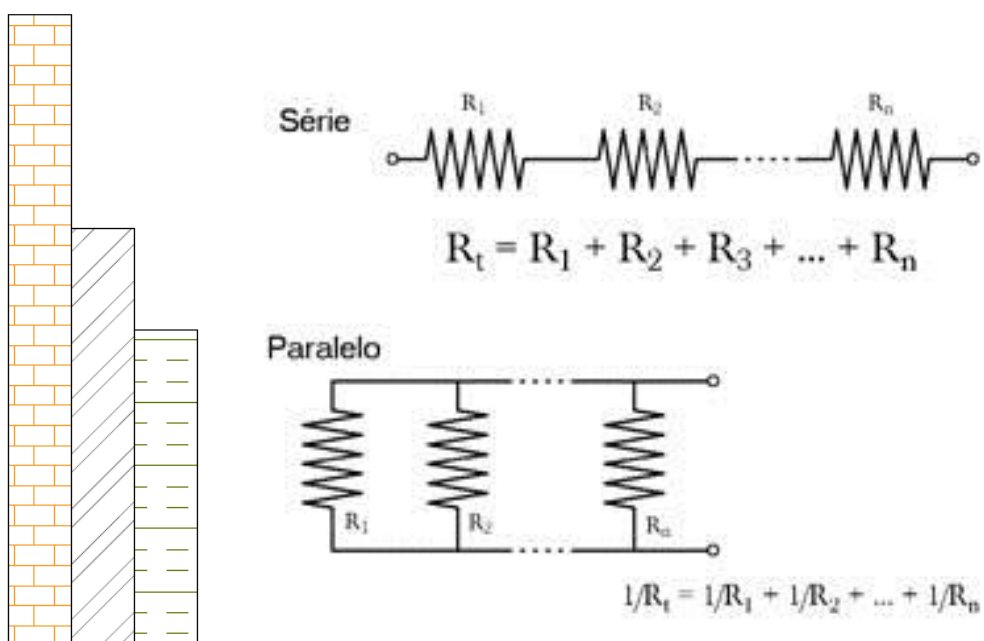


Figura 2.7 - Cálculo da resistência térmica equivalente.

2.4. Coeficiente global de transmissão de calor

O coeficiente global de transmissão de calor engloba a transmissão de calor por convecção, radiação e condução de calor num elemento. Portanto, engloba as trocas de calor num determinado elemento, de acordo com a sua espessura, o coeficiente de condutibilidade térmica, o coeficiente convectivo de transmissão de calor e a sua temperatura.

O valor do U de uma parede é a quantidade de calor perdido a cada segundo, através de um m^2 de material da parede, para cada grau de desvio de temperatura entre duas superfícies (Coulson, 2009).

Se considerarmos uma parede homogénea (figura 2.8), ou seja, constituída apenas por um material e com uma espessura constante, para se realizar o cálculo do coeficiente global de transmissão de calor, é necessário fazer um circuito elétrico equivalente (figura 2.9).

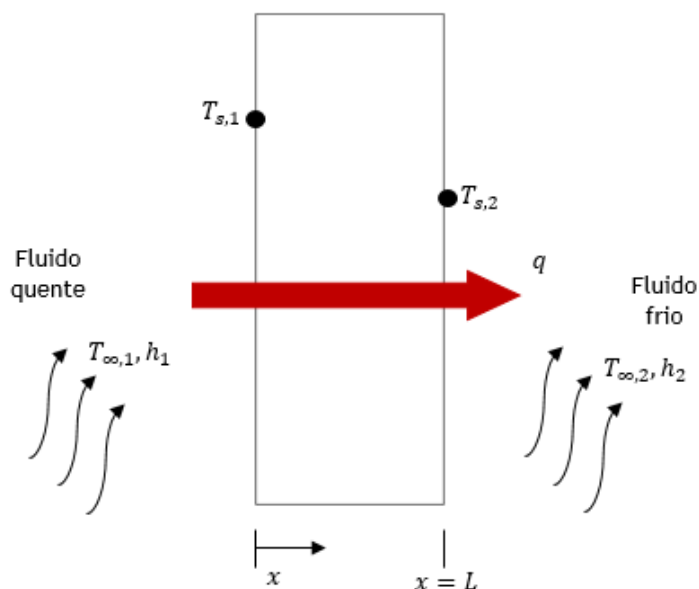


Figura 2.8 - Esquema de transmissão de calor de uma parede homogénea.

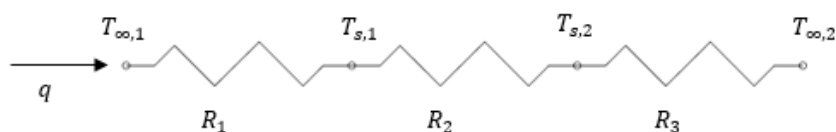


Figura 2.9 - Esquema elétrico de uma parede homogênea.

Após a realização do circuito elétrico equivalente (figura 2.9), podemos calcular a resistência térmica de convecção interior (equação 2.9), a sua resistência de condução (equação 2.10) e a sua resistência de convecção exterior (equação 2.11), recorrendo às leis de Fourier (equação 2.1) e de Newton para o arrefecimento (equação 2.3)

$$R_1 = \frac{T_{s,1} - T_{\infty,1}}{q} = \frac{1}{h_1 A} \quad (2.9)$$

$$R_2 = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q} = \frac{L}{kA} \quad (2.10)$$

$$R_3 = \frac{T_{s,2} - T_{\infty,2}}{q} = \frac{1}{h_2 A} \quad (2.11)$$

Para calcularmos o coeficiente global de transmissão calor, é necessário também calcular a sua resistência térmica total (equação 2.12), sendo calculada em série, para a parede homogênea (figura 2.9).

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (2.12)$$

Quando a resistência térmica é alterada em relação ao resto do material em qualquer zona da envolvente dos edifícios, estamos perante uma ponte térmica. Este tipo de alteração poderá dever-se à existência localizada de materiais com diferentes condutibilidades térmicas e/ou por alteração da sua geometria, como no caso de termos ligações entre diferentes elementos construtivos.

Um dos riscos que pode ocorrer com a existência de pontes térmicas é a criação de fungos e bolores provocados pela condensação.

De acordo com a norma ISO 6946 (1996), o valor do U é calculado através do inverso do somatório das suas resistências (equação 2.13).

$$U = \frac{1}{R} \quad (2.13)$$

Consoante o tipo de camadas e materiais da superfície em estudo, o valor da resistência térmica é diferente, sendo no nosso caso de estudo calculada em série.

Para este caso de estudo, tivemos que fazer ajustes na equação 2.12, de maneira a conseguirmos quantificar o U que é perdido pelas paredes (2.14).

$$U = \left| \frac{Q}{T_e - T_i} \right| \quad (2.14)$$

3. Procedimento experimental

3.1. Introdução

O estudo do coeficiente global de transmissão de calor realizado na câmara climática foi realizado para o integrar nesta dissertação, isto é, os seus resultados experimentais utilizados foram alvo de reflexão, análise e elaboração de conclusões específicas para o efeito. A medição das unidades de grandeza necessárias para a caracterização do U na câmara climática não foram completamente controladas, estando algumas dependentes de condições climáticas exteriores como, por exemplo, a temperatura exterior.

3.2. Câmara de ensaio

Este tipo de câmaras climáticas destina-se ao estudo de efeitos de ambiente específicos e controlados pelo homem. Com este tipo de testes, podem-se simular as condições climáticas interiores mais desejáveis, para mais tarde se poder implementar o tipo de elementos construtivos em edifícios em grande escala, estudando a melhor maneira de efetuarem um bom desempenho térmico, quer ao nível de isolamento térmico, quer ao nível acústico.

A câmara climática utilizada para o presente estudo localiza-se no parque de estacionamento exterior da Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira interior. Está orientada para Sul, de maneira a ter um maior aproveitamento da radiação solar, tendo as dimensões da figura 3.1.

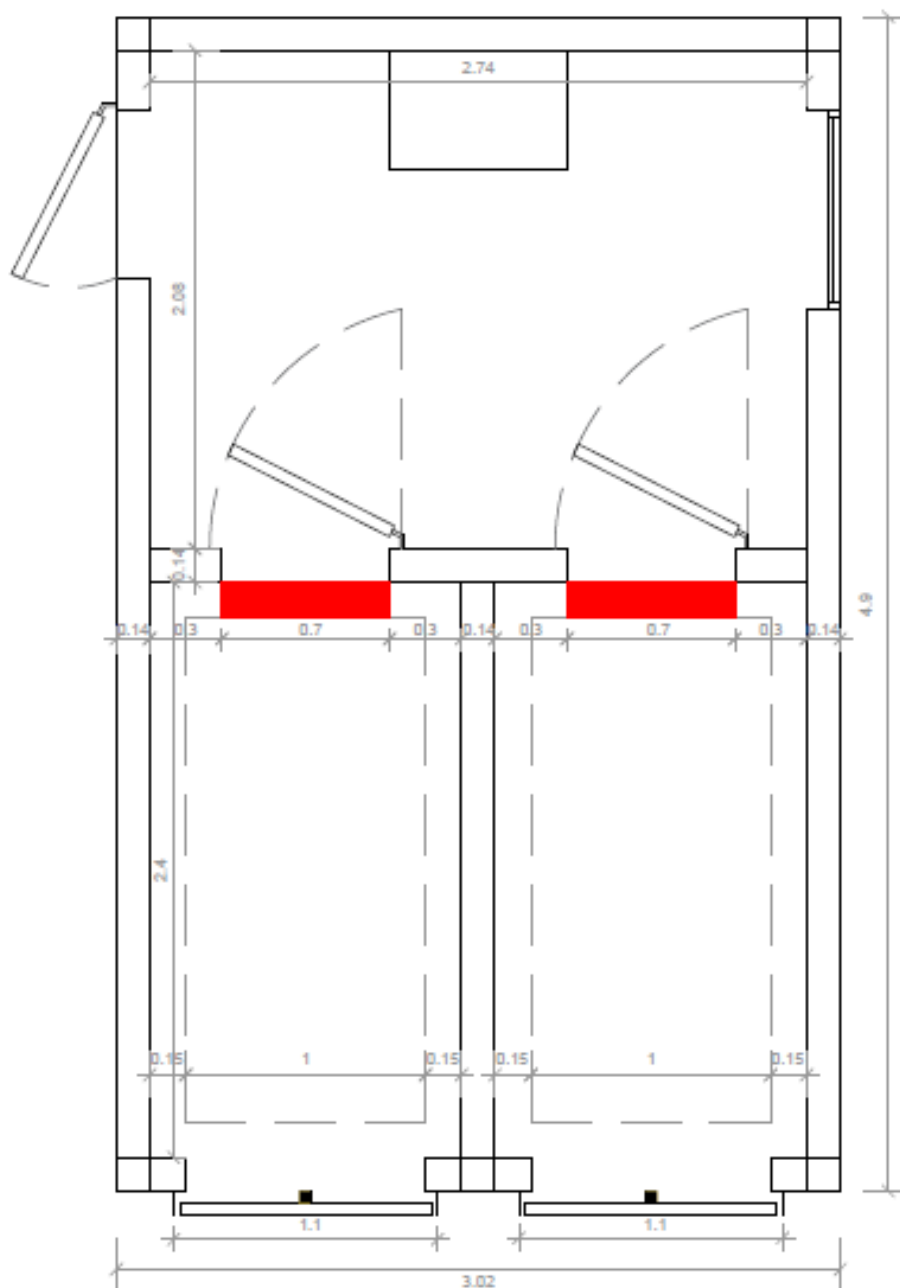


Figura 3.1 - Dimensões da câmara climática utilizada (em metros).

A câmara climática utilizada para este estudo, tem uma convecção forçada no seu interior por intermédio de um ar condicionado, da marca General. Interiormente, esta câmara é revestida por painéis de *sandwich* amovíveis. Esta encontra-se dividida em duas câmaras climáticas (figura 3.2), ambas revestidas exteriormente, sendo uma delas por viroc e a outra por viroc, plantas, cortiça e substrato, como já foi referido anteriormente.

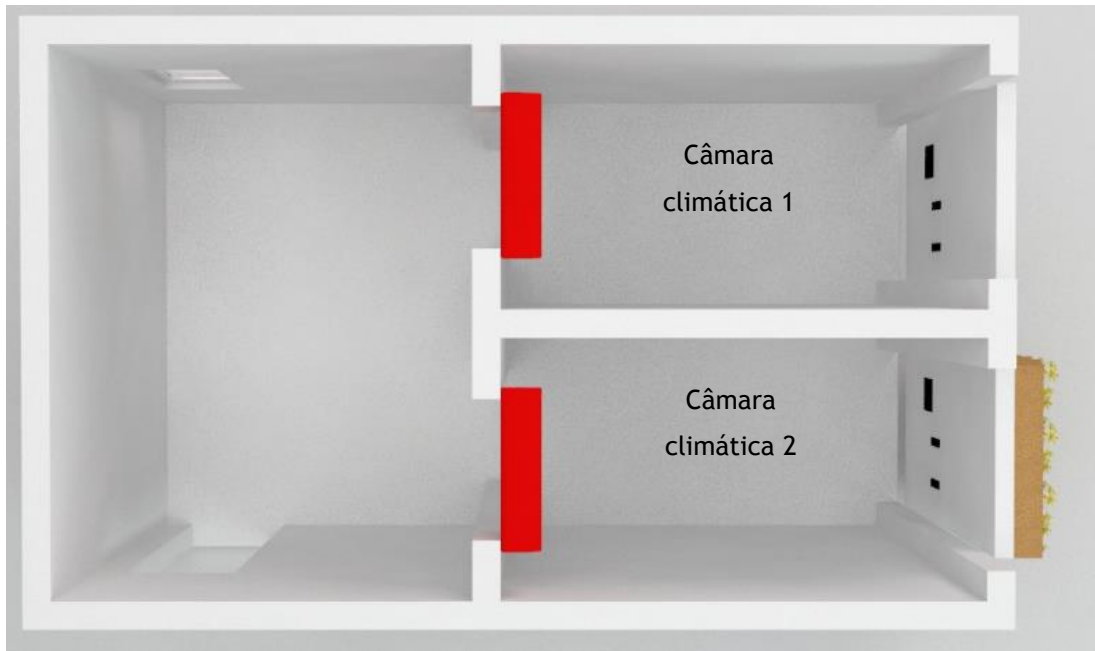


Figura 3.2 - Diagrama representativo da câmara climática.

Na figura 3.2, indicados a vermelho encontram-se os sistemas de ar condicionado e a preto os termopares para serem utilizados na medição da temperatura e os sensores de fluxo, para se realizar a medição do fluxo de calor.

3.3. Equipamento auxiliar

No decorrer dos ensaios realizados na câmara climática, duas unidades de grandeza foram medidas em diversos locais, de modo a poder caracterizar o seu funcionamento através: das temperaturas e fluxos de calor. Para tal, utilizaram-se termopares e sensores de fluxo de calor.

Todos os demais parâmetros necessários para a caracterização das condições de trabalho da câmara climática foram calculados a partir das grandezas medidas com recurso às propriedades termodinâmicas.

O tipo de termopares utilizados foram do tipo T, que mede temperaturas entre os $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ e os $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, foram também colocados em cada câmara climatizada dois termopares, um que mede a temperatura ambiente e outro que mede a temperatura da parede, estando indicados a preto na figura 3.2.

Utilizaram-se dois transdutores, um em cada câmara climatizada, para medir o fluxo de calor que atravessa as duas paredes. Este gera um impulso elétrico que é proporcional ao fluxo de calor total na superfície do sensor. Por sua vez, o fluxo de calor medido é dividido pela área de superfícies fixa do sensor, que serve para determinar a sua densidade de fluxo de calor.

Todos os valores de temperaturas e fluxo de calor foram registados através de um data logger, da marca Grant, modelo 2040 Series (figura 3.3), sendo esses valores registados numa cadência de 10 minutos. Este possui uma memória interna de 128 Mb, tem 4 saídas analógicas que convertem para digital, trabalha a uma frequência de 100 Hz e tem a escala de funcionamento do termopar do tipo T, indo de -200 °C até 400 °C.



Figura 3.3 - Data logger Grant modelo 2040.

3.3.1. Ar condicionado

O ar condicionado é um processo de tratamento de ar interior existente em espaços fechados. O processo referido consiste em regular a qualidade do ar interior, no que diz respeito à sua temperatura, humidade e movimento. Portanto, em geral, um sistema de ar condicionado tem a funcionalidade de arrefecimento, aquecimento, humedificação, renovação, filtragem e ventilação do ar.

O ar condicionado utilizado é da marca General (figura 3.4). As duas câmaras possuem duas unidades de ar condicionado, uma unidade exterior (AOHG12LLC) e uma interior (ASHG12LLCA). Funcionam a 50 Hz e têm uma potência de arrefecimento de 3,4 kW, um EER de 3,35 kW/kW, que é a capacidade que um ar condicionado tem de refrigeração em relação à sua potência elétrica, sendo a potência de aquecimento de 4 kW, com um COP de 3,7 kW/kW.



Figura 3.4 - Ar condicionado General unidade exterior e interior.

O referido ar condicionado pode operar num ciclo contínuo de 20 minutos com o máximo fluxo de ar e, sendo possível, a máxima velocidade do compressor, possuindo um rápido arrefecimento e aquecimento, tornando o ambiente rapidamente confortável.

O ar condicionado em questão utiliza o refrigerante R410A, ou seja, tem na sua constituição difluorometano (CH_2F_2 , chamado R-32) e pentafluoroetano (CHF_2CF_3 , chamado de R-125) que é muito utilizado como um fluido refrigerante nestas aplicações de ar condicionado.

Na tabela 3.1 estão especificados todos os parâmetros geométricos do ar condicionado.

Tabela 3.1 - Características geométricas do ar condicionado.

Dimensões AxLxP [mm]	<u>Unidade Interior</u>	262x820x206
	<u>Unidade Exterior</u>	535x820x293
Peso [Kg]	<u>Unidade Interior</u>	7,5
	<u>Unidade Exterior</u>	26

A gama de temperaturas em que o ar condicionado pode funcionar varia no arrefecimento para a unidade exterior entre -15°C e 24°C , enquanto a unidade interior varia entre 16°C e 30°C . Para o aquecimento, a gama de valores da unidade exterior varia entre 18°C e 43°C , enquanto a unidade interior oscila entre 18°C e 32°C , tendo este ar condicionado capacidade de suportar uma humidade interior de, no máximo, 80%.

3.4. Estação meteorológica

A estação meteorológica Vantage Pro2 Plus (figura 3.5), da marca Davis, foi utilizada com o intuito de se obterem diferentes valores de grandeza. Esta estação meteorológica possui dois componentes: um ISS (*Integrated Sensor Suite*) e uma consola de controlo. O ISS e a consola utilizam o protocolo de comunicação FCC e transmissor e recetor FHCC (*spread-spectrum frequency-hopping*).

Esta estação meteorológica possui também diversos sensores para medir as diferentes grandezas, mas as grandezas utilizadas para a realização dos diversos cálculos foram: o sensor de temperatura, sensor de radiação solar e o anemómetro.



Figura 3.5 - Estação meteorológica Vantage Pro2 Plus.

4. Estudo de casos

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos estudos conduzidos numa câmara climática, com o objetivo de fazer a avaliação do desempenho de dois elementos construtivos. Dos diversos ensaios realizados, foram selecionados os correspondentes ao período de 7 de Fevereiro de 2014 a 17 de fevereiro do mesmo ano. A temperatura interior imposta foi de 20 °C em ambas as câmaras climáticas.

4.1. Condições exteriores

É importante fazer uma análise das condições exteriores, tais como a radiação solar e a temperatura exterior, pois estas vão influenciar os parâmetros U e h. É importante analisar a sua evolução ao longo dos dias, devido à sua constante variação, quer diária quer semanal.

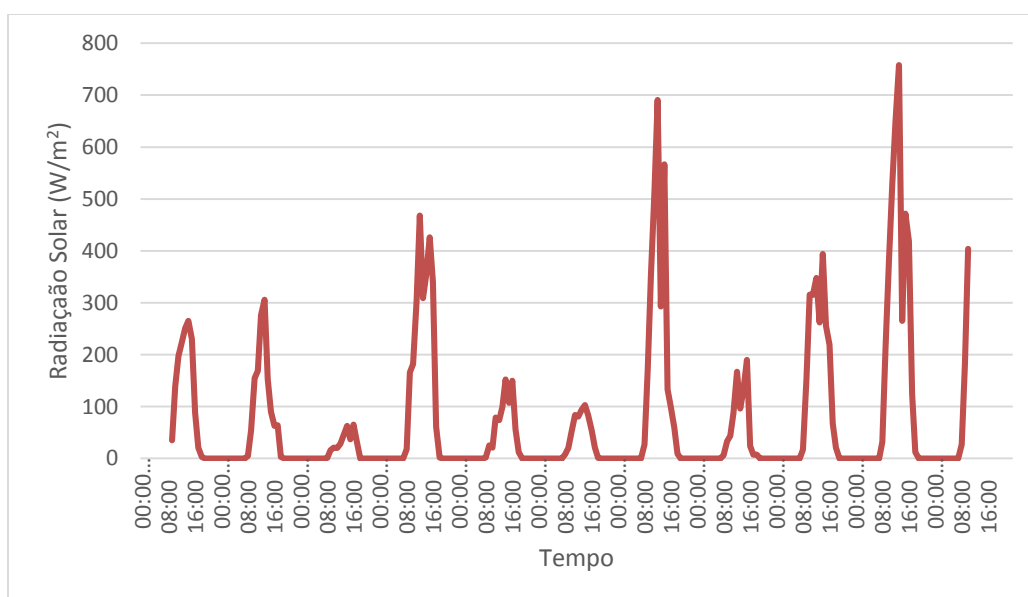


Figura 4.1 - Diagrama representativo da radiação solar.

Como podemos verificar na figura 4.1, o dia que teve radiação mais elevada foi o dia 16 de fevereiro, atingindo o seu pico máximo às 13:00, de 758 W/m² (tabela 4.1). Este valor acontece, porque a hora de maior calor é sempre entre as 12:00 e as 14:00. O dia 9 de fevereiro foi o que teve menor radiação solar, sendo às 14:00 de 63 W/m² de pico máximo

(tabela 4.1). Este tipo de variações bastante bruscas de radiação são normais, devido às horas de incidência máxima de calor.

Tabela 4.1 - Valores experimentais da radiação solar.

Data	Hora (h)	Radiação Solar (W/m ²)	Data	Hora (h)	Radiação Solar (W/m ²)
09-02-2014	00:00	0,00	16-02-2014	00:00	0,00
	01:00	0,00		01:00	0,00
	02:00	0,00		02:00	0,00
	03:00	0,00		03:00	0,00
	04:00	0,00		04:00	0,00
	05:00	0,00		05:00	0,00
	06:00	0,00		06:00	0,00
	07:00	0,00		07:00	0,00
	08:00	1,00		08:00	32,00
	09:00	16,00		09:00	213,00
	10:00	21,00		10:00	386,00
	11:00	20,00		11:00	528,00
	12:00	28,00		12:00	648,00
	13:00	45,00		13:00	758,00
	14:00	63,00		14:00	265,00
	15:00	37,00		15:00	472,00
	16:00	65,00		16:00	419,00
	17:00	30,00		17:00	125,00
	18:00	0,00		18:00	12,00
	19:00	0,00		19:00	0,00
20:00	0,00	20:00	0,00		
21:00	0,00	21:00	0,00		
22:00	0,00	22:00	0,00		
23:00	0,00	23:00	0,00		

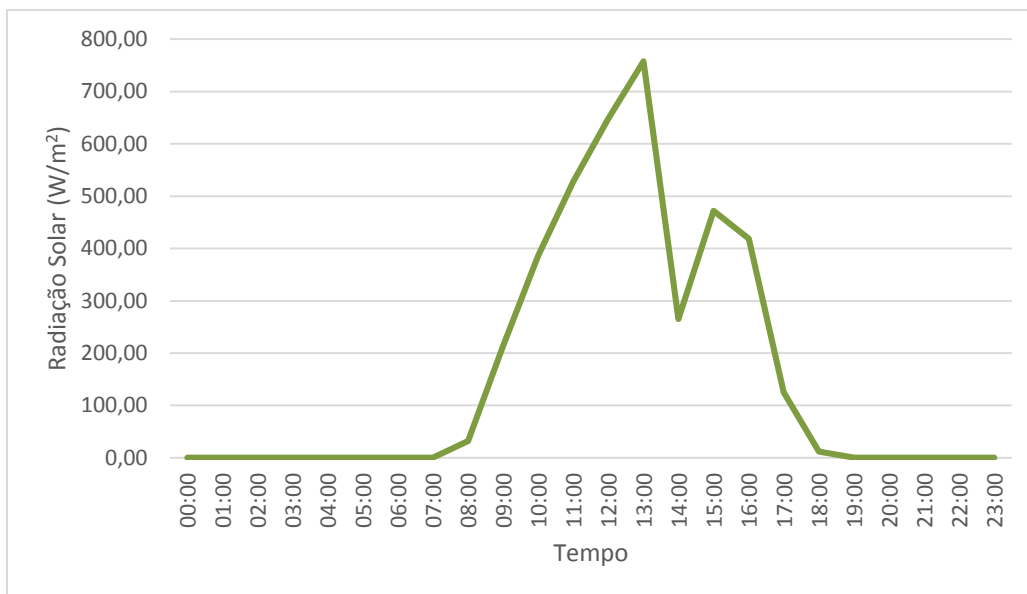


Figura 4.2 - Diagrama representativo da radiação solar do dia 16 de fevereiro de 2014.

Na figura 4.2 estão calculados os valores instantâneos da tabela 4.1, onde se verifica que o seu pico máximo é atingido às 13:00.

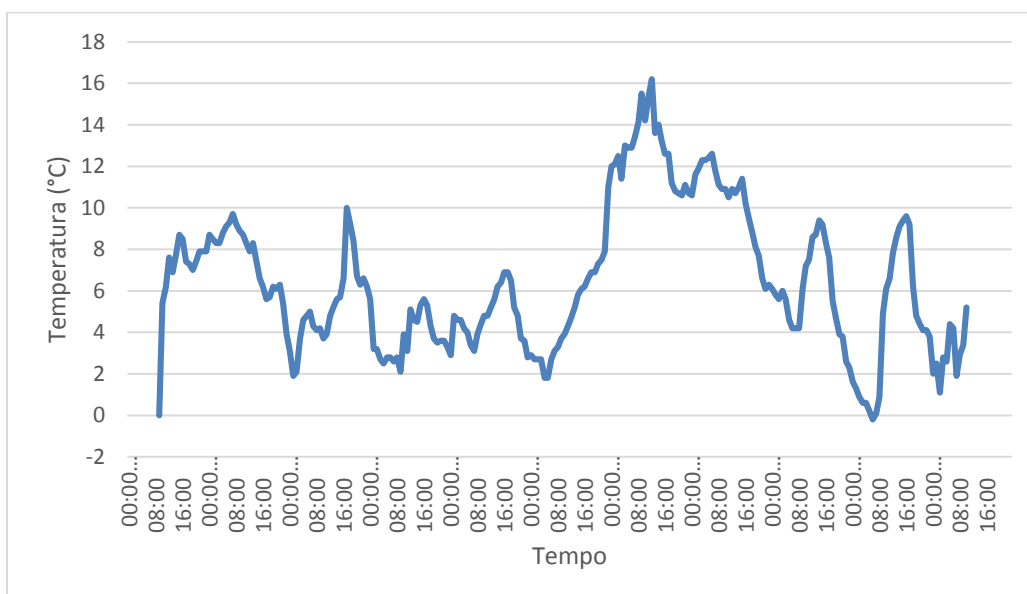


Figura 4.3 - Diagrama representativo de temperatura exterior.

Como podemos observar na figura 4.3, o dia em que se registou a temperatura mais elevada foi a 13 de fevereiro, atingindo o seu valor máximo às 12:00, sendo de 16,20 °C (tabela 4.2). O dia em que se obteve menor temperatura, sendo de -0,20 °C, às 6:00 foi a 16 de fevereiro (tabela 4.2). Estas variações de temperaturas devem-se ao facto da radiação solar não ser constante (figura 4.1).

Tabela 4.2 - Valores experimentais da temperatura exterior.

Data	Hora (h)	T_e (°C)	Data	Hora (h)	T_e (°C)
13-02-2014	00:00	12,00	16-02-2014	00:00	1,60
	01:00	12,10		01:00	1,30
	02:00	12,50		02:00	0,90
	03:00	11,40		03:00	0,60
	04:00	13,00		04:00	0,60
	05:00	12,90		05:00	0,20
	06:00	12,90		06:00	-0,20
	07:00	13,40		07:00	0,10
	08:00	14,10		08:00	0,90
	09:00	15,50		09:00	4,90
	10:00	14,20		10:00	6,10
	11:00	15,30		11:00	6,60
	12:00	16,20		12:00	7,80
	13:00	13,60		13:00	8,60
	14:00	14,00		14:00	9,10
	15:00	13,20		15:00	9,40
	16:00	12,60		16:00	9,60
	17:00	12,60		17:00	9,20
	18:00	11,20		18:00	6,20
	19:00	10,80		19:00	4,80
	20:00	10,70		20:00	4,40
	21:00	10,60		21:00	4,10
	22:00	11,10		22:00	4,10
	23:00	10,70		23:00	3,80

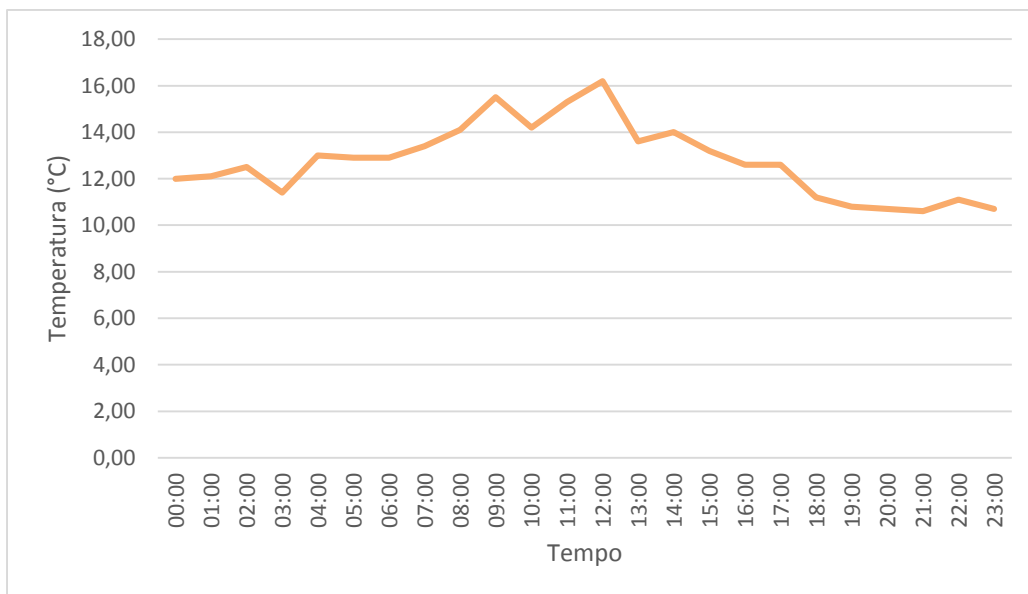


Figura 4.4 - Diagrama representativo da temperatura exterior do dia 13 de Fevereiro de 2014.

Na figura 4.4 estão calculados os valores instantâneos da tabela 4.2, onde se verifica que o pico máximo é atingido às 12:00.

4.2. Elemento construtivo simples

Como foi mencionado no capítulo 2, o elemento construtivo simples é composto por uma parede de viroc. (figura 4.3)

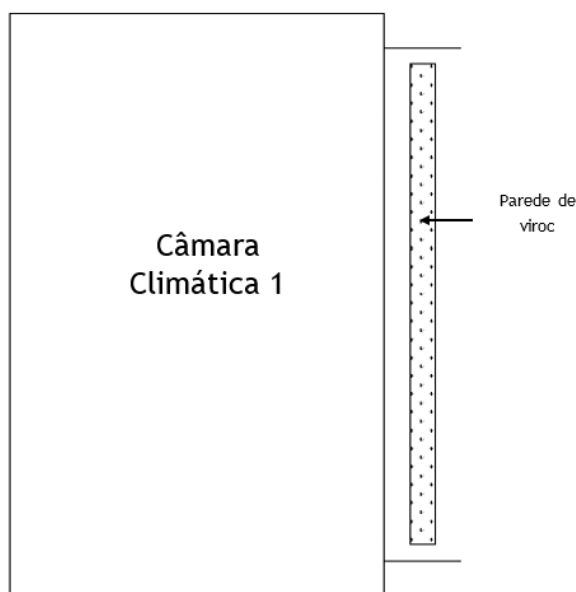


Figura 4.5 - Elemento construtivo simples.

Um dos parâmetros importantes para o cálculo do U e do h, é a temperatura interior da câmara climática (figura 4.5), sendo que estes parâmetros influenciam diretamente o valor dos coeficientes U e h.

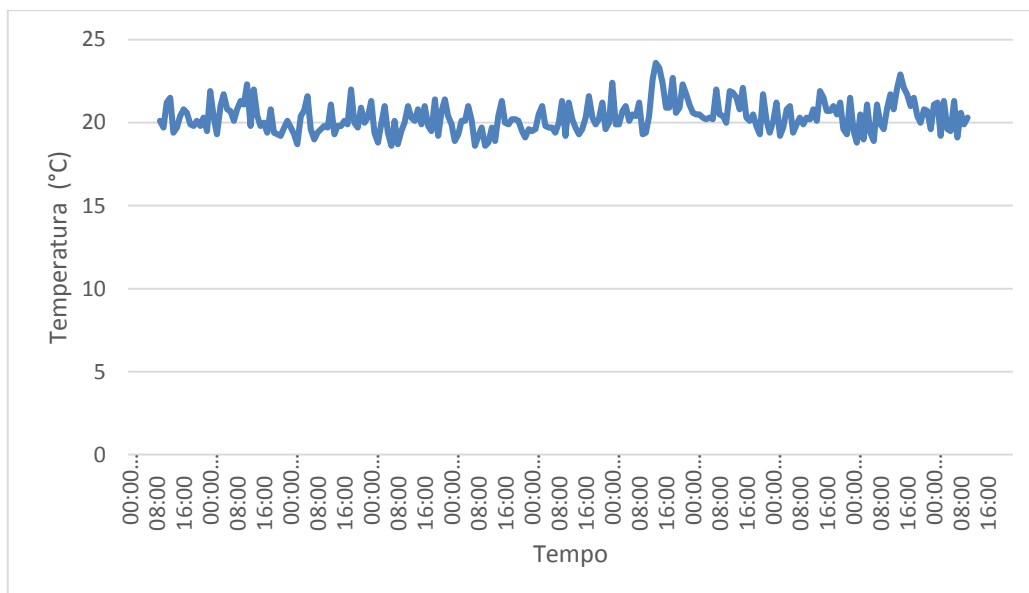


Figura 4.6 - Diagrama representativo da temperatura interior da câmara climática 1.

Verifica-se na figura 4.6, que existem reduções em cerca de 20% em relação à temperatura imposta de 20°C, mantendo-se a temperatura mais ou menos constante relativamente àquela que foi imposta e isto deve-se ao facto de a parede ter condutibilidade térmica baixa.

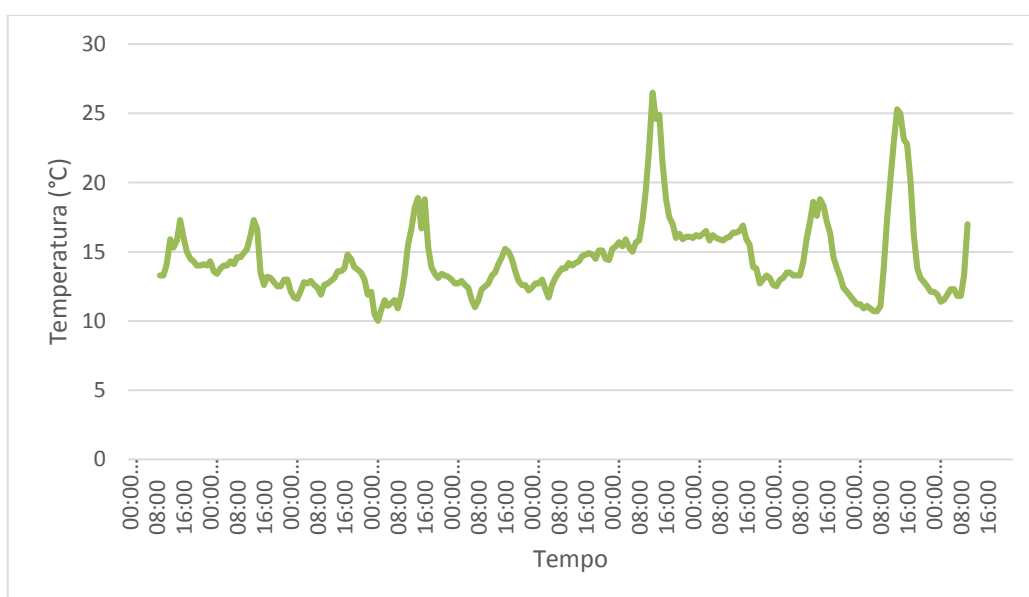


Figura 4.7 - Diagrama representativo da temperatura da parede da câmara climática 1.

Na figura 4.7 verifica-se que a temperatura da parede tem oscilações acentuadas, atingindo o pico máximo no dia 13 de fevereiro, às 12:00, de 26,5 °C (tabela 4.3). As perdas de calor devem-se ao facto de o material da parede exterior da câmara ter condutibilidade térmica elevada, permitindo que o calor flua facilmente através das mesmas.

Tabela 4.3 - Valores experimentais da temperatura da parede da câmara climática 1.

Data	Hora (h)	Termopar_p1 (°C)
13-02-2014	00:00	15,2
	01:00	15,4
	02:00	15,7
	03:00	15,4
	04:00	15,9
	05:00	15,3
	06:00	15
	07:00	15,7
	08:00	15,8
	09:00	17,4
	10:00	19,5
	11:00	22,4
	12:00	26,5
	13:00	24,6
	14:00	24,9
	15:00	21,4
	16:00	18,8
	17:00	17,5
	18:00	17
	19:00	16
	20:00	16,3
	21:00	15,9
	22:00	16,1
	23:00	16,1

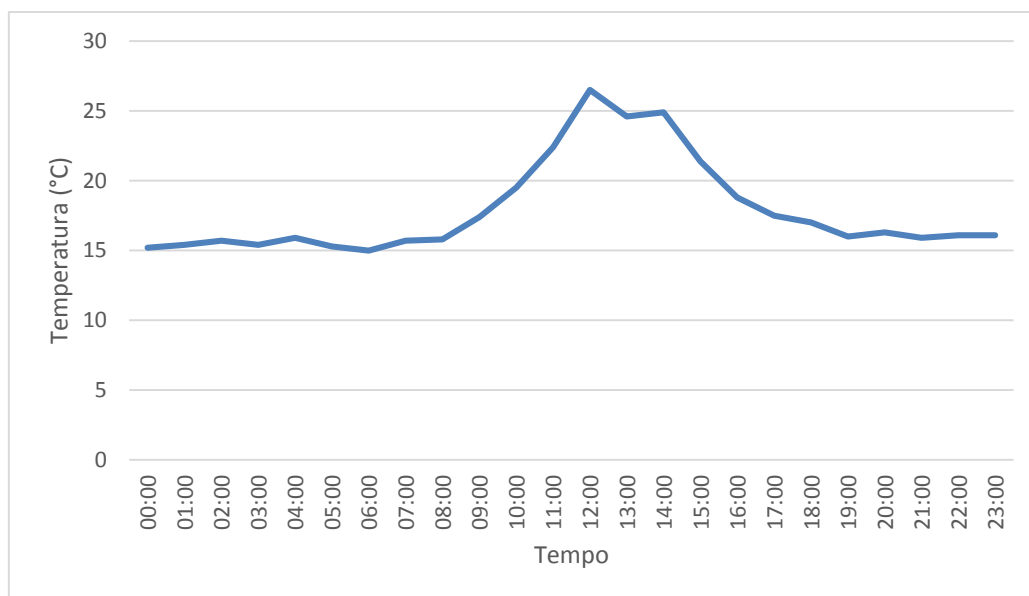


Figura 4.8 - Diagrama representativo da temperatura da parede da câmara climática 1 do dia 13 de fevereiro de 2014.

Na figura 4.8 estão calculados os valores instantâneos diários da tabela 4.3, onde se verifica que o seu valor mínimo é atingido às 12:00.

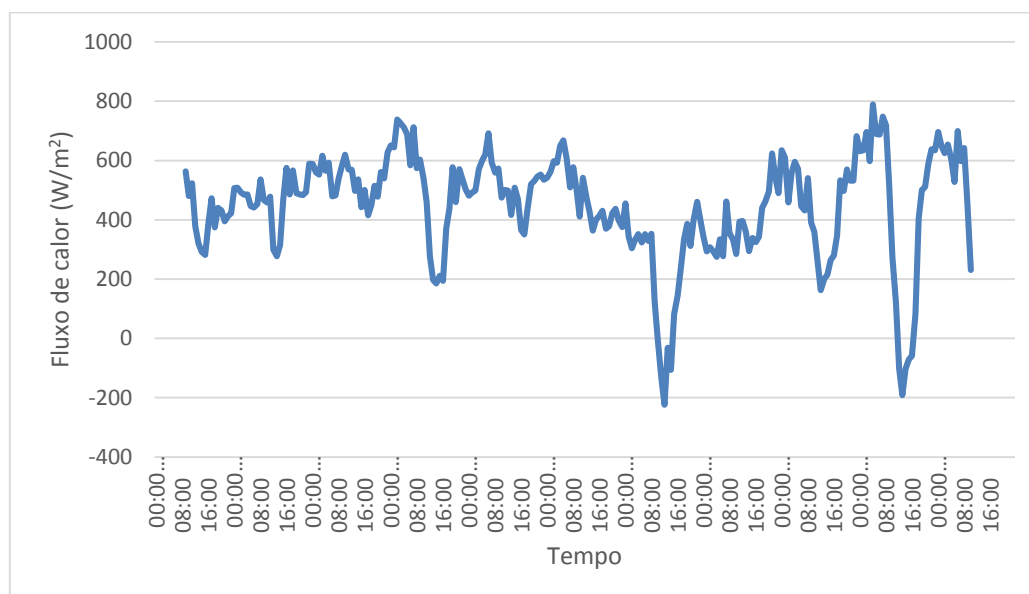


Figura 4.9 - Diagrama representativo do fluxo de calor da câmara climática 1.

Na figura 4.9, verifica-se que o fluxo de calor mínimo é de $-224,32 \text{ W/m}^2$, registou-se no dia 13 de fevereiro, às 12:00, sendo este valor negativo, devido ao facto de que embora a temperatura interior da câmara climática seja superior à temperatura exterior (tabela 4.4), a contribuição da radiação solar se sobreponha as perdas térmicas.

Tabela 4.4 - Resultados experimentais do fluxo de calor.

Data	Hora (h)	T_e (°C)	Termopar_1 (°C)	Q1 (W/m ²)
13-02-2014	00:00	12,00	22,4	455,71
	01:00	12,10	19,9	343,45
	02:00	12,50	19,9	303,88
	03:00	11,40	20,7	332,05
	04:00	13,00	21	351,85
	05:00	12,90	20,1	323,39
	06:00	12,90	20,5	351,92
	07:00	13,40	20,4	328,46
	08:00	14,10	21,2	352,30
	09:00	15,50	19,3	126,70
	10:00	14,20	19,4	-6,07
	11:00	15,30	20,4	-132,94
	12:00	16,20	22,6	-224,32
	13:00	13,60	23,6	-31,40
	14:00	14,00	23,3	-106,25
	15:00	13,20	22,4	81,29
	16:00	12,60	20,9	144,78
	17:00	12,60	20,9	237,38
	18:00	11,20	22,7	334,80
	19:00	10,80	20,6	385,97
	20:00	10,70	20,9	311,50
	21:00	10,60	22,3	399,78
	22:00	11,10	21,7	460,72
	23:00	10,70	21,1	399,63

pico mínimo no início do ensaio de $30 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$, devido ao facto de o equipamento demorar algum tempo a estabilizar. Depois verifica-se que U estabiliza por volta dos $32,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$.

Assim, pode concluir-se que esta câmara climática é pouco eficiente energeticamente, devido às perdas significativas de calor. É de salientar, ainda, que os valores obtidos no coeficiente global e no coeficiente convectivo de transmissão de calor são próximos dos valores ideais.

4.3. Elemento construtivo composto

As paredes compostas podem combinar materiais tradicionais com novos materiais, resultando em melhores resultados e desempenho. Os sistemas compostos de substrato permitem um menor peso e um manuseio mais fácil dos painéis das paredes. Como foi referido no capítulo 2, o elemento construtivo composto é constituído por uma parede de viroc, cortiça, plantas e substrato. (figura 4.12)

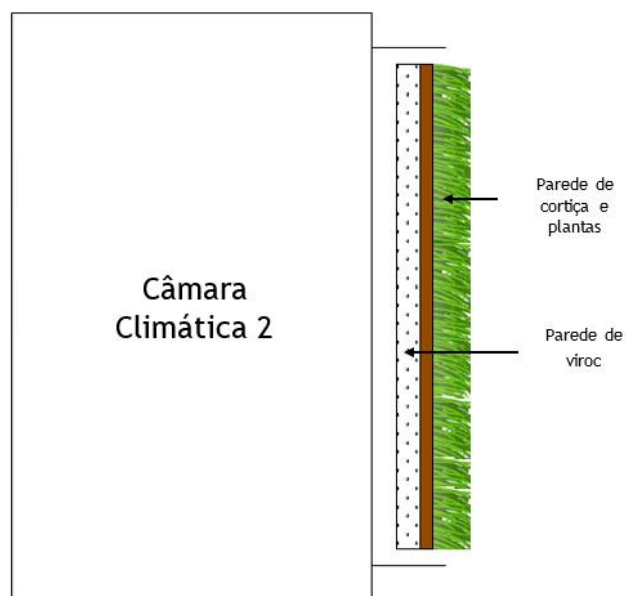


Figura 4.12 - Esquema da parede composta.

Para calcular os parâmetros U e h, é importante recorrer-se à temperatura interior da câmara climática (figura 4.13), pois está diretamente relacionada com os referidos parâmetros.

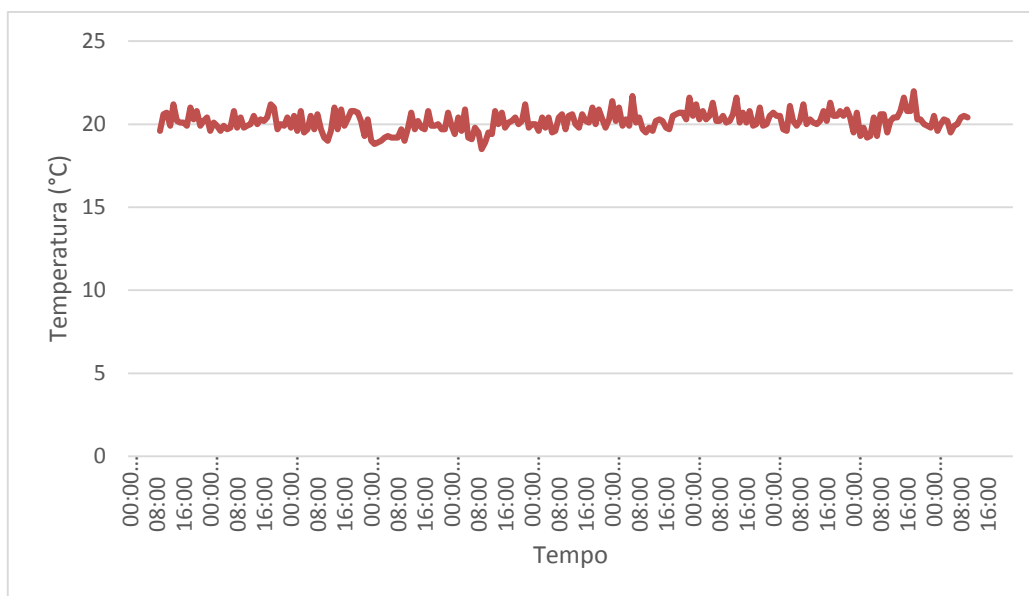


Figura 4.13 - Diagrama representativo da temperatura interior da câmara climática 2.

Verifica-se que na figura 4.13, as variações de temperatura são pequenas, cerca de 10%, mantendo-se mais ou menos constante comparativamente àquela que foi imposta (20 °C)

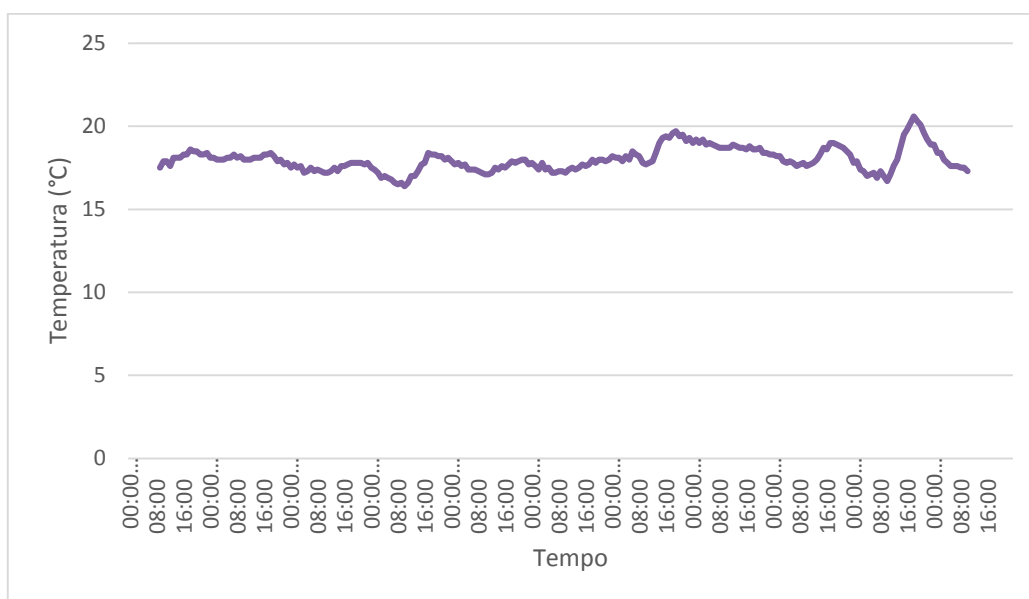


Figura 4.14 - Diagrama representativo da temperatura parede da câmara climática 2.

Constata-se que na figura 4.14, não se verificam grandes variações de temperaturas das parede, atingindo o seu valor máximo no dia 16 de fevereiro, às 18:00 de 20,6°C (tabela 4.5), devendo-se ao facto de o material desta parede exterior ser de reduzida condutibilidade térmica.

Tabela 4.5 - Valores experimentais da temperatura da parede da câmara climática 2.

Data	Hora (h)	Termopar_p2 (°C)
16-02-2014	00:00	17,8
	01:00	17,9
	02:00	17,4
	03:00	17,3
	04:00	17
	05:00	17,1
	06:00	17,2
	07:00	16,9
	08:00	17,3
	09:00	17
	10:00	16,7
	11:00	17,1
	12:00	17,6
	13:00	18
	14:00	18,7
	15:00	19,5
	16:00	19,8
	17:00	20,2
	18:00	20,6
	19:00	20,3
	20:00	20,1
	21:00	19,6
	22:00	19,2
	23:00	18,9

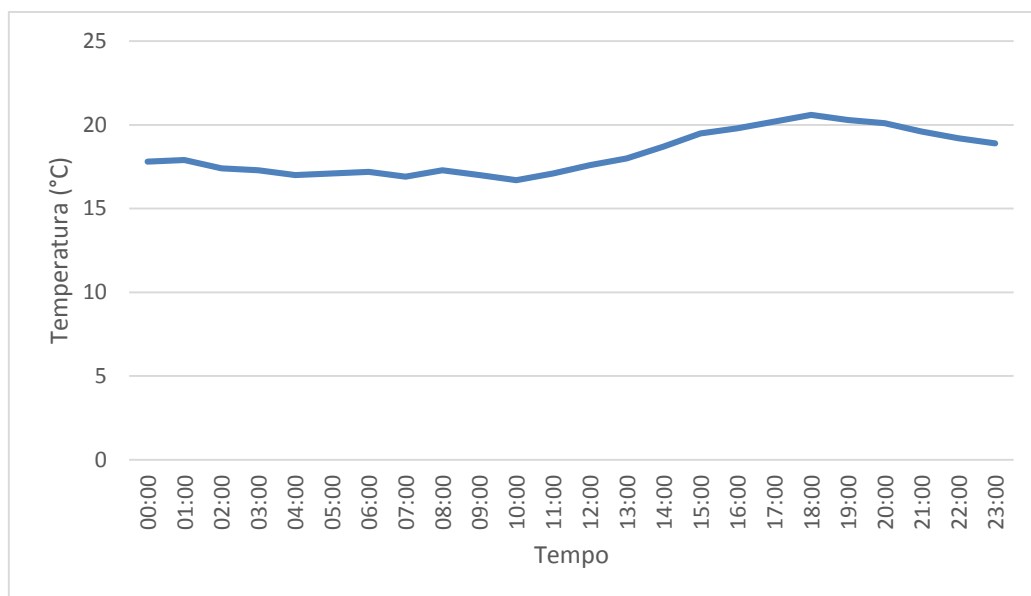


Figura 4.15 - Diagrama representativo da temperatura da parede da câmara climática 2, do dia 16 de fevereiro de 2014.

Na figura 4.15 estão calculados os valores diários instantâneos da tabela anterior (4.5), onde se verifica que o seu valor máximo é atingido às 18:00, do dia 16 de fevereiro sendo de 20,6 °C.

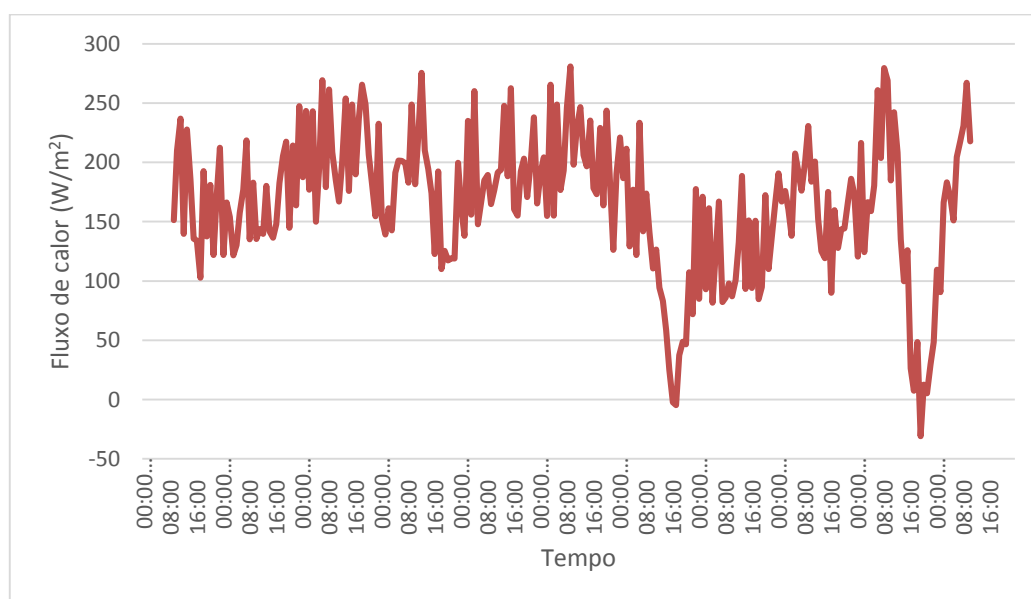


Figura 4.16 - Diagrama representativo do fluxo de calor da câmara climática 2.

Observa-se na figura 4.16, que o fluxo de calor mínimo é de $-30,89 \text{ W/m}^2$, no dia 16 de fevereiro, pelas 19:00, sendo este valor negativo pelas razões já apontadas atrás. Os valores da temperatura interior da câmara climática e da temperatura exterior são dados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultados experimentais do fluxo de calor.

Data	Hora (h)	T_e (°C)	Termopar_2 (°C)	Q2 (w/m ²)
16-02-2014	00:00	1,60	19,5	120,62
	01:00	1,30	20,7	216,35
	02:00	0,90	19,3	124,29
	03:00	0,60	19,8	166,36
	04:00	0,60	19,2	158,74
	05:00	0,20	19,3	180,39
	06:00	-0,20	20,4	260,93
	07:00	0,10	19,3	203,63
	08:00	0,90	20,6	279,63
	09:00	4,90	20,6	269,04
	10:00	6,10	19,5	184,64
	11:00	6,60	20,2	242,23
	12:00	7,80	20,4	208,27
	13:00	8,60	20,4	135,15
	14:00	9,10	20,8	99,79
	15:00	9,40	21,6	125,86
	16:00	9,60	20,8	26,45
	17:00	9,20	20,8	7,50
	18:00	6,20	22	48,59
	19:00	4,80	20,3	-30,89
	20:00	4,40	20,3	12,53
	21:00	4,10	20	5,33
	22:00	4,10	19,9	29,43
	23:00	3,80	19,8	48,44

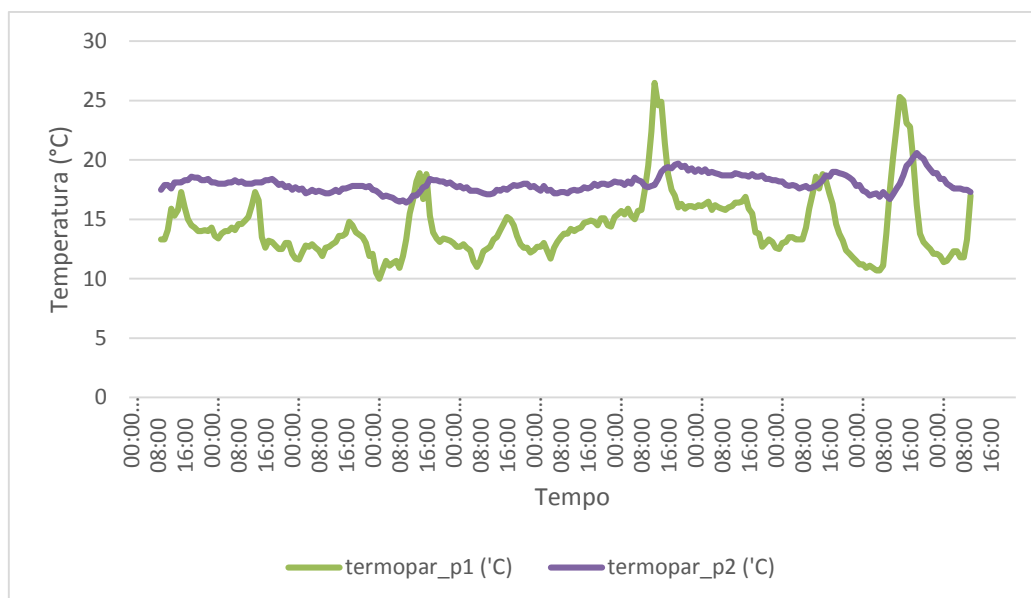


Figura 4.20 - Diagrama representativo das temperaturas das paredes das câmaras climáticas 1 e 2. A discrepância de valores das temperaturas das paredes de uma câmara para a outra é bem visível na figura 4.20. Este fenómeno deve-se ao facto de as câmaras serem constituídas por materiais isolantes externamente diferentes, não permitindo à câmara 2 ter maior perda de calor.

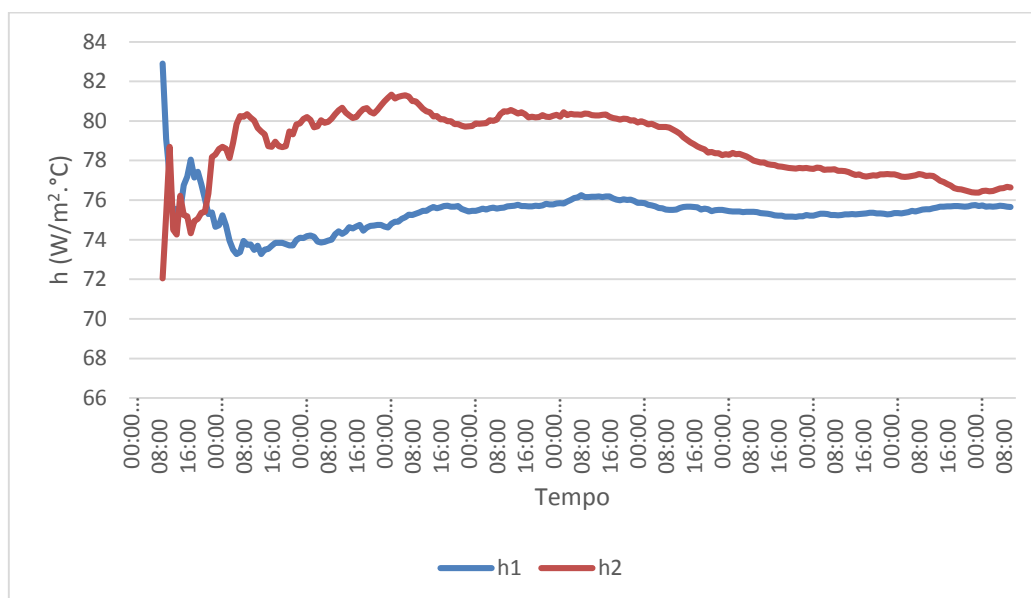


Figura 4.21 - Diagrama representativo dos coeficientes convectivos das câmaras 1 e 2.

Verifica-se na figura 4.21, que o h_1 e o h_2 tendem para terem valores próximos e este facto resulta da semelhança entre as condições de ambiente interior produzidas pelos sistemas de ar condicionado.

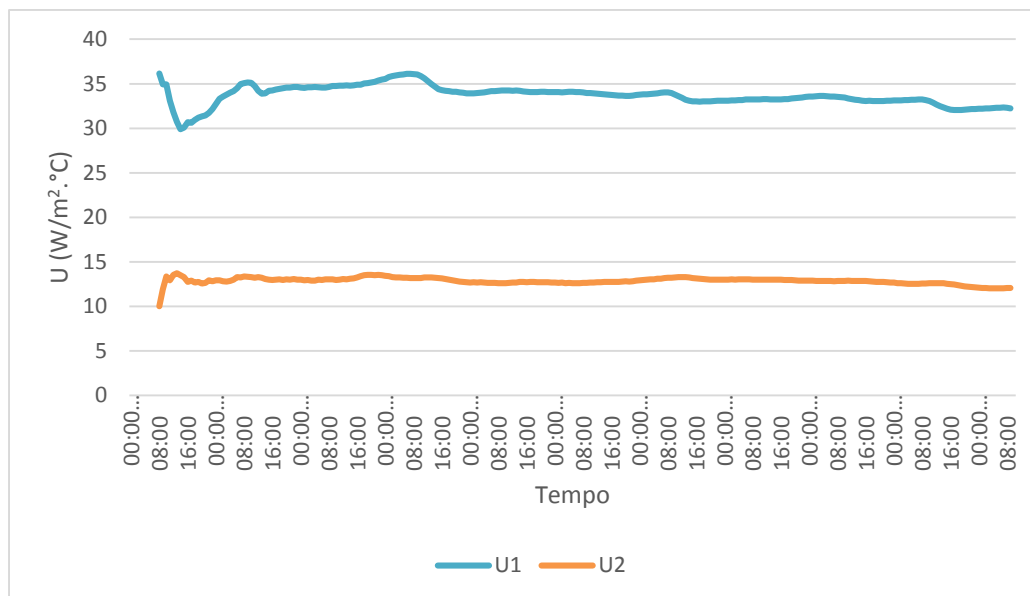


Figura 4.22 - Diagrama representativo dos coeficientes globais de transmissão de calor das câmaras climáticas 1 e 2.

Constata-se na figura 4.22 que U1, correspondente à parede da câmara 1, é muito maior que U2, referente à câmara 2 e isto deve-se ao facto de na câmara 1 o isolamento exterior ser feito apenas com uma placa de viroc, enquanto que a câmara 2 é feito com viroc, cortiça e plantas.

4.5. Nota conclusiva

Neste capítulo foram apresentaram-se os resultados dos estudos efetuados em duas câmaras climáticas, para se obter a avaliação do desempenho de dois elementos construtivos. Pode-se concluir que a câmara climática 2 tem perdas de calor muito baixas, menos de 40%, comparada com a câmara climática 1. Esta elevada diferença de perdas de uma câmara climática para a outra, deve-se ao facto de o material da parede exterior da câmara climática 2 ter uma condutibilidade térmica mais baixa do que a parede exterior da câmara climática 1.

5. Conclusão

A partir dos dados experimentais obtidos no estudo efetuado nesta dissertação, calcularam-se os coeficientes globais de transmissão de calor. Tendo em conta a pouca informação existente ao nível do cálculo experimental do coeficiente global de transmissão de calor, pode afirmar-se que os objetivos desta dissertação foram alcançados.

No estudo realizado não se pretendia calcular o estudo experimental do coeficiente global de transmissão de calor para vários elementos construtivos existentes no mercado, mas sim para os elementos construtivos especificados no trabalho realizado.

Podemos concluir que este estudo é bastante eficaz no que diz respeito ao consumo energético dos edifícios, podendo o procedimento utilizado ser adotado para a avaliação da qualidade térmica de elementos construtivos.

5.1. Recapitulação e principais conclusões

Inicialmente, fizeram-se leituras e a conseqüente revisão bibliográfica sobre o coeficiente convectivo de transmissão de calor, o coeficiente global de transmissão de calor e câmaras climáticas, para se ter conhecimento dos estudos já realizados.

Após se analisarem todos os métodos de transmissão de calor, verificou-se que, no nosso caso de estudo, temos presente todos eles: condução, convecção e radiação.

Por fim, fez-se a análise experimental do coeficiente convectivo de transmissão de calor e do coeficiente global de transmissão de calor, chegando-se também à conclusão que o nosso estudo atingiu os objetivos inicialmente propostos, uma vez que se pretendia analisar não só a transmissão de calor em elementos construtivos, como também determinar experimentalmente o coeficiente convectivo e global de transmissão de calor. Deste modo, conseguiu-se analisar o comportamento térmico dos elementos construtivos utilizados neste estudo concluindo-se que a câmara climática 2 tem perdas de calor muito baixas, menos de 40%, comparada com a câmara climática 1.

5.2. Sugestão para trabalho futuro

Para melhorar o comportamento térmico dos edifícios, propõe-se que se aplique numa câmara climática outros elementos construtivos, para se obter uma melhor comparação entre os materiais.

Deste modo propõe-se que seja calculado o coeficiente global de transmissão de calor em elementos construtivos, através de simulação de numérica.

Referências bibliográficas

Baldinelli, G. (2010). A methodology for experimental evaluations of low-e barriers thermal properties: Field tests and comparison with theoretical models. *Building and Environment*, 45(4), 1016-1024.

Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera F. P. & Dewitt, D. P. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th Ed.). Wiley.

Cengel, Y. A. (2003). *Heat Transfer - A Practical Approach* (2nd Ed.). McGraw-Hill.

Coulson, R. (2009). *An Investigation into the thermal properties of hemp and lime walls in dynamic heating, situations with reference to steady U-values*. MSc Thesis, University of East London, London United Kingdom.

Fokaides, P. A. & Kalogirou, S. A. (2011). Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Applied Energy*, 88 (12), 4358-4365.

Frota, A. B. & Schiffer, S. R. (2001). *Manual de controlo Térmico*. São Paulo: Studio Nobel.

Geoola, F., Kashti, Y., Levi, A. & Brickman, R. (2009). A study of the overall heat transfer coefficient of greenhouse cladding materials with thermal screens using the hot box method. *Polymer Testing*, 28 (5), 470-474.

Hall, M. R. (2007). Assessing the environmental performance of stabilised rammed earth walls using a climatic simulation chamber. *Building and Environment*, 42(1), 139-145.

Holman, J. P. (2009). *Heat Transfer* (10th Ed.). McGraw-Hill.

ISO 6946. Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method. International Standard, 1996.

Kuznik, F., Virgone, J. & Roux, J. J. (2008). Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation. *Energy and Buildings*, 40(2), 148-156.

Liu, J., Srebric, J. & Yu, N. (2013). Numerical simulation of convective heat transfer coefficients at the external surfaces of building arrays immersed in a turbulent boundary layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 61, 209-225.

Manso, M., Castro-Gomes., J., Silva, Pedro D., Virtudes, A.L., Delgado, F.M.G., Modular system design for vegetated surfaces: a proposal for energy-efficient buildings, BESS-SB13 California: Advancing towards net zero, Pomona, California, 24-25 June, 2013.

Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and Buildings*, 43 (12), 3419-3429.

Perini, K., Ottelé, M., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46 (11), 2287-2294.

Oziki, M. N. (1985). *Heat Transfer - A Basic Approach*. McGraw-Hill.

Pérez, G., Rinc n, L., Vila, A., González, J. M. & Cabeza, L. F. (2011). Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied energy*, 88 (12), 4854-4859.

Wong, N. H., Kwang Tan, A. Y., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P. Y., Chan, D. & Wong, N. C. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and environment*, 45 (3), 663-672.