



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Determinação do coeficiente de transmissão térmica em paredes de edifícios

Luís Filipe Alves Jorge

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

Orientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva (DEM-UBI)
Co-orientador: Prof. Doutor João Carlos Gonçalves Lanzinha (DECA-UBI)

Covilhã, Outubro de 2011





Dedicatória

À Minha Família





Agradecimentos

Para a elaboração deste trabalho contei com a colaboração de diversas pessoas, que sem elas não seria possível elaborar esta dissertação. Desejo desde já expressar os meus sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva, orientador e ao Prof. Doutor João Carlos Gonçalves Lanzinha, co-orientador de mestrado pela disponibilidade e apoio técnico prestado. Pela amizade e incentivo para a conclusão desta dissertação.

Ao Prof. Doutor Miguel Costa Santos Nepomuceno pela sua disponibilidade e ajuda durante o decorrer do presente trabalho.

Ao técnico do laboratório de transmissão de calor Sr. João Correia pela disponibilidade e ajuda prestada.

A todos aqueles que disponibilizaram as suas habitações para os ensaios efectuados.

Por fim, agradecer aos meus pais, à minha irmã, e aos meus amigos, em especial aos meus colegas Manuel Gomes e Pedro Martins que me ajudaram nos momentos mais complicados.

A todos expresso aqui o meu agradecimento.





Resumo

Os edifícios são responsáveis pelo consumo de cerca de 37,2% da energia total consumida na União Europeia. No entanto, este valor pode ser reduzido. Para esse efeito a Comissão Europeia criou a Directiva 2002/91/CE sobre o Desempenho Energético dos Edifícios que obrigou à implementação de um sistema de certificação energética.

Com a entrada em vigor em Portugal da nova regulamentação referente ao comportamento térmico dos edifícios, nomeadamente o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), obriga os projectistas e construtores a cumprir níveis de exigência mais elevados. Entre outros parâmetros complementares a quantificar sobre condições específicas estão os coeficientes de transmissão térmica superficiais e lineares dos elementos da envolvente e a classe de inércia térmica do edifício.

O objectivo do presente trabalho consiste em avaliar o desempenho térmico de paredes em edifícios com recurso a um equipamento multifunções Testo 435-2 e comparar os valores medidos *in situ* do coeficiente de transmissão térmica de paredes exteriores de edifícios de habitação com os valores teóricos calculados e analisar o comportamento destes.

Para tal, foram efectuados variados ensaios *in situ* para diferentes paredes da envolvente exterior de edifícios onde são conhecidas as características, sendo assim possível fazer uma caracterização pormenorizada das paredes e calcular o coeficiente global de transmissão térmica teórico, com base no modelo de cálculo descrito no RCCTE. Foram testadas paredes com a mesma solução construtiva para diferentes climas e diferentes orientações, de onde se atesta a capacidade deste instrumento, obter resultados nas diferentes situações testadas. Para a análise dos resultados foi elaborado um programa que ajuda na análise preliminar dos resultados obtidos.

Após a análise dos resultados dos diferentes ensaios, concluiu-se que o equipamento de medição utilizado depende de diferentes factores para obtenção de valores confiáveis. De entre estes factores estão as condições meteorológicas que condicionam muito a sua utilização.

Palavras-chave

Energia, Certificação Energética, Edifícios, Coeficiente de Transmissão Térmica, Paredes, Medição *in situ*





Abstract

Buildings are responsible for the consumption of 37.2% of total energy consumed in the European Union. However, this value can be reduced/improved. To this end the European Commission created the Directive 2002/91/EC on the Energy Performance of Buildings which forced the implementation of an European system of energy certification.

With the entry of new mandatory regulations in Portugal for the thermal performance of buildings, including the regulation of the characteristics of thermal performance of buildings, RCCTE (*Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*), it obliges the designers and builders to meet higher demand levels. Among other complementary parameters to quantify up specific conditions, are, the surface heat transfer coefficients, linear elements of the environment and the class of thermal inertia of the building.

The purpose of this study is to evaluate the thermal performance of walls in buildings using a multifunctional device Testo 435-2 and compare the values measured in situ, heat transfer coefficient of exterior walls of residential buildings, with the theoretical values calculated and analyze the behavior of these buildings.

To this end, various tests were carried out in situ for different walls surrounding the exterior of the buildings, where the characteristics are known, so it is possible to make a detailed characterization of the walls and calculate the overall heat transfer coefficient theoretical model, based on the calculation described in RCCTE. Walls were tested with the same constructive solution to different climates and different geographical orientations, confirming the ability of this instrument, results in different situations tested. For the analysis of the results it was developed a program that helps preliminary analysis of the results.

After analyzing the results of different tests, it was concluded that the measuring equipment used depends on various factors to obtain reliable values. Among these factors are weather conditions that affect their very use.

Keywords

Energy, Energy Certification, Buildings, Heat Transfer Coefficient, Walls, Measuring in situ





Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Perspectiva Geral	1
1.2.	O problema em estudo e a sua relevância	3
1.3.	Revisão bibliográfica	3
1.4.	Objectivos e contribuição da dissertação	8
1.5.	Visão geral da organização da dissertação	8
2.	Térmica de edifícios	11
2.1.	Transferência de Calor	11
2.2.	Mecanismos de transferência de calor	11
2.2.1.	Condução	11
2.2.2.	Convecção	13
2.2.3.	Radiação	14
2.3.	Propriedades térmicas das paredes	15
2.3.1.	Coeficiente global de transmissão térmica	17
2.3.2.	Inércia térmica	18
3.	Medição do coeficiente global	21
3.1.	Diferentes técnicas e métodos de medição do coeficiente global	21
3.1.1.	Técnicas de medição	22
3.1.2.	Métodos de medição	23
	Método de análise ‘MRQT’	23
	Método de análise ‘CTLSM’	24
	Método de análise Aittomaki	24
	Método das temperaturas sintéticas (<i>synthetic temperatures</i>)	27
	Método das temperaturas de superfície (<i>surface temperatures</i>)	28
	Método da Resposta de Frequência (<i>frequency responses</i>)	29
3.2.	Descrição do método utilizado e do instrumento de medição	30
3.2.1.	Método de cálculo	30



3.2.2.	Instrumento utilizado.....	31
3.3.	Programa MatLab da análise preliminar dos resultados.....	34
4.	Estudo de casos.....	37
4.1.	Metodologia experimental dos ensaios.....	37
4.2.	Apresentação e discussão dos casos estudados.....	41
	Ensaio 1.....	41
	Ensaio 2.....	45
	Ensaio 3.....	48
	Ensaio 4.....	51
	Ensaio 5.....	53
	Ensaio 6.....	56
	Ensaio 7.....	58
	Ensaio 8.....	61
	Ensaio 9.....	62
	Ensaio 10.....	66
	Ensaio 11.....	69
	Ensaio 12.....	71
	Ensaio 13.....	73
	Ensaio 14.....	75
	Ensaio 15.....	78
	Ensaio 16.....	81
	Ensaio 17.....	84
5.	Conclusão.....	89
5.1.	Recapitulação.....	89
5.2.	Principais conclusões.....	91
5.3.	Recomendações para trabalho Futuro.....	92
	Referências Bibliográficas.....	93



Lista de Figuras

Figura 2.1 - Faixa da condutibilidade térmica para vários estados da matéria em condições normais de temperatura e pressão [19].....	13
Figura 2.2 - Trocas de calor entre dois ambientes através de uma parede	16
Figura 2.3 - Efeito da inércia térmica com isolamento térmico pelo exterior [20]	19
Figura 2.4 - Efeito da inércia térmica com isolamento térmico pelo interior [20].....	20
Figura 3.1 - Esquema representativo do processo de transferência de calor numa parede ..	30
Figura 3.2 - Instrumento de medição Testo 435-2.....	32
Figura 3.3 - Sonda de rádio frequência para determinar temperatura e humidade	33
Figura 3.4 - Sonda de temperatura para determinar o valor U.....	33
Figura 3.5 - Esquema de temperaturas na transmissão térmica de uma parede	34
Figura 3.6 - Fluxograma de funcionamento do programa	36
Figura 4.1 - Esquema de montagem.	38
Figura 4.2 - Imagem ilustrativa da aplicação dos sensores de temperatura	38
Figura 4.3 - Esquema de representação da parede da câmara do laboratório e respectiva legenda.....	42
Figura 4.4 - Esquema de funcionamento da câmara do laboratório	43
Figura 4.5 - Gráfico dos resultados obtidos com identificação de zona para o ensaio 1	44
Figura 4.6 - Pormenor do gráfico dos valores de U no intervalo de zona 4 para o ensaio 1 ..	45
Figura 4.7 - Esquema de representação da parede da envolvente exterior do pólo das engenharias.....	46
Figura 4.8 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 2 com identificação de zona.....	47
Figura 4.9 - Pormenor do gráfico dos valores de U no intervalo de zona 4 para o ensaio 2 ..	48
Figura 4.10 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 3	49
Figura 4.11 - Fotografia da constituição da parede em estudo numa zona sem reboco interior	49
Figura 4.12 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 3 com identificação das zonas	51
Figura 4.13 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 12 com identificação das zonas.....	52



Figura 4.14 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 5 e 6 e respectiva legenda.....	53
Figura 4.15 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 4 com identificação das zonas.....	55
Figura 4.16 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 5 no intervalo de 118 a 126 .	56
Figura 4.17 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 6 com identificação das zonas.....	57
Figura 4.18 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 6 no intervalo de 91 a 109...	58
Figura 4.19 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 7 e respectiva legenda.....	59
Figura 4.20 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 6 com identificação das zonas.....	60
Figura 4.21 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 7 no intervalo de 118 a 148 .	61
Figura 4.22 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 15 com identificação das zonas.....	62
Figura 4.23 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 7.....	63
Figura 4.24 - Fotografia do pormenor da parede durante a construção.....	63
Figura 4.25 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 9 com identificação das zonas.....	65
Figura 4.26 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 9 no intervalo de 122 a 181 .	66
Figura 4.27 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 10 e respectiva legenda.....	67
Figura 4.28 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 10 com identificação das zonas.....	68
Figura 4.29 - Esquema de representação da parede testada nos ensaios 11 e 12 com respectiva legenda.....	69
Figura 4.30 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 11 com identificação das zonas.....	71
Figura 4.31 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 12 com identificação das zonas.....	72
Figura 4.32 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 12 no intervalo de 29 a 52...	72
Figura 4.33 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 13 e respectiva legenda.....	73
Figura 4.34 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 13 com identificação das zonas.....	75
Figura 4.35 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 14 e respectiva legenda.....	76
Figura 4.36 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 12 com identificação das zonas.....	77
Figura 4.37 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 14 no intervalo de 158 a 168	78
Figura 4.38 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 15 e respectiva legenda.....	79



Figura 4.39 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 15 com identificação das zonas.....	80
Figura 4.40 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 16 e respectiva legenda.....	81
Figura 4.41 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 16 com identificação das zonas.....	83
Figura 4.42 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 16 no intervalo de 17 a 105..	83
Figura 4.43 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 17 e respectiva legenda.....	84
Figura 4.44 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 17 com identificação das zonas.....	85
Figura 4.45 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 17 no intervalo de 97 a 183..	86





Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Descrição dos ensaios realizados	39
Tabela 4.2 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 1	42
Tabela 4.3 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.5	44
Tabela 4.4 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.6.....	45
Tabela 4.5 - Cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 2	46
Tabela 4.6 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.8	47
Tabela 4.7 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.9.....	48
Tabela 4.8 - Cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 3 e 4.....	50
Tabela 4.9 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.12.....	51
Tabela 4.10 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.13	52
Tabela 4.11 - Cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 5 e 6	54
Tabela 4.12 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.15	55
Tabela 4.13 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.16.....	56
Tabela 4.14 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.17	57
Tabela 4.15 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.18.....	58
Tabela 4.16 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 7	59
Tabela 4.17 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.20	60
Tabela 4.18 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.21.....	61
Tabela 4.19 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.22	62
Tabela 4.20 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 7	64
Tabela 4.21 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.25	65
Tabela 4.22 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.26.....	66
Tabela 4.23 - Cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 10.....	67
Tabela 4.24 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.28	68



Tabela 4.25 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para os ensaios 11 e 12	70
Tabela 4.26 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.30	71
Tabela 4.27 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.31	72
Tabela 4.28 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.32	73
Tabela 4.29 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 13	74
Tabela 4.30 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.34	75
Tabela 4.31 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 14	77
Tabela 4.32 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.36	77
Tabela 4.33 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.37	78
Tabela 4.34 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 15	80
Tabela 4.35 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.39	81
Tabela 4.36 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 16	82
Tabela 4.37 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.41	83
Tabela 4.38 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.42	83
Tabela 4.39 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 17	85
Tabela 4.40 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.44	86
Tabela 4.41 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.45	86
Tabela 5.1 - Tabela dos resultados obtidos	89



1. Introdução

1.1. Perspectiva Geral

No final da primeira década do século XXI, atravessamos um problema energético complexo e o consumo de energia primária em Portugal tem vindo a crescer consideravelmente nos últimos anos.

Na União Europeia, o consumo de energia final, entre 1998 e 2008 teve um aumento de cerca de 4,7%, passando de 1 116 Mtep (Milhões de toneladas equivalentes de petróleo) para 1 169 Mtep. Em Portugal, o consumo de energia final atingiu as 18,29 Mtep no ano de 2008, registando assim um aumento de 13,25% em relação ao consumo do ano de 1998 [1].

Comparando o consumo de energia por sectores verificou-se, em 2008, que o conjunto dos edifícios domésticos e de serviços é responsável pelo consumo de cerca de 37,2% do total de energia final na União Europeia, correspondendo a 435 Mtep.

A nível nacional, estes sectores, tal como na União Europeia, representam uma grande percentagem do consumo total de energia final, significando cerca de 27,7%, o equivalente a 5,07 Mtep em 2008 [1].

Portugal é um país com escassos recursos energéticos endógenos, nomeadamente, aqueles que asseguram a generalidade das necessidades energéticas da maioria dos países desenvolvidos (como o petróleo, o carvão e o gás). Esta escassez conduz a uma elevada dependência energética do exterior (81,2% em 2009), nomeadamente das importações de fontes primárias de origem fóssil [2].

Para além do problema da dependência que Portugal tem do exterior, resultante da excessiva utilização destes combustíveis, as questões de ordem ambiental têm sido objecto de grande cuidado a nível internacional, por se reflectirem em alterações climáticas e consequentes problemas ambientais. Com o intuito de inverter esta situação foi acordado o protocolo de Quioto que limita as emissões para a atmosfera de CO₂ e outros gases responsáveis pelo aumento do efeito de estufa (GEE) e que contribuem para o aquecimento global. Cada estado signatário do protocolo obrigou-se a tomar as medidas necessárias para limitar a produção de GEE no seu território.

Empenhado na redução da dependência energética externa, no aumento da eficiência energética e na redução das emissões de CO₂, o Governo Português definiu as grandes linhas estratégicas para o sector da energia. A nova Estratégia Nacional para a Energia (ENE 2020) tem como meta a incorporação em 20% de energias renováveis no consumo bruto de



electricidade até 2020, um mínimo vinculativo de 10% de incorporação de energias renováveis nos transportes e ainda uma redução de 20% do consumo de energia primária em 2020 [3].

Com o crescimento dos consumos verificados, de cerca de 4% e 7% ao ano, respectivamente nos edifícios residenciais e nos de serviços, é fundamental promover que os novos edifícios sejam menos consumidores, e que os existentes com pior desempenho possam ser forçados ou incentivados a melhorar [4].

Para dar cumprimento à redução de consumo de energia nos Edifícios residenciais e de serviços, aumentando a eficiência energética e ajudando assim à redução das emissões de CO₂, foi elaborada uma directiva com o objectivo de promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios na Comunidade Europeia, tendo em conta as condições climáticas externas e as condições locais, bem como as exigências em matéria de clima interior e a rentabilidade económica. Esta directiva estabelece requisitos em matéria de enquadramento geral para uma metodologia de cálculo de desempenho energético dos edifícios, exigindo ainda a aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético de novos edifícios e grandes edifícios existentes que sejam sujeitos a importantes obras de renovação, assim como a obrigação de certificação energética dos edifícios e a uma inspecção regular dos sistemas de climatização [5].

Com a entrada em vigor em Portugal da nova regulamentação referente ao comportamento térmico dos edifícios, nomeadamente o Decreto-lei nº80/2006 - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), a caracterização do comportamento térmico destes faz-se através da quantificação de um certo número de índices e de parâmetros. Entre estes estão as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento e as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento, as necessidades nominais anuais de energia para produção de águas quentes sanitárias, bem como as necessidades globais de energia primária.

Entre outros parâmetros complementares a quantificar sob condições específicas estão os coeficientes de transmissão térmica superficiais e lineares dos elementos da envolvente e a classe de inércia térmica do edifício [6].

A certificação energética dos edifícios existentes aplica-se a edifícios em que a data de entrada do pedido de licenciamento ou autorização de construção da edificação na entidade licenciadora é anterior à entrada em vigor do Sistema de Certificação Energética e Qualidade do Ar Interior de Edifícios (SCE) (1 de Julho de 2007 para edifícios com mais de 1000 m² e 1 de Julho de 2008 para edifícios com menos de 1000 m²). A partir de 1 de Janeiro de 2009 passaram a ser abrangidos pelo Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar todos os edifícios existentes que se pretendam transaccionar [7].



Embora a certificação energética de edifícios existentes já seja uma prática corrente, esta baseia-se na inspecção visual e na consulta dos elementos de projecto, que no caso do cálculo dos coeficientes de transmissão térmica em paredes não se apresenta como um bom método. Nestes casos importa justificar e verificar cientificamente as características de resistência térmica dos elementos construtivos, ou seja, há necessidade de se realizarem ensaios *in situ* (em campo), não destrutivos, para melhor se poder avaliar o comportamento térmico do edifício já construído. É com este intuito que se apresenta nesta dissertação uma solução para a medição *in situ*, que foi testada em diferentes condições de forma a dar a conhecer as funcionalidades e a forma de utilização da técnica de medição utilizada.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

Desde os primórdios da nossa existência que o homem teve necessidade de construir abrigos para se proteger. Com o passar do tempo e a evolução da humanidade foram aumentando as exigências destes abrigos que assim foram evoluindo progressivamente até aos edifícios actuais.

Cada vez mais a componente “conforto em edifícios”, aos mais variados níveis, é uma exigência imposta pelos utilizadores e organismos competentes, nomeadamente através de legislação e regulamentação térmica associada. Tendo em consideração que nos dias de hoje vivemos uma crise energética aliada à crescente escassez de recursos e a um crescente aumento do consumo de energia no sector dos edifícios, decorrente do aumento das exigências impostas pelo homem e da evolução tecnológica desregrada, importa agora evoluir no sentido da redução dos consumos de energia, na poupança dos recursos naturais e na defesa do ambiente, garantindo o mesmo nível de exigências a nível de conforto.

Torna-se insustentável o aumento dos consumos de energia para dar cumprimento às exigências de conforto impostas pelo homem e importa tornar os edifícios mais eficientes, avaliar o seu grau de eficiência e implementar medidas de melhoria.

O presente trabalho trata do estudo de uma das principais causas dos elevados consumos de energia para a climatização em edifícios, a eficiência térmica das paredes e o método para determinação das suas características *in situ*.

1.3. Revisão bibliográfica

Esta temática tem vindo a ser estudada ao longo destes últimos anos e tem sido objecto de alguma investigação. Neste subcapítulo apresenta-se uma recolha bibliográfica de estudos realizados, que nos permite o enquadramento deste trabalho, dando a conhecer as várias



investigações realizadas utilizando diferentes métodos, com o intuito de avaliar a qualidade térmica de paredes em edifícios.

Em 2003, Lucio Laurenti et al. apresentaram um método para calcular *in situ* a resistência térmica de uma parede através da análise dos fluxos de calor de entrada e saída e de amostras de temperaturas da superfície. O método apresentado modela a resposta térmica transitória de uma parede através de uma relação linear com os parâmetros constantes, que liga o fluxo de calor instantâneo da superfície interna da parede com a diferença entre as temperaturas de ambas as superfícies, interna e externa, dessa mesma parede no mesmo instante. Inicialmente este método foi aplicado a dados simulados conforme o indicado na EN 12494, de 1996. Este estudo consistiu em analisar três soluções de paredes diferentes: uma parede simples de alvenaria sem revestimento, uma parede de isolamento com revestimento e uma parede composta de alvenaria, isolamento e revestimento com diferentes espessuras.

O método em estudo permitiu obter valores confiáveis da resistência térmica para todos os conjuntos de dados simulados. Os desvios, em percentagem, entre a resistência térmica real e calculada são muito baixos para o primeiro tipo de parede em causa (geralmente $\pm 0,10\%$ ou menos). Os maiores desvios foram obtidos para as paredes compostas ($\pm 0,1\%$ com margem de erro de $\pm 3,5\%$), onde os valores mais altos são referentes a períodos de medição caracterizados por diferenças de temperatura interna/externa baixas.

Para se obterem valores confiáveis para a resistência térmica são necessários períodos de medição de curta duração no caso da parede simples (20h-30h), períodos de média duração de 50h a 90h (no verão) para paredes com isolamento e períodos de longa duração, que podem ir de 80h-100h (nas estações do ano mais frias) até 240h-300h (no verão) para paredes compostas.

Uma comparação com o método da média põe em evidência que a dimensão do período de tempo supõe a mesma ordem de grandeza que aquela obtida através do método dinâmico proposto, se a média da diferença de temperaturas interna/externa é maior do que $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e se desvios de $\pm 5\%$ até $\pm 10\%$ forem aceites. De qualquer forma, quando a média das diferenças de temperaturas interna/externa é inferior a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, o método da média não pode ser usado [8].

Em 2005, M. Cucumo et al. apresentaram um método para o cálculo experimental *in situ* da condutância de uma parede, baseado na medição do fluxo de calor no interior da parede e das temperaturas da superfície interna e externa, usando o método de cálculo das diferenças finitas.

Para tal, os autores usaram uma estação de teste, existente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade da Calabria, que consistia numa única sala, com cinco paredes feitas com materiais de construção com inércia térmica semelhantes às de edifícios reais e



devidamente isoladas, e uma parede “transmissiva”. Esta sala foi construída em cima de uma plataforma giratória, para que a parede transmissiva pudesse variar em relação ao sol.

Ao aplicar o método a uma das paredes teste, em diferentes períodos de tempo, os valores obtidos para a condutância térmica estavam de acordo com os valores indicados pelo método sugerido na pré-regulação EN 12494. Sendo que a utilização deste método, presente na pré-regulação EN 12494, tinha limites na sua utilização, só podendo ser aplicado quando a energia térmica acumulada na parede fosse insignificante quando comparada com a energia térmica que passava através da parede durante o período do teste; o método proposto por estes autores pode ser usado de um modo mais geral e permite que seja obtido o valor equivalente da capacidade térmica [9].

Em 2008, Peng e Wu, apresentaram um estudo sobre três métodos de medição *in situ* da resistência térmica em edifícios. As diferenças entre os resultados obtidos pelos três métodos são tão pequenas, que qualquer um pode ser usado na medição da resistência térmica, valor-R de edifícios, de forma a satisfazer as exigências dos projectos práticos. Cada um destes três métodos tem as suas vantagens. O método da temperatura sintética (artificial) (*method of synthetic temperatures*) requer somente o valor do fluxo de calor no interior da superfície das paredes do edifício e as temperaturas sintéticas (artificiais) do interior e exterior. O segundo método, método da temperatura da superfície (*method of surface temperatures*) necessita do valor do fluxo de calor no interior da superfície da parede assim como a temperatura do interior e exterior da superfície. O método da resposta de frequência (*method of frequency responses*) refere-se à média das temperaturas sintéticas (artificiais) do interior e do exterior e à média das temperaturas do interior da superfície da parede.

Um dos principais erros de teste que pode acontecer na medição *in situ* da resistência térmica, ou seja, do cálculo do valor-R, vem da avaliação da taxa do fluxo de calor. Na prática, o medidor do fluxo de calor tem de ser rebocado ou embutido na amostra, o que vem alterar as condições da superfície em estudo, levando a um aumento dos campos da temperatura na parede e em torno do medidor do fluxo de calor. Todas estas alterações irão levar a diferenças entre a parede de teste e os casos reais. Ao que os autores chamam de erro de medição dos termofluxímetros. Tendo em conta este ponto, o método da resposta de frequência é sugerido pelos autores como o melhor e de mais fácil utilização para medir o valor-R de edifícios *in situ*, visto não necessitar nos seus cálculos do valor do fluxo de calor na parede.

Por outro lado, todos os valores-R calculados por estes três métodos têm menor valor do que o valor em projecto. As principais razões para estas diferenças podem estar no facto de as superfícies dos edifícios teste não estarem tão secas ou poderem estar afectadas por pontes térmicas, como vigas ou pilares. Mas outros factores como erros nos termopares ou nos termofluxímetros podem contribuir para as diferenças registadas [10].



Paul Baker, num estudo feito entre 2007 e 2008 para o Centre for Research on Indoor Climate & Health, Glasgow Caledonian University (GCU), utilizou uma amostra de edifícios que representavam a alvenaria de construção tradicional na Escócia, para calcular *in situ* o coeficiente global de transmissão térmica, valor-U das paredes. Foram feitas medições do fluxo de calor directamente em cada parede usando termofluxímetros aplicados em superfícies internas, e das temperaturas internas e externas dos edifícios.

O principal objectivo do estudo foi avaliar o desempenho térmico real dos edifícios de construção tradicional, a fim de fornecer orientações para a avaliação de desempenho energético e das medidas a tomar para a implementação da eficiência energética nesses mesmos edifícios.

Foram calculados valores-U de vinte paredes que correspondiam a uma amostra das construções de alvenaria tradicional da Escócia. Para paredes com reboco reforçado, aumentando a espessura da parede, obteve-se um menor valor-U. No caso em que as paredes tinham acabamentos em ripa e gesso cartonado, o valor-U obtido era menor. Demonstrando-se assim o efeito isolante de uma cavidade de ar.

O estudo deste autor prosseguiu no inverno seguinte com o objectivo de alargar o alcance geográfico aos vários tipos de alvenaria no interior da Escócia e também medir valores-U de pisos e telhados [11].

Em 2009, G. Fivos Sargentis et al. usaram um método não destrutivo, que utilizava imagens de infravermelhos para determinar *in situ* o comportamento térmico de materiais de construção.

Através de imagens de infravermelhos podem ser determinadas pontes térmicas, humidade absorvida pelos materiais usados nos edifícios, bem como outros parâmetros relacionados com o comportamento térmico dos edifícios.

As perdas de calor num edifício são por estes autores distinguidas em perdas através da construção da habitação e perdas por ventilação e infiltração.

As perdas de calor através da habitação estão relacionadas com a resistência térmica das suas diferentes partes e componentes. Para determinar a resistência térmica do edifício é determinada a resistência térmica da superfície exterior que depende das condições meteorológicas.

Este método, imagens infravermelhas, é usado geralmente numa abordagem para uma análise qualitativa, tornando-se assim numa ferramenta de análise quantitativa, melhorando assim a precisão da determinação *in situ* da condutibilidade térmica de edifícios. Além disso, as



perdas de calor nos edifícios, tais como pontes térmicas, podem ser detectadas e analisadas quantitativamente, podendo então levar a medidas para melhorar o isolamento térmico [12].

Fenghao Wang, em 2010 apresentou um método de medição da resistência térmica de uma parede *in situ* tendo em consideração a velocidade do vento, baseando-se nos fluxos de calor no interior e exterior da superfície e nas temperaturas da amostra.

Neste estudo a resistência térmica da parede é determinada, simulando 72 horas de teste. Analisando os resultados obtidos usando este método, o método da média e o método da análise dinâmica, foi assim provada a validade do método apresentado.

Os autores concluíram através do estudo, que a velocidade do vento tem pouco impacto nas temperaturas do interior e exterior da superfície da parede. Quando a velocidade do vento varia de 0 a 6 m/s, a temperatura varia no máximo 1,3 °C e o fluxo de calor no exterior aumenta à medida que a velocidade do vento aumenta.

Ficou portanto teórica e experimentalmente provado que, comparando com os métodos da média e da análise dinâmica, o método de análise de dados considerando a velocidade do vento para a medição da resistência térmica das paredes tem um erro de análise muito pequeno, melhorando assim a precisão dos dados [13].

Min-Hwi Kim, et al. (2010) realizaram um estudo com o objectivo de determinar os coeficientes de transmissão térmica global (valor-U) das paredes exteriores, pisos e telhados de uma residência tradicional coreana. Para tal, realizaram medições *in situ* do fluxo de calor e das diferenças de temperatura em cada habitação. Os valores-U obtidos foram depois comparados com valores já existentes para os mesmos edifícios e com valores actuais para edifícios residenciais. Quanto à medição *in situ*, foram utilizados um termofluxímetro e um termopar tipo T ligados em conjunto na superfície interna e externa de cada componente de construção. Os dados da medição em tempo real foram registados durante três dias consecutivos no período de verão. Os valores-U obtidos estão de acordo com valores já existentes para edifícios residenciais tradicionais, no entanto estes são superiores aos valores-U dos edifícios actuais.

A partir dos resultados deste estudo concluiu-se que a construção tradicional coreana não tem um desempenho térmico competitivo com os edifícios actuais. No entanto, a simulação energética realizada neste estudo mostra ainda que os edifícios de construção tradicional têm maior inércia térmica, podendo assim armazenar maior quantidade de energia e tornarem-se competitivos com os edifícios mais recentes, sendo esta a sua principal característica [14].

Pier Giorgio Casaratto et al. (2011), depois de muitos estudos terem já sido realizados de forma a progredir na medição da condutância térmica *in situ*, apresentou uma pesquisa que tinha por objectivo determinar a influência dos diferentes tipos de dados de entrada no



resultado final. Primeiro o problema da análise de dados de entrada com oscilações significativas de temperatura; e depois o efeito da presença do medidor de fluxo de calor no campo térmico do elemento analisado. Para os dois problemas foi feita uma estimativa global dos desvios ocorridos, concluindo-se que não influenciaram significativamente os resultados, sendo no entanto importante considerar estas duas situações para que o uso destes instrumentos de medição seja melhorado. Estes estudos foram baseados em simulações com o método dos elementos finitos [15].

1.4. Objectivos e contribuição da dissertação

O objectivo deste trabalho consiste na análise do desempenho térmico de paredes da envolvente de Edifícios com recurso a um equipamento de medição do coeficiente global de transmissão térmica. Pretende-se testar um equipamento desenvolvido para este fim de forma a avaliar em que medida se obtêm ou não bons resultados na avaliação *in situ* do coeficiente global de transmissão térmica em paredes. Vão ser realizados vários ensaios *in situ* a paredes em que se conhecem as características para diferentes condições atmosféricas de onde vão ser obtidos os valores-U que vão ser comparados com os valores teóricos calculados com base nas características das mesmas. Pretende-se avaliar o desempenho do instrumento utilizado e no final dar recomendações para a utilização do mesmo.

1.5. Visão geral da organização da dissertação

O presente trabalho encontra-se organizado em 5 capítulos.

Na primeira parte do trabalho (capítulo 2), descrevem-se os vários mecanismos de transferência e propagação do calor, a definição da condutibilidade térmica de um material e do coeficiente de transmissão térmica de um elemento construtivo (valor-U) referem-se ainda as características térmicas das paredes.

No Capítulo 3 apresenta-se uma introdução e descrição da medição do coeficiente global de transmissão térmica em elementos construtivos para avaliação do comportamento térmico de edifícios, bem como uma descrição de diferentes técnicas e métodos não destrutivos utilizados para este fim. Descreve-se ainda o modelo de cálculo utilizado pelo instrumento de medição para este estudo, bem como a descrição do instrumento utilizado e exemplifica-se a forma de cálculo para os valores-U. Descreve-se o procedimento de execução do presente trabalho e é apresentado um programa elaborado em MatLab para despistar os valores auferidos em condições irregulares.



No capítulo 4. Após breve introdução, são descritos os elementos construtivos analisados, o procedimento experimental, apresenta-se a análise e interpretação dos resultados obtidos. Os casos estudados são descritos pormenorizadamente e é efectuada a apresentação da respectiva solução construtiva. A análise de resultados é efectuada caso a caso através da avaliação da zona no gráfico caracterizada pelo programa em MatLab de análise preliminar dos resultados e da verificação das curvas dos parâmetros medidos, permitindo verificar a evolução das temperaturas interior, da parede e exterior, bem como dos valores dos coeficientes de transmissão térmica.

Por último, no Capítulo 5 apresentam-se a recapitulação com conclusões retiradas do presente trabalho, principais conclusões e algumas considerações sobre trabalho futuro.





2. Térmica de edifícios

2.1. Transferência de Calor

Transferência de calor é o nome dado ao processo de transferência de energia sobre a forma de calor. O calor é definido como a forma de energia que é transferida entre dois sistemas ou um sistema e a sua vizinhança devido a um gradiente de temperatura. Isto quer dizer que uma transferência de energia é feita sobre a forma de calor, apenas se existir uma diferença de temperatura. Logo não existe transferência de calor entre dois sistemas que se encontrem à mesma temperatura. Calor é energia em transição, sendo identificada apenas quando atravessa uma fronteira de um sistema [16].

2.2. Mecanismos de transferência de calor

Existem três formas distintas de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Todas as formas de transferência de calor requerem a existência de uma diferença de temperatura. A transferência de calor processa-se do meio que tem uma temperatura mais elevada para o que tem uma temperatura mais baixa.

Quando existe um gradiente de temperatura num meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido, usamos o termo condução para nos referir à transferência de calor que irá ocorrer através do meio. Em contraste, à transmissão de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento quando estes se encontram a diferentes temperaturas, dá-se o nome de convecção. O terceiro modo de transmissão de calor é conhecido por radiação térmica. Todas as superfícies a uma temperatura não nula emitem energia na forma de ondas electromagnéticas. Assim na ausência de um meio que as intercale, existe uma transferência de calor por radiação entre duas superfícies que se encontram a diferentes temperaturas [17].

2.2.1. Condução

A condução é definida como a transferência de energia das partículas com um nível energético superior para as adjacentes com um nível inferior, como resultado da interacção entre as partículas. Esta forma de transmissão de calor pode ocorrer em sólidos, líquidos ou gases. Nos dois últimos, deve-se à colisão das moléculas durante o seu movimento aleatório. Nos sólidos, resulta do efeito combinado da vibração das moléculas no interior da malha e da energia transportada por electrões livres.

A taxa de condução de calor \dot{Q}_{cond} através de uma parede de espessura constante Δx é proporcional à diferença de temperatura ΔT entre as superfícies e a área A normal à direcção da transferência de calor, sendo inversamente proporcional à espessura da parede. Assim,



$$\dot{Q}_{cond} = k_t A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Em que a constante de proporcionalidade k_t representa a condutibilidade térmica do material.

No caso limite de $\Delta x \rightarrow 0$, a equação 1 reduz-se à sua forma diferencial

$$\dot{Q}_{cond} = -k_t A \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

Conhecida como lei de Fourier da condução de calor, esta lei indica que a taxa de condução de calor numa dada direcção é proporcional ao gradiente de temperatura nessa mesma direcção. Como o calor é conduzido na direcção da temperatura decrescente, o gradiente desta torna-se negativo quando a temperatura decresce com o aumento de x . Por isso foi adicionado o sinal negativo à equação para tornar a transferência de calor positiva no sentido positivo de x .

Nos sólidos, a condução de calor é o resultado de dois efeitos combinados: o da malha, devido às ondas de vibração induzidas na malha pelo movimento periódico vibracional das moléculas localizadas em posições relativamente fixas; e o efeito da energia transportada pelos electrões livres.

A condutibilidade térmica k_t quantifica a capacidade dos materiais em conduzir calor. Materiais com alta condutibilidade térmica conduzem calor de forma mais rápida que os materiais com baixa condutibilidade térmica. Desta forma, materiais com condutibilidade térmica elevada são utilizados como dissipadores de calor e materiais de baixa condutibilidade térmica são utilizados como isolantes térmicos. A condutibilidade térmica é uma característica específica de cada material, e depende da temperatura e da pureza do material (especialmente sob baixas temperaturas). Em geral, os materiais tornam-se mais condutores de calor com o aumento da temperatura. A condutibilidade térmica equivale à quantidade de calor Q transmitida através de uma espessura L , numa direcção normal à superfície de área A , devido a uma variação de temperatura ΔT quando a transferência de calor se deve apenas à variação de temperatura.

Na figura 2.1 podemos ver a comparação dos vários materiais relativamente à sua condutibilidade térmica. Pode-se observar que os melhores condutores são os metais puros e os piores são os gases. Na faixa intermediária encontram-se as ligas, os sólidos não metálicos e os líquidos.

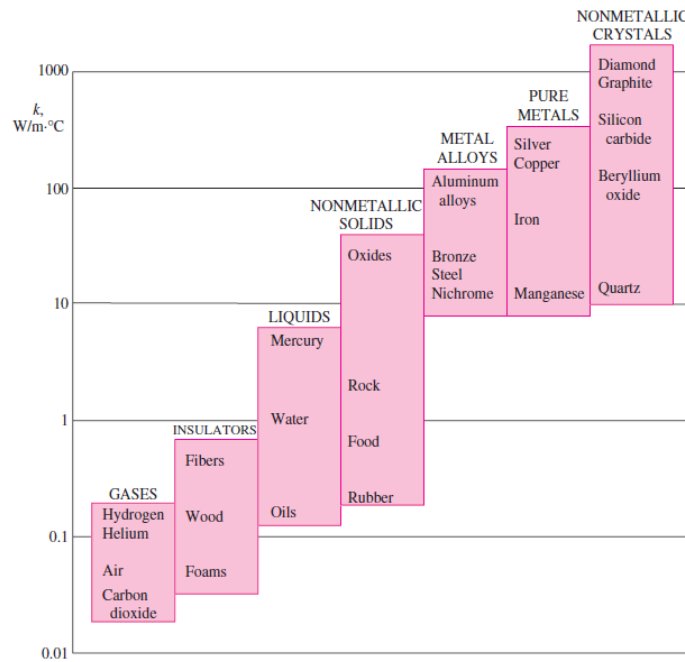


Figura 2.1 - Faixa da condutibilidade térmica para vários estados da matéria em condições normais de temperatura e pressão [19]

A condução térmica dá-se por meio de dois efeitos distintos: a migração de electrões livres e através de ondas vibracionais na rede. Desta forma a condutibilidade térmica k_t é a soma da migração de electrões k_{el} com a componente de vibração da rede k_r .

$$k_t = k_{el} + k_r \quad (2.3)$$

Numa primeira aproximação o valor de k_{el} é inversamente proporcional à resistividade eléctrica ρ_{el} . Para metais puros, que possuem um valor baixo de ρ_{el} , o valor de k_{el} é muito maior do que o de k_r . Ao contrário, para ligas, que possuem um valor de ρ_{el} substancialmente mais elevado, a contribuição de k_r deixa de ser desprezível. Por sua vez, para os sólidos não-metálicos o valor de k_t passa a ser determinado principalmente por k_r , que depende da frequência das interações entre os átomos dos retículos. A regularidade de arranjo dos retículos produz um efeito importante em k_r , com os materiais cristalinos (bem ordenados), como o quartzo que possui uma condutibilidade térmica superior à dos materiais amorfos, como o vidro [16,17,18].

2.2.2. Convecção

A convecção é uma forma de transferência de calor entre a superfície de um sólido e a adjacente líquida ou gasosa em movimento, envolvendo os efeitos combinados da condução e do movimento do fluido. Quanto mais rápido for este último, maior será a transferência de calor por convecção. Na ausência de qualquer movimento, esta transferência entre a superfície do sólido e do fluido é puramente condutiva. Assim, o movimento do fluido incrementa a transferência de calor mas dificulta a determinação da sua taxa.



No caso de um fluido ser impelido a escoar-se no interior de um tubo ou sobre uma superfície externa, através de uma ventoinha, bomba ou através do vento, a convecção denomina-se convecção forçada. Se o movimento do fluido for causado por forças de impulsão induzidas por diferenças de densidades, devido à variação de temperatura, a convecção chama-se convecção natural ou livre.

A taxa de transferência de calor por convecção \dot{Q}_{conv} é determinada pela lei de Newton do arrefecimento:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_f) \quad (2.4)$$

Em que h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, A a superfície através da qual se processa a transferência de calor, T_s a temperatura da superfície e T_f a temperatura do fluido afastado da superfície.

O coeficiente de transferência de calor por convecção h não é uma propriedade do fluido, sendo um parâmetro determinado experimentalmente cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção, como a geometria da superfície, a natureza do movimento, as propriedades e a velocidade do fluido. Os valores típicos de h , em $W/(m^2.K)$, são 2 - 25 para convecção natural de gases, 50 - 1 000 para convecção natural de líquidos, 25 - 250 para a convecção forçada de gases, 50 - 20 000 para a convecção forçada de líquidos e 2 500 - 100 000 para a convecção em processos de ebulição e de condensação [16,17,18].

2.2.3. Radiação

A radiação é a energia emitida pela matéria, sob a forma de ondas electromagnéticas (fotões), devido a alterações nas configurações de átomos ou moléculas. Ao contrário da condução e da convecção, a transferência de energia por radiação não requer a presença de um meio intermédio. De facto esta forma de transferência de energia é a mais rápida (processa-se à velocidade da luz), não sofrendo qualquer decréscimo na presença de vácuo, sendo desta forma que a energia do sol alcança a terra.

Nos estudos de transferência de calor, o interesse recai sobre a radiação térmica emitida pelos corpos devido à sua temperatura. Todos os corpos com uma temperatura acima do zero absoluto emitem radiação térmica.

A radiação é um fenómeno volumétrico, e todos os sólidos, líquidos ou gases, emitem, absorvem ou transmitem radiação a níveis variados. Contudo, a radiação é considerada um fenómeno de superfície no caso de sólidos opacos como os metais, a madeira ou pedra, visto que a radiação emitida pela região interior do corpo nunca consegue atingir a superfície, e a incidente é geralmente, absorvida pelas camadas superficiais que apenas medem poucos micrones.



A taxa máxima de radiação que pode ser emitida da superfície de um corpo a uma temperatura absoluta T_s é dada pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{Q}_{emit,m\acute{a}x} = \sigma AT_s^4 \quad (2.5)$$

Em que A é a superfície e $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2.K^4)$ representa a constante de Stefan-Boltzmann. Uma superfície idealizada que emite o máximo de radiação denomina-se corpo negro, sendo a radiação emitida chamada radiação de corpo negro.

A emitida por todas as superfícies reais é menor do que a emitida por um corpo negro à mesma temperatura, sendo expressa por:

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \sigma AT_s^4 \quad (2.6)$$

Em que ε é a emissividade da superfície, sendo uma propriedade que varia entre $0 \leq \varepsilon \leq 1$ e representa a comparação de uma superfície com um corpo negro, que corresponde a $\varepsilon = 1$.

Outra importante propriedade da radiação de uma superfície é a absortividade, α , que é a fracção da energia de radiação incidente sobre uma superfície que é absorvida por esta. Assim como a emissividade, o seu valor está compreendido entre 0 e 1. Um corpo negro absorve toda a radiação que incide sobre ele. Em resumo um corpo negro é um absorvedor perfeito ($\alpha = 1$), bem como um emissor perfeito ($\varepsilon = 1$) [16,17].

2.3. Propriedades térmicas das paredes

As paredes são elementos construtivos separadores de ambientes. As paredes da envolvente exterior dos edifícios separam o ambiente interior do ambiente exterior. Se considerarmos que a temperatura do ambiente interior é superior à temperatura do ambiente exterior, o fluxo de calor através da parede estabelecer-se-á do interior para o exterior, como ilustrado na figura 2.2.

O calor transferido entre o ambiente interior e o ambiente exterior processa-se por três etapas seguidas agrupadas em série umas a seguir às outras: q_1 , q_2 e q_3 [20].

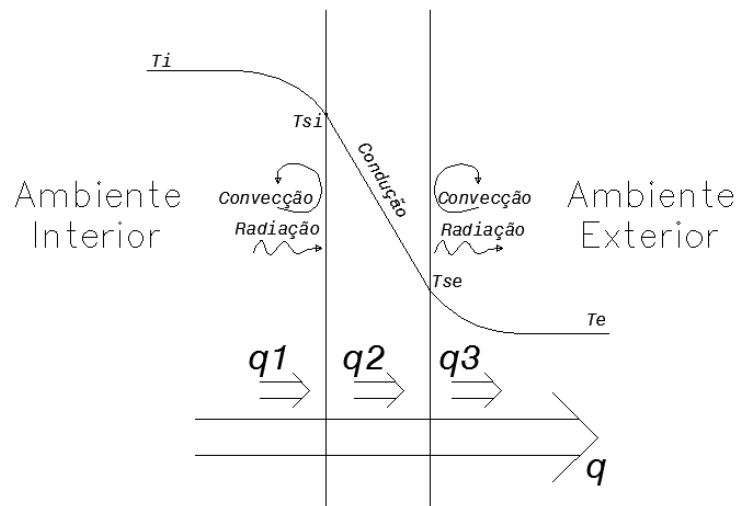


Figura 2.2 - Trocas de calor entre dois ambientes através de uma parede

Na primeira etapa é promovida a troca de calor por radiação e convecção entre o ambiente interior e a superfície interior.

$$q_1 = h_i \times A \times (T_i - T_{si}) \times \Delta t \quad (2.7)$$

$$R_{si} = 1 / h_i$$

Na segunda etapa é transferido calor por meio de um sólido (a parede), onde a permuta é promovida por condução.

$$q_2 = k_t \times A \times (T_{si} - T_{se}) \times \Delta t \quad (2.8)$$

E por último na terceira etapa é promovida a transferência de calor por radiação e convecção entre a superfície exterior e o ambiente exterior.

$$q_3 = h_e \times A \times (T_{se} - T_e) \times \Delta t \quad (2.9)$$

$$R_{se} = 1 / h_e$$

Em que:

A - Área ou superfície do corpo, em $[m^2]$

T_i - Temperatura ambiente interior, em $[^\circ C]$

T_{si} - Temperatura superficial interior, em $[^\circ C]$

T_{se} - Temperatura superficial exterior, em $[^\circ C]$

T_e - Temperatura ambiente exterior, em $[^\circ C]$

R_{si} - Resistência térmica superficial interior, em $[m^2 \cdot ^\circ C / W]$

h_i - Coeficiente de condutância térmica superficial interior, em $[W / (m^2 \cdot ^\circ C)]$

h_e - Coeficiente de condutância térmica superficial exterior, em $[W / (m^2 \cdot ^\circ C)]$



R_{se} - Resistência térmica superficial exterior, em $[m^2 \cdot ^\circ C/W]$

h_e - Coeficiente de condutância térmica superficial exterior, em $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$

Assumindo que o regime é permanente, o fluxo de calor transferido entre os dois ambientes é igual ao fluxo de calor registado em cada uma das etapas.

$$q = q_1 = q_2 = q_3 \quad (2.10)$$

Simplificando as equações 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10 temos:

$$\begin{aligned} q_1/h_i &= A \times (T_i - T_{si}) \\ q_2/K_t &= A \times (T_{si} - T_{se}) \\ q_3/h_e &= A \times (T_{se} - T_e) \end{aligned}$$

$$q(1/h_i + 1/K_t + 1/h_e) = A \times (T_i - T_e)$$

Considerando:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{k_t} + \frac{1}{h_e} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{U} = R_{si} + R + R_{se} \quad (2.11)$$

Em que: U = coeficiente de transmissão térmica, em $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$

Obtém-se:

$$q = U \times A \times (T_i - T_e) \quad (2.12)$$

2.3.1. Coeficiente global de transmissão térmica

O coeficiente global de transmissão térmica U define a habilidade global de barreiras condutivas ou convectivas para transmitirem calor. O coeficiente global de transmissão térmica caracteriza a quantidade de energia sob a forma de calor que atravessa uma parede através de $1 m^2$ de superfície, no período de um segundo, quando a diferença de temperatura entre o interior e o exterior é de $1 ^\circ C$.

O coeficiente de transmissão térmica de um elemento construtivo pode ser calculado ou pode ser medido. O conhecimento dos valores das condutibilidades térmicas, permite o cálculo da resistência térmica dos elementos construtivos. Através do valor calculado da resistência térmica R_t , de determinado elemento construtivo, calcula-se o coeficiente de transmissão térmica, valor de U .

O cálculo da resistência térmica total de determinado elemento construtivo, é efectuado da seguinte forma segundo a norma EN ISO 6946:



$$R_t = R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se} \left[m^2 \cdot \frac{C}{W} \right] \quad (2.13)$$

Em que:

R_t - Resistência térmica total do elemento construtivo

R_{si} - Resistência térmica superficial interior

R_i - Resistência térmica da camada i do elemento construtivo

R_{se} - Resistência térmica superficial exterior

Os valores de R_i , R_{si} e R_{se} também podem ser retirados do ITE 50 do LNEC.

O valor de U resulta assim:

$$U = \frac{1}{R_t} \left[\frac{W}{m^2 \cdot C} \right] \quad (2.14)$$

De acordo com o Decreto-Lei n.º 80/2006, o cálculo do coeficiente de transmissão térmica é realizado com recurso às tabelas do ITE 50, do LNEC e através da fórmula 2.13 [6].

O cálculo do valor U obriga a que sejam conhecidas as características da parede, a espessura, os materiais utilizados e a condutibilidade de cada material. Na maioria dos casos de Edifícios já existentes, estes dados não são conhecidos e a única solução para se conhecerem seria destruir a parede.

Nestes casos importa medir o coeficiente de transmissão térmica através de métodos que não obriguem a que se conheçam as características dos materiais utilizados na parede. Ou seja métodos não destrutivos de medição do coeficiente global de transferência de calor.

2.3.2. Inércia térmica

Um edifício como sistema térmico tem a capacidade de captar e armazenar energia térmica através da função da inércia térmica dos elementos construtivos.

A velocidade de absorção e a quantidade de energia térmica absorvida determina a inércia térmica dum edifício.

A inércia térmica assume particular relevância no comportamento global do edifício. A energia acumulada pode ser orientada de forma a melhorar significativamente as condições de conforto térmico, propiciando uma menor amplitude de variação da temperatura interior.

Por exemplo, durante o inverno, em que a temperatura exterior é inferior à temperatura do espaço interior, a radiação que atravessa o envidraçado e incide em superfícies com elevada inércia térmica, vai permitir o armazenamento de energia, que será mais tarde libertada quando a temperatura do espaço (ar e demais superfícies) for mais baixa. Por outro lado, durante o Verão, a inércia térmica conjugada com adequadas estratégias de arrefecimento

por ventilação nocturna, traduz-se num efeito de absorção do calor excedentário no espaço durante o dia, ou seja permite que o calor acumulado nos elementos seja libertado durante a noite e seja restabelecida a capacidade de acumular e absorver o calor excessivo durante o dia seguinte, mantendo o ambiente interior confortável.

Quanto mais “pesado” é o edifício mais amortecida e desfasada é a onda de calor que se lhe transmite do exterior, ou seja, os edifícios com estruturas pesadas (paredes, pavimentos e coberturas), muito bem isoladas termicamente, que permitam uma relação directa (por armazenamento e radiação) com o ambiente interior, optimizam o efeito da inércia térmica.

Teoricamente, a inércia térmica depende da espessura dos elementos de construção e da difusibilidade térmica desses elementos, no entanto, em termos práticos, e por simplificação, o valor da massa dos elementos de construção é, em regra, considerado um bom índice de inércia térmica. A inércia térmica de uma fracção autónoma é, portanto, função da capacidade de armazenamento de calor que os locais apresentam e depende da massa superficial útil de cada um dos elementos da construção.

A massa superficial útil (M_{si}) de cada um dos elementos de construção interveniente na inércia térmica depende da sua localização no elemento construtivo e da sua constituição, nomeadamente do posicionamento e das características das soluções de isolamento térmico e de revestimento superficial.

Assim, quando se avaliam elementos de construção com várias camadas e possuindo isolante térmico, para além da massa dos próprios elementos, é fundamental para a inércia térmica da construção, a constituição da camada em contacto com o ambiente interior do edifício.

Na Figura 2.3 ilustra-se graficamente o comportamento de um edifício com isolamento térmico pelo exterior e parede de massa elevada em contacto com o ambiente interior, mostrando uma solução com forte inércia térmica [20].

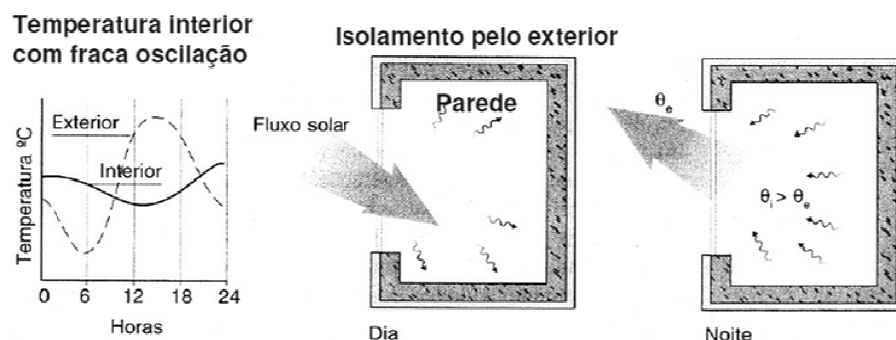


Figura 2.3 - Efeito da inércia térmica com isolamento térmico pelo exterior [20]

Na Figura 2.4 ilustra-se graficamente o comportamento do mesmo edifício quando o isolamento térmico é colocado pelo interior mostrando uma solução com fraca inércia térmica.

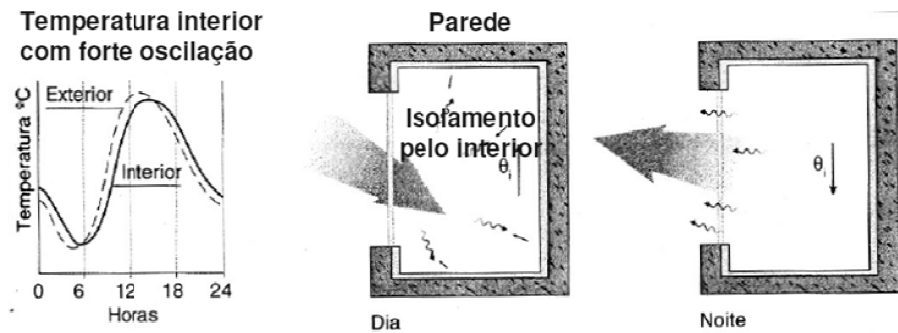


Figura 2.4 - Efeito da inércia térmica com isolamento térmico pelo interior [20]

Para otimizar o desempenho energético do edifício, é importante que a inércia térmica seja adaptada e integrada com outras estratégias de otimização do desempenho. Em primeiro lugar está a conjugação da inércia térmica com o isolamento térmico, aplicado de forma contínua e pelo exterior, ou seja, a forma como melhor se alcança o contributo positivo do armazenamento das temperaturas médias do clima que favorecem o conforto no ambiente interior. Sabendo que as temperaturas médias vão ser continuamente armazenadas pelos materiais pesados, é importante evitar que os extremos (quente e frio) afectem este armazenamento directamente. Assim, é o isolamento térmico associado à inércia térmica que protege o ambiente interior das grandes amplitudes térmicas.

A inércia térmica é uma medida essencial para a optimização do desempenho energético de edifícios habitacionais, porque constitui uma fonte de energia térmica estabilizante durante toda a duração dos edifícios.



3. Medição do coeficiente global

Para melhor se compreender a importância da medição do coeficiente global de transmissão térmica tem que se perceber de que maneira este valor influencia os consumos de energia para manter um edifício com óptimo nível de conforto térmico.

O principal objectivo na avaliação do comportamento térmico de edifícios é o de quantificar o nível de conforto térmico disponível aos seus ocupantes aliado ao menor consumo de energia.

Este coeficiente diz-nos exactamente quanto é que uma parede, tecto ou chão permite à passagem de energia sob a forma de calor. É de todo o interesse quantificar em que medida uma parede é mais ou menos condutora de calor de forma a classificar o edifício. Com a entrada em vigor da nova legislação do RCCTE, todos os edifícios novos ou que sejam sujeitos a transacção para venda ou arrendamento, são obrigados a ser avaliados segundo diversos factores entre os quais segundo o desempenho térmico das paredes. Desta forma quando alguém compra ou arrenda casa, sabe de ante mão em que medida está a comprar ou arrendar uma casa mais ou menos eficiente. Através do certificado energético que é regulamentado pelo SCE, o proprietário do edifício auditado tem a vantagem de ficar a saber quais são os pontos fracos e de que maneira pode intervir para melhorar a eficiência global do edifício.

3.1. Diferentes técnicas e métodos de medição do coeficiente global

O isolamento térmico em edifícios é um factor importante para alcançar o conforto térmico para os seus ocupantes. O isolamento reduz a perda ou ganho de calor não desejado e pode diminuir o uso desnecessário de sistemas de aquecimento e refrigeração. O isolamento térmico como é usado aqui não significa necessariamente lidar com problemas de ventilação adequada e pode ou não afectar o nível de isolamento acústico. As principais formas de transferência de calor de condução, radiação e convecção podem ser reduzidas através de técnicas de construção adequadas e escolha de materiais.

O valor-R, a resistência térmica, é uma medida de quão bem um produto de isolamento resiste ao fluxo de calor ou frio. Com maiores valores-R, a eficácia de isolamento é maior. O valor-R depende do tipo de isolamento, incluindo o material, espessura e densidade. O valor-R total de uma parede com múltiplas camadas perpendiculares ao fluxo resulta da soma de todos os valores-R das camadas individuais.

A eficácia da resistência do isolamento térmico também depende de como e onde o material de isolamento é instalado. Por exemplo, o isolamento comprimido não fornecerá uma taxa



integral do valor-R. O valor-R geral de uma parede ou tecto será um pouco diferente do valor-R do isolamento em si, porque algum fluxo de calor flui em torno do isolamento através de pontes térmicas. Portanto, é importante instalar correctamente o isolamento para conseguir o valor-R máximo.

Em algumas condições, especialmente nos países em desenvolvimento, nem sempre o valor-R real corresponde ao valor que é declarado. Portanto, é importante medir e analisar o valor-R de edifícios *in situ*.

Actualmente, existem duas técnicas de medição comuns para testar o isolamento térmico das amostras de construção: técnicas de medição de estado estacionário (estático) e técnicas de medição de estado transitório (dinâmico) [10].

3.1.1. Técnicas de medição

As técnicas medição do coeficiente global de transmissão térmica são:

- Técnica de medição de estado estacionário (estático) [*Steady-state*]
- Técnica de medição de estado transitório (dinâmico) [*Transient*]

As técnicas de medição de estado estacionário (*Steady-state*) baseiam-se na criação de um gradiente de temperatura sobre uma conhecida densidade da amostra de forma a controlar o fluxo de calor de um lado para o outro. Tem sido aplicada com mais frequência a abordagem pelo fluxo unidimensional, mas em alguns casos outros arranjos geométricos também são utilizados. O isolamento térmico é facilmente calculado medindo o gradiente de temperatura e o fluxo de calor através da amostra. O ponderado método *hot-plate*, a técnica do termofluxímetro e a técnica *hot-box* são as mais referidas e usadas técnicas de medição de estado transitório.

O método do termofluxímetro é normalmente aplicado para testar os parâmetros de isolamento dos componentes dos edifícios de construção *in situ* por ser composto de peças leves e fáceis de transportar. Tem como principal desvantagem a diferença entre os resultados dos testes e os valores teóricos sendo estes sempre maiores do que usando a técnica *hot-box*. Geralmente, este erro chega a 10%, especialmente quando os componentes a serem testados são telhados e paredes com orientação a sul (janelas maiores produzem erros maiores) [10].

As técnicas de medição de estado transitório têm vindo a ser estabelecidas nas últimas décadas para estudar materiais com alta condutibilidade térmica e para medições a altas temperaturas. Além de sua alta precisão e ampla faixa de medição, os métodos transitórios têm como característica uma preparação simples da amostra e a capacidade de medir até 2000 °C. Os métodos transitórios podem ser divididos em duas categorias, dependendo do aparelho utilizado para as medições: técnicas de contacto e técnicas ópticas.



Os métodos de contacto de estado transitório tornaram-se populares e amplamente utilizados devido à sua simplicidade na concepção e prática, enquanto as técnicas ópticas de estado transitório requerem *set-ups* mais dispendiosos e técnicas mais avançadas.

A determinação experimental da resistência térmica das paredes apresenta geralmente problemas nas análises térmicas realizadas *in situ*. Nos últimos anos, a actividade experimental tem sido realizada em laboratório, utilizando protótipos de paredes construídas em escala [10].

3.1.2. Métodos de medição

São diversos os métodos usados para a medição do coeficiente global. Na Norma ISO 9869 (1994) são descritos três métodos dinâmicos:

- Método ‘MRQT’
- Método ‘CTLSM’
- Método Aittomaki (Método de análise da ISO 9869)

Método de análise ‘MRQT’

No método ‘MRQT’ (o nome deriva do processo Marquardt-Levenberg que é usado) consiste, em geral, em equações matemáticas. Com alguns coeficientes conhecidos e outros desconhecidos (os parâmetros). O programa de identificação dos parâmetros usa um processo iterativo para procurar o conjunto de valores para os parâmetros desconhecidos, os quais correspondem ao melhor acordo entre as medições e os resultados do modelo de cálculo para as mesmas séries de tempo dos dados de entrada.

Depois de ser identificado o conjunto de parâmetros que melhor se ajusta no método MRQT determinam-se algumas características estatísticas, tal como a correlação entre os parâmetros e os seus intervalos de confiança.

O programa trata ainda os valores e informação estatística das funções dos parâmetros. No caso em que a resistência térmica dos elementos de construção é determinada, isso significa que o método MRQT assume o modelo matemático do elemento. Geralmente um suposto ‘RC Model’ é usado, tendo entre um a três nós. Os parâmetros desconhecidos, neste caso, são as resistências e capacidades do modelo.

Quando os dados de entrada são as superfícies internas e externas, o método MRQT procura os melhores valores entre as taxas de fluxo de calor medidas e calculadas na superfície interna; ou a taxa de fluxo de calor e a superfície externa são usadas como uma variável de entrada, e neste caso o método MRQT procura os melhores valores entre as temperaturas internas medidas e calculadas.



As funções físicas dos parâmetros, no contexto da dinâmica da medição *in situ* da resistência térmica numa superfície à outra (*surface-to-surface*) são a soma das resistências térmicas das camadas dos elementos (ou seja, a resistência térmica de *surface-to-surface* em si) e da capacidade térmica por unidade de área do elemento de construção (isso às vezes é convencionalmente definida como a energia acumulada no elemento quando a temperatura de um dos seus lados é mantida constante, enquanto a temperatura do outro lado é aumentada por uma unidade) [21].

Método de análise 'CTLISM'

O método *Continuous Time Linear Stochastic Modelling* (CTLISM) considera um modelo matemático determinístico para o sistema a ser identificado para descrever o desvio entre este modelo e a real variação dos estados (temperaturas e taxas de fluxo de calor), através da introdução de um termo de ruído.

Os parâmetros desconhecidos, que são a resistência térmica e a capacidade térmica por unidade de superfície das camadas do elemento, são estimados a partir das medições no elemento. O método da máxima verosimilhança é usado para a estimativa.

Para todos os parâmetros, o método CTLISM fornece também as referentes variações e a correlação entre os parâmetros. CTLISM calcula também os valores e as informações estatísticas das funções físicas dos parâmetros (por exemplo, a resistência térmica total e a capacidade térmica por unidade de área do elemento). Um número de diferentes testes estatísticos é computado para a validação do modelo [21].

Método de análise Aittomaki

As medições devem apresentar um número suficientemente grande de conjuntos de dados, N , em que cada um contém a densidade do fluxo de calor, q_j , as temperaturas da superfície interna e externa, T_{ij} , e T_{ej} , medidas periodicamente nos tempos t_j . O intervalo de tempo entre as medições é Δt , definido como:

$$\Delta t = t_{j+1} - t_j \quad (3.1)$$

O procedimento é o seguinte:

- 1) Escolhe-se o número de constantes de tempo, m , a ser utilizado. Na prática, esse número é de 3 ou menos.
- 2) Escolhe-se uma proporção r constante entre estas constantes de tempo (na prática, entre 3 e 10) de tal forma que:

$$\tau_1 = r \tau_2 = r^2 \tau_3 \quad (3.2)$$



- 3) Escolhe-se o número de equações, M , para identificação. Este número deve ser maior que $2m+3$, mas menor do que o número de conjuntos de dados. Na prática, 15 a 40 equações são suficientes e 30 a 100 pontos de dados são necessários.
- 4) Escolhe-se depois os valores do mínimo e do máximo das constantes de tempo. Desde que o computador tenha uma precisão limitada, não é necessário usar constantes de tempo menores do que $\Delta t/10$. Por outro lado, $p=N-M$ pontos são necessários para a integração. Essa integração não será terminada se a constante do tempo for maior do que $p \cdot \Delta t$, por isso o melhor é escolher a maior constante de tempo compreendida entre:

$$\frac{\Delta t}{10} < \tau_1 < p \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (3.3)$$

- 5) Para um valor τ_1 , calculam-se outras constantes de tempo de acordo com a etapa 2.
- 6) Calculam-se as variáveis β_n que correspondem à função exponencial da constante de tempo τ_n :

$$\beta_n = \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_n}\right) \quad (3.4)$$

- 7) Preenche-se depois a matriz rectangular X , com M linhas ($j=N-M+1$ até N) e $2m+3$ colunas (1 até $2m+3$). Os elementos da matriz são:

$$\begin{aligned} X_{j1} &= T_{ij} - T_{ej} \\ X_{j2} &= T_{ij} - (T_{ej} - T_{ej-1})/\Delta t & X_{j3} &= T_{ej} - (T_{ej} - T_{ej-1})/\Delta t \\ X_{j4} &= \sum_{k=j-p}^{j-1} [(T_{ij} - T_{ij-1})/\Delta t](1 - \beta_1)\beta_1^{(j-k)} & X_{j5} &= \sum_{k=j-p}^{j-1} [(T_{ej} - T_{ej-1})/\Delta t](1 - \beta_1)\beta_1^{(j-k)} \\ X_{j6} &= \sum_{k=j-p}^{j-1} [(T_{ij} - T_{ij-1})/\Delta t](1 - \beta_2)\beta_2^{(j-k)} & X_{j7} &= \sum_{k=j-p}^{j-1} [(T_{ij} - T_{ij-1})/\Delta t](1 - \beta_2)\beta_2^{(j-k)} \\ & \dots & & \dots \\ X_{j,2m+2} &= \sum_{k=j-p}^{j-1} [(T_{ij} - T_{ij-1})/\Delta t](1 - \beta_2)\beta_2^{(j-k)} & X_{j,2m+3} &= \sum_{k=j-p}^{j-1} [(T_{ij} - T_{ij-1})/\Delta t](1 - \beta_2)\beta_2^{(j-k)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Nas somas a seguir à linha j , p é grande o suficiente para se efectuar a soma residual desprezível ($j=i-p$ até $-\infty$).



8) Calcula-se uma estimativa, Z^* , do vector Z por:

$$Z^* = ((X)'(X))^{-1} (X)'q \quad (3.6)$$

Em que:

- $(X)'$ é a matriz transposta de (X) .
- Z é um vector, e $2m+3$ dos seus componentes são desconhecidos: $\Lambda, K_1, K_2, P_1, Q_1, P_2, Q_2, \dots, P_n, Q_n$
- Λ é a condutibilidade térmica do elemento medido e K_1, K_2 , bem como P_n e Q_n são características dinâmicas da parede sem nenhum significado particular.

9) Para este valor de Z^* , a estimativa q^* do vector do fluxo de calor será calculado por:

$$q^* = (X)Z^* \quad (3.7)$$

10) O desvio total do quadrado entre a estimativa e os valores medidos é então calculado por:

$$S^2 = (q - q^*)^2 = \sum (q_j - q_j^*)^2 \quad (3.8)$$

11) O melhor tempo definido pelas constantes é aquele que corresponde ao menor desvio quadrado. O melhor tempo pode ser encontrado por iteração dos passos 5-10, mudando τ_1 , de acordo com qualquer método adequado à pesquisa.

12) A melhor estimativa, Z^* , do vector Z é calculada com as constantes com o melhor tempo. O seu primeiro componente, Z_1 , é a melhor estimativa da condutância.

Se a maior constante de tempo encontrada para a melhor estimativa é igual (ou superior) ao valor máximo, $p \cdot \Delta t / 2$, o número de equações ou o tempo de medição não são grandes o suficiente para dar um resultado confiável para este conjunto de dados e para a razão considerada entre as constantes de tempo. Alterando o número de equações ou a razão ou aumentando (ou diminuindo) o número de conjuntos de dados pode-se resolver este problema.

13) Calcula-se finalmente o intervalo de confiança para a estimativa da condutância:

$$I = \sqrt{\frac{S^2 Y(1,1)}{M - 2m - 4}} F(P, M - 2m - 5) \quad (3.9)$$



Em que:

- S^2 é o desvio total obtido pela equação (3.8)
- $Y(1,1)$ é o primeiro elemento da matriz invertida na equação (3.6)

$$(Y) = ((X)'(X))^{-1} \quad (3.10)$$

F é o limite da distribuição t , P é a probabilidade e $M-2m-5$ é o grau de liberdade.

Se o intervalo de confiança para $p=0,95$ é maior do que 2% da condutância, a condutância calculada deve ser rejeitada, e outro conjunto de dados deve ser seleccionado.

A duração do teste deve, em qualquer caso, ser maior do que 3 dias.

Changai Peng (2008) realizou estudos na área envolvendo três métodos também usando a técnica de medição de estado transitório (*transient*):

- Método das temperaturas sintéticas (*method of synthetic temperatures*)
- Método das temperaturas de superfície (*method of surface temperatures*)
- Método da resposta de frequência (*method of frequency responses*)

Método das temperaturas sintéticas (*synthetic temperatures*)

Em medições *in situ* no verão, a radiação solar é muito forte e muda constantemente, por isso as condições térmicas no exterior estão em constante alteração. No interior as condições térmicas em alguns casos podem ser controladas através de aparelhos de ar condicionado. Sabe-se que só parte do calor é transferida da superfície exterior para a interior, devido à resistência térmica dos materiais de construção.

O calor da superfície exterior da parede não é imediatamente transferido para o interior devido à alta inércia térmica, característica dos materiais de construção, tais como o tijolo.

Assim, no método das temperaturas sintéticas, a fim de eliminar o efeito de armazenamento térmico, o valor de U ou da resistência térmica dos edifícios devem ser calculados utilizando a média das temperaturas e do fluxo, num período de pelo menos um dia, em vez da utilização dos dados imediatos. Para além disso, as temperaturas do ar devem ser substituídas por temperaturas sintética (artificial) exterior, para incluir a influência da radiação solar.



Isto é:

$$R_0 = \frac{(\bar{t}_{sa} - \bar{t}_i)}{\bar{q}} \quad (3.11)$$

$$t_{sa} = t_e + \frac{\rho l}{\alpha_e} \quad (3.12)$$

$$\bar{t}_{sa} = \frac{1}{24} \sum_1^{24} t_{sa} \quad (3.13)$$

De acordo com a temperatura exterior, T_e , a iluminação da radiação solar, l e as equações (3.12) e (3.13), vai calcular-se a temperatura sintética exterior.

E usando a equação (3.11) e as temperaturas sintéticas exteriores então calculadas pode-se avaliar o isolamento térmico do edifício em estudo [10].

Método das temperaturas de superfície (*surface temperatures*)

Outro método para calcular a resistência térmica em edifícios *in situ* consiste em igualar o valor da resistência global, valor-R à soma das resistências das várias camadas (equação (3.14)) em que \bar{R} é o quociente entre a diferença das temperaturas médias das superfícies da parede e o fluxo de calor médio que a atravessa (equação (3.15)). Os R_e e R_i são os inversos dos coeficientes de transferência de calor da película de ar exterior e interior da construção, respectivamente (equação (3.16) e (3.17)).

$$R_0 = \bar{R} + R_e + R_i \quad (3.14)$$

$$\bar{R} = \frac{(\bar{\theta}_e - \bar{\theta}_i)}{\bar{q}} \quad (3.15)$$

$$R_e = \frac{1}{\alpha_e} \quad (3.16)$$

$$R_i = \frac{1}{\alpha_i} \quad (3.17)$$

Portanto, usando a média das temperaturas da superfície exterior e das temperaturas da superfície interior dos edifícios, bem como a média da taxa de fluxo de calor de um edifício de construção idêntica, podemos obter o valor-R [10].



Método da Resposta de Frequência (*frequency responses*)

Além dos métodos já mencionados, também se pode avaliar o valor-R:

- Pelo produto de v_0 , onde 0 é a ordem das respostas de frequência da condução de calor, e R_i , a resistência de difusão de calor na superfície interna dos edifícios;
- Pelo quociente de v_0 e α_i , o coeficiente de convecção da superfície interior.

Isto é:

$$R_0 = R_i v_0 = \frac{v_0}{\alpha_i} \quad (3.18)$$

Para tal, é necessário calcular inicialmente a média das temperaturas relativas e consideram-se: T_{si} a temperatura média da superfície interior, T_i a temperatura média do ar interior e T_{es} a temperatura média sintética externa [10].

Seguindo depois com os cálculos das respostas de frequência de absorção do calor da construção numa câmara de ensaio, através método de analogia de termo-electricidade (*TEAM - Thermo-electricity Analogy Method*), de acordo com a estrutura do edifício [22].

É calculada então a curva de temperatura na superfície do elemento em estudo, resultante da temperatura do ar interior. Sendo apenas necessária a média da curva de temperatura.

Ou seja, a temperatura média da curva, $T_{mc} = \frac{T_i}{F_{TEAM}}$, onde F_{TEAM} é a frequência obtida pelo método TEAM referido.

A curva de temperatura na superfície do elemento em estudo é resumida pela curva de temperatura sintética exterior e temperatura do ar interior. Sendo, a temperatura da curva da superfície,

$$T_{sc} = T_{si} - T_{mc} \quad (3.19)$$

De seguida, a taxa de declínio da curva da temperatura na ordem 0 é avaliada.

$$t_d = T_{es} - T_{sc} \quad (3.20)$$

E por fim, o valor-R do elemento é calculado,

$$R = R_i v_0 = \frac{v_0}{\alpha_i} = \frac{t_d}{\alpha_i} \quad (3.21)$$

3.2. Descrição do método utilizado e do instrumento de medição

3.2.1. Método de cálculo

Para estes casos existe outro método de cálculo descrito na norma DIN 4108. É com base no cálculo descrito nesta norma que o instrumento de medição utilizado nos ensaios realizados calcula o valor U.

Sabendo que:

$$q = UA \times (T_{int} - T_{ext}) \quad (3.22)$$

Com uma simples transformação temos que:

$$U = \frac{q}{A \times (T_{int} - T_{ext})} \quad (3.23)$$

Sabendo que para uma determinada parede constituída por diferentes elementos de diferentes condutibilidades térmicas, o fluxo de calor que a atravessa é:

$$q = \frac{T_{int} - T_{ext}}{\sum R_t} \quad (3.24)$$

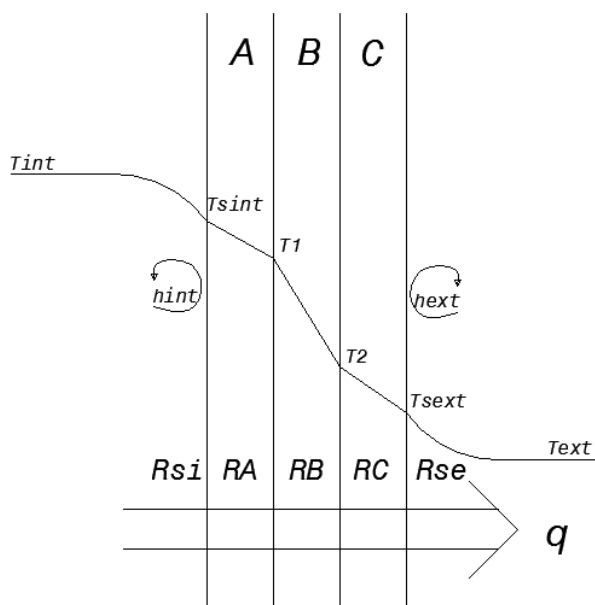


Figura 3.1 - Esquema representativo do processo de transferência de calor numa parede

Esse fluxo de calor pode ser determinado pela consideração em separado de cada elemento da parede. Uma vez que o fluxo de calor é constante ao longo da parede, segue-se que:



$$q = \frac{T_{int} - T_{sint}}{R_{si}A} = \frac{T_{sint} - T_1}{R_A A} = \frac{T_1 - T_2}{R_B A} = \frac{T_2 - T_{sext}}{R_C A} = \frac{T_{sext} - T_{ext}}{R_{se}A} \quad (3.25)$$

A taxa de transferência de calor no elemento interior onde existe convecção [16], é:

$$q = \frac{T_{int} - T_{sint}}{R_{si}A} \quad (3.26)$$

Sabendo que:

$$R_{si} = \frac{1}{h_{int}} \quad (3.27)$$

Substituindo (3.26) e (3.27) em (3.23) temos que:

$$U = \frac{\frac{T_{int} - T_{sint}}{\frac{1}{h_{int}} \times A}}{A \times (T_{int} - T_{ext})} \quad (3.28)$$

Reorganizando fica:

$$U = h_{int} \times \frac{T_{int} - T_{sint}}{T_{int} - T_{ext}} \quad (3.29)$$

O valor de h_{int} é calculado com base na fórmula (3.27) e nos valores tabelados no Quadro VI.1 do ANEXO VII do Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de Abril (RCCTE), onde para o sentido do fluxo de calor horizontal, $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/W$.

Aplicando a fórmula (3.27), temos que:

$$h_{int} = \frac{1}{R_{si}} \Leftrightarrow h_{int} = \frac{1}{0,13} \Leftrightarrow h_{int} = 7,69$$

3.2.2. Instrumento utilizado

O instrumento de medição utilizado nas medições realizadas neste trabalho foi o Testo 435-2 apresentado na figura 3.2.



Figura 3.2 - Instrumento de medição Testo 435-2

Este instrumento é um aparelho multifunções da Testo que permite a medição do coeficiente global de transmissão térmica (Valor U) e muitos outros parâmetros, dependendo das sondas a ele conectadas. Permite que lhe sejam acopladas até três sondas ao mesmo tempo podendo registar e mostrar as três ao mesmo tempo e tem também a possibilidade de fazer medições sem cabos a ligar os sensores. Com a nova tecnologia de sondas por rádio frequência tem a capacidade de fazer medições até uma distância de 20 m (sem obstáculos).

Tem a possibilidade de avaliar a qualidade do ar interior utilizando as sondas de humidade relativa, temperatura e de CO₂, com a sonda de grau de turbulência pode-se também avaliar o fluxo de ar ambiente. Outra possibilidade é a medição de luz através da sonda lux. A sonda de superfície e de humidade do ar são utilizadas para determinar se a superfície atingiu a temperatura ponto de orvalho.

O coeficiente de transmissão térmica (Valor U) é medido utilizando a sonda de temperatura por rádio frequência e a sonda para determinar o valor U em conjunto. A sonda de temperatura permite ainda a medição da humidade do ar.

A sonda de temperatura apresentada na figura 3.3, permite a medição da temperatura e humidade do ar, tem uma classe de protecção IP54 (protegido contra poeira e projecções de água), pode funcionar no intervalo de temperatura entre -20°C e 70°C, tem uma precisão de $\pm 1\%HR$ e $\pm 0,3^\circ C$ e uma resolução de $0,1\%HR$ e $0,1^\circ C$. Esta sonda é aplicada na medição do coeficiente global de transmissão térmica. Para medir a temperatura do exterior, esta é



simplesmente posicionada no exterior do edifício e transmite os valores medidos por rádio frequência para o instrumento de medição colocado no interior.



Figura 3.3 - Sonda de rádio frequência para determinar temperatura e humidade

A sonda da temperatura para determinação do valor U apresentada na figura 3.4, é constituída por um sistema de triplo sensor para apurar a temperatura da parede e um quarto sensor para a temperatura do ambiente interior. É portanto constituída por quatro sensores de temperatura, três fios com sensor de temperatura para aplicar com ajuda de plasticina na superfície interior da parede medindo assim a temperatura da superfície interior. O quarto sensor está situado junto à ficha de conexão e mede a temperatura do ar ambiente do interior do edifício.



Figura 3.4 - Sonda de temperatura para determinar o valor U

Este instrumento destaca-se pela sua utilização lógica e pelos seus menus simples. Em medições efectuadas em locais diferentes, o aparelho testo 435-2 tem a vantagem de permitir que os valores de medição sejam atribuídos ao respectivo local de medição, permitindo alterar o nome da série de dados na memória. Para a medição de longa duração é possível alternar entre diferentes perfis de utilizador.

Através das teclas de função, o perfil “*standard*” permite aceder directamente à definição do programa de medição (p. ex., número de medições e ciclo de medição).

Apesar de o instrumento calcular o valor de U a cada instante, este nem sempre no instante calculado corresponde à realidade. O facto de as temperaturas estarem sempre a variar e também o facto da energia térmica acumulada na parede poder ser libertada ou absorvida, influencia o resultado. Para se determinar o valor de U, convém descartar os valores que não interessam e limitar os resultados aos valores calculados sob condições correctas. Para uma análise mais fácil dos resultados foi elaborado um programa em MatLab com esse fim que se descreve no próximo subcapítulo.

3.3. Programa MatLab da análise preliminar dos resultados

O programa elaborado em MatLab tem como função, fazer uma análise preliminar dos valores obtidos em condições menos próprias.

Na elaboração deste programa considerou-se que o fluxo de calor nas medições efectuadas seria de dentro para fora do edifício, situação normal no período de Inverno. Segundo este critério o fluxo de calor processa-se como ilustrado na figura 3.5 e as temperaturas obedecem a uma disposição gradual numa escala de temperaturas, sendo $T_i > T_w > T_e$.

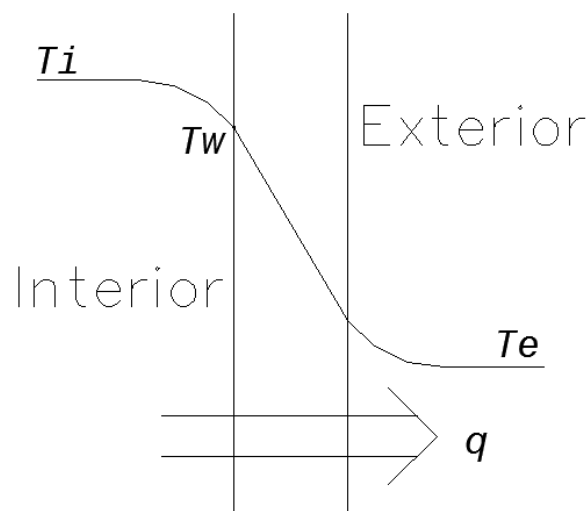


Figura 3.5 - Esquema de temperaturas na transmissão térmica de uma parede



Por se ter verificado em algumas medições que a temperatura ambiente interior está muito próxima da temperatura superficial da parede e em alguns casos estas se invertem na sua disposição gradual na escala, decidiu-se então utilizar esta proximidade de temperaturas como um critério a ter em conta, não considerando os valores obtidos nessas condições como aceites.

Para se garantirem condições de estabilidade comparou-se cada valor com os seus vizinhos num intervalo de tempo. Para que um valor garanta as condições de estabilidade é necessário que não se desvie dos seus valores vizinhos mais que $0,1 W/m^2\text{°C}$ definido no programa com designação de “erro”. Verificando-se uma diferença entre os valores inferior ao erro considerado, podemos dizer que o valor em estudo se encontra numa zona estável.

Na figura 3.6 é apresentado o algoritmo de funcionamento do programa na forma visível (Fluxograma) mostrando-se as várias etapas do funcionamento: leitura de valores das variáveis, cálculo de variáveis auxiliares, verificação de condições e armazenamento dos resultados finais.

Resumindo, o programa qualifica os valores de U obtidos, sendo estes classificados segundo a sua natureza da seguinte forma:

1. **Classificação 1:** Esta denominação significa que os valores com ela atribuída se situam na zona de erro, em que as temperaturas não têm a disposição gradual correcta.
2. **Classificação 2:** Esta classificação diz-nos que os valores assim classificados se encontram na zona crítica, significa que as temperaturas T_w e T_i se encontram a menos de $0,3\text{°C}$, não sendo assim aconselhável considerar os valores obtidos nestas condições.
3. **Classificação 3:** Os valores com esta denominação encontram-se na zona aconselhável mas não em zona estável, significa que verifica a disposição gradual correcta e as temperaturas T_w e T_i distam mais de $0,3\text{°C}$, mas não se verifica o critério de estabilidade.
4. **Classificação 4:** Estes são os valores situados na zona aconselhável e em zona estável, valores medidos em condições estáveis, com a disposição gradual correcta e diferença superior a $0,3\text{°C}$ entre T_i e T_w , logo são estes os valores aconselhados para U.

No fim de correr o programa estas classificações são guardadas no mesmo ficheiro Excel numa coluna ao lado dos valores registados nas medições, que serão também adicionados ao gráfico dos resultados, onde melhor se percepção quais as zonas estáveis.

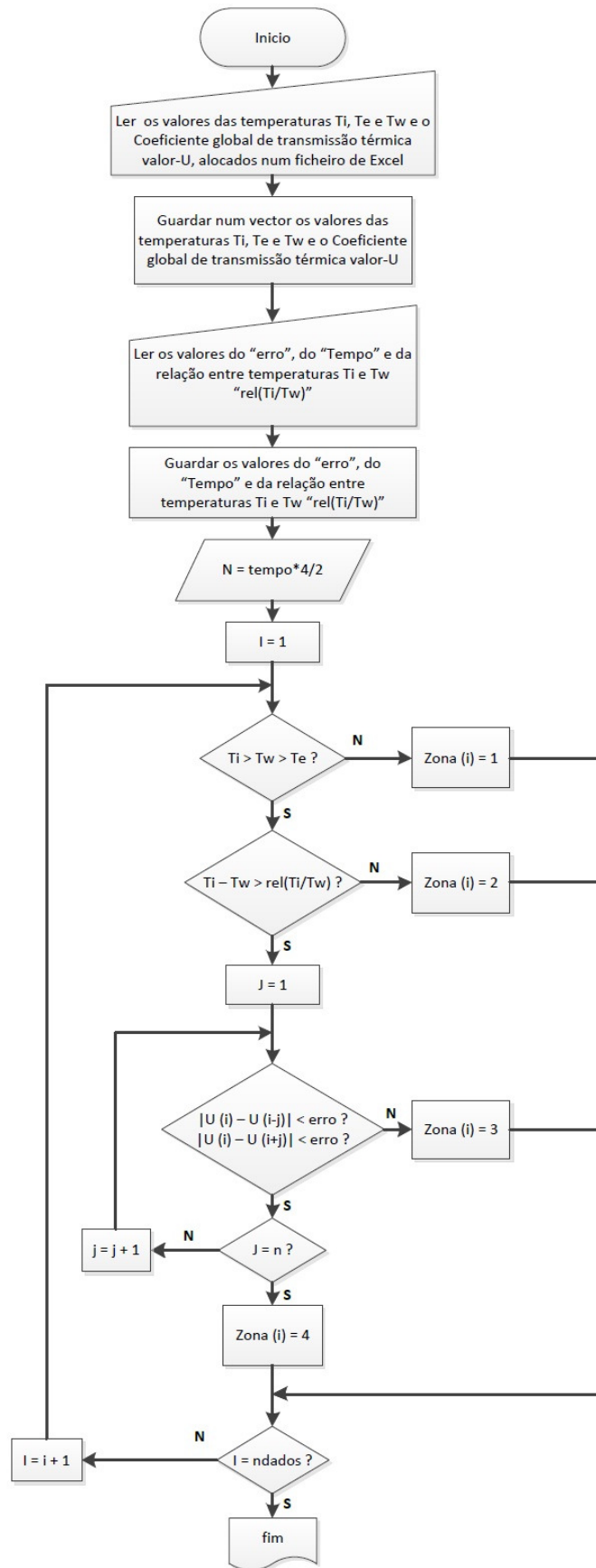


Figura 3.6 - Fluxograma de funcionamento do programa



4. Estudo de casos

Para o estudo de casos foram realizados vários ensaios em locais diferentes e com sistemas construtivos diferenciados. Com o intuito de testar o equipamento, foi realizado um ensaio preliminar na câmara térmica do laboratório de termodinâmica da Universidade da Beira interior, onde se efectuou o primeiro teste ao equipamento com temperaturas estáveis. De seguida foram efectuados vários ensaios *in situ* em edifícios residenciais com diferentes condições atmosféricas e para diversas soluções construtivas, foram ainda realizados dois ensaios em câmaras de conservação com a particularidade de as temperaturas serem estáveis.

4.1. Metodologia experimental dos ensaios

Para dar início aos ensaios foi necessário definir um procedimento a seguir em todos os ensaios a realizar de forma a poder tirar conclusões da comparação dos vários ensaios.

O fabricante deste instrumento de medição fornece indicações para utilização do equipamento.

Segundo estas indicações, este deve funcionar segundo os seguintes requisitos:

- Para o perfeito funcionamento do equipamento este recomenda a existência de uma diferença significativa entre temperaturas interior e exterior (ideal: > 15°C)
- A medição deve ser realizada em condições estáveis (p. ex. sem sol que aqueça o muro exterior)
- O coeficiente de transferência de calor por convecção deve estar correctamente ajustado no instrumento (recomendado: ajuste de fábrica 7.69; adequado para a maioria dos casos)
- Não se deve tocar nos cabos/conectores da sonda de temperatura durante a medição (A temperatura interior é determinada através de um sensor no conector da sonda)
- Durante a medição, deve-se colocar o instrumento num lugar longe de fontes de frio ou calor (não colocar no parapeito da janela ou segurar com a mão), a uma distância do muro de 30 cm mínimo, e na medida do possível à mesma altura que os três cabos da sonda de temperatura.

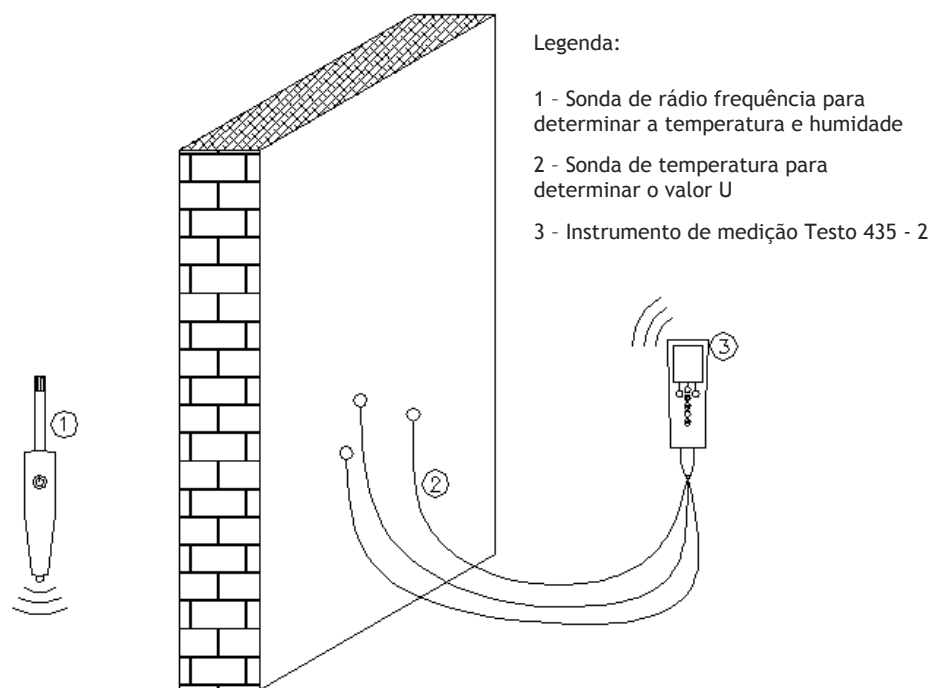


Figura 4.1 - Esquema de montagem.

O programa de medição foi definido no início das medições e manteve-se para todas as situações em estudo. Tendo sido alterado o tempo de medição que para os primeiros dois ensaios foi de 20 horas e nos restantes de 48 horas.

Na montagem do equipamento, em primeiro lugar procedeu-se à aplicação dos três sensores de temperatura na parede com a ajuda de plasticina *Bostik*, dispostos de forma triangular com distância entre eles de cerca de 10 cm como exemplificado na figura 4.2.

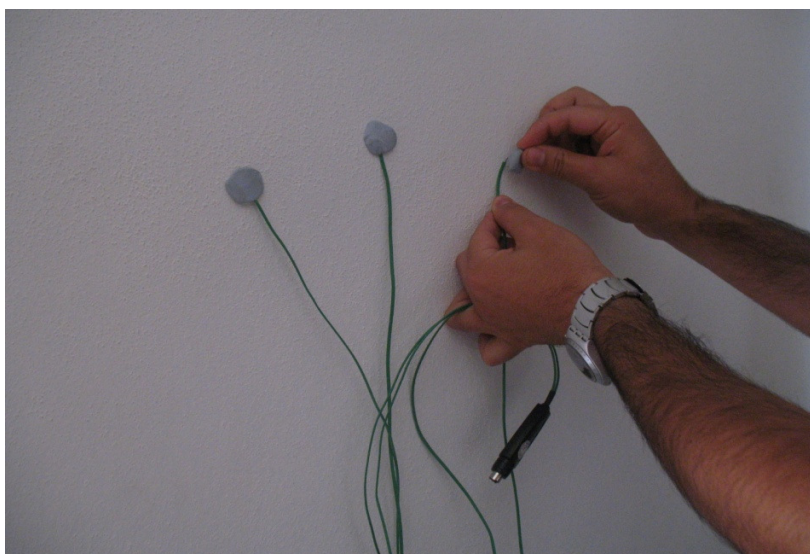


Figura 4.2 - Imagem ilustrativa da aplicação dos sensores de temperatura



Em seguida ligou-se a sonda por rádio frequência para determinar a temperatura e humidade e colocou-se no exterior em local perto da aplicação interior dos sensores de temperatura da parede, dentro do possível na mesma direcção como mostrado na figura 4.1. Procedeu-se à conexão da sonda de temperatura para determinar o valor U ao instrumento de medição Testo 435-2 e ligou-se o mesmo. Antes de dar início ao programa de medição foi verificado se as sondas estavam correctamente ligadas, verificando os vários parâmetros no visor do instrumento. Por último e depois de verificar que as sondas estavam ligadas deu-se início ao programa de medição colocando-se o instrumento a uma distância de aproximadamente 30 cm ou mais da parede e na medida do possível, na direcção dos sensores aplicados.

Os ensaios realizados, a descrição, a constituição, a orientação da parede e a duração, são apresentados na tabela 4.1 e serão descritos em maior pormenor mais a frente neste capítulo.

Tabela 4.1 - Descrição dos ensaios realizados

Ensaio	Descrição do ensaio	Constituição da Parede de dentro para fora	Orientação da Parede	Duração do Ensaio
1	Realizado na câmara do laboratório de termodinâmica aplicada	Constituída por placa MDF hidrófego 19mm, 3 placas wallmate IB 50mm e placa MDF hidrófego 19mm	Indiferente	20h
2	Realizado em edifício no Secretariado de Civil	Constituída por estuque tradicional, tijolo furado 30x20x20, espaço de ar não ventilado, tijolo furado 30x20x11 e isolamento exterior EPS 50mm	Oeste	20h
3	Realizado em moradia de habitação em Belmonte	Constituída por reboco em argamassa tradicional, blocos 50x20x20 e reboco em argamassa tradicional	Noroeste	48h
4	Realizado em moradia de habitação em Belmonte	Constituída por reboco em argamassa tradicional, blocos 50x20x20 e reboco em argamassa tradicional	Sudeste	48h
5	Realizado em moradia de habitação em Belmonte	Constituída por reboco em argamassa tradicional, tijolo furado 30x20x7, espaço de ar não ventilado, isolante de lã de vidro, Tijolo furado 30x20x22 e reboco em argamassa tradicional	Sudeste	48h
6	Realizado em moradia de habitação em Belmonte	Constituída por reboco em argamassa tradicional, tijolo furado 30x20x7, espaço de ar não ventilado, isolante de lã de vidro, Tijolo furado 30x20x22 e reboco em argamassa tradicional	Nordeste	48h
7	Realizado num apartamento em Guarda	Constituída por estuque projectado, tijolo furado 30x20x11, isolante térmico XPS de 4cm, espaço de ar não ventilado 2 cm, tijolo furado 30x20x15, emboço de argamassa tradicional e revestimento exterior em pedra artificial	Sul	42h



Ensaio	Descrição do ensaio	Constituição da Parede de dentro para fora	Orientação da Parede	Duração do Ensaio
8	Realizado num apartamento em Guarda	Constituída por estuque projectado, tijolo furado 30x20x11, isolante térmico XPS de 4cm, espaço de ar não ventilado 2 cm, tijolo furado 30x20x15, emboço de argamassa tradicional e revestimento exterior em pedra artificial	Sul	48h
9	Realizado em moradia de habitação em Covilhã	Constituída por estuque tradicional, tijolo furado 30x20x11, isolante térmico XPS de 6cm, espaço de ar não ventilado de 2cm, tijolo furado 30x20x15 e reboco em argamassa tradicional	Sudoeste	48h
10	Realizado em moradia de habitação em Covilhã	Constituída por madeira, tijolo furado 30x20x11, espaço de ar não ventilado e tijolo maciço	Sudoeste	48h
11	Realizado em moradia de habitação em Covilhã	Constituída por tijolo furado 30x20x11, espaço de ar não ventilado, tijolo furado 30x20x11 e isolamento pelo exterior 30mm	Noroeste	48h
12	Realizado em moradia de habitação em Covilhã	Constituída por tijolo furado 30x20x11, espaço de ar não ventilado, tijolo furado 30x20x11 e isolamento pelo exterior	Sudoeste	48h
13	Realizado em casa de habitação em Covilhã	Constituída por pladur, espaço de ar não ventilado e tijolo Maciço	Sudoeste	48h
14	Realizado em apartamento em Covilhã	Constituída por estuque projectado, tijolo furado 30x20x11, isolante térmico XPS de 4 cm, espaço de ar não ventilado de 2 cm, tijolo furado 30x20x15 e monomassa	Sudeste	48h
15	Realizado em apartamento em Covilhã	Constituída por estuque projectado, tijolo furado 30x20x11, isolante térmico XPS de 4 cm, espaço de ar não ventilado de 2 cm, tijolo furado 30x20x15 e monomassa	Noroeste	48h
16	Realizado em câmara de conservação de frutas	Constituída por Isolante térmico projectado PUR, isolante térmico de aglomerado de cortiça expandida em placas, tijolo furado 30x20x22, isolante térmico de aglomerado de cortiça expandida em placas e Isolante térmico projectado PUR	Indiferente	48h
17	Realizado em câmara de conservação de frutas	Constituída por Isolante térmico projectado PUR, isolante térmico de aglomerado de cortiça expandida em placas, bloco de alvenaria 50x20x20 e isolante térmico de aglomerado de cortiça expandida em placas	Indiferente	48h



4.2. Apresentação e discussão dos casos estudados

Para o estudo efectuado a cada caso, foi calculado o valor teórico do valor-U de acordo com as características de cada parede.

O cálculo do coeficiente de transmissão térmica superficial (valor-U) foi calculado a partir da expressão: $U = 1 / (R_{si} + \sum R_j + R_{se})$, de acordo com a Alínea 1.1 do Anexo VII do RCCTE (Decreto-Lei 80/2006 de 4 de Abril) e com recurso aos valores das resistências térmicas superficiais (R_{si} e R_{se}) obtidos a partir do Quadro VII.1 do Anexo VII do mesmo regulamento.

As resistências térmicas das camadas homogéneas foram calculadas pela expressão ($R=d/\lambda$), recorrendo-se a valores de cálculo do coeficiente de condutibilidade térmica (λ), obtidos da publicação do LNEC ITE 50, conforme previsto na Alínea 1.1 do Anexo VII do RCCTE (Decreto-Lei 80/2006 de 4 de Abril).

Nos termos da mesma Alínea do mesmo regulamento, para camadas heterogéneas os valores da resistência térmica (R) foram obtidas directamente na publicação do LNEC: ITE50 [23].

A resistência térmica dos espaços de ar foi contabilizada de acordo com o procedimento definido na Alínea 1.2 do Anexo VII do RCCTE (Decreto-Lei 80/2006 de 4 de Abril).

Os valores obtidos para as condutibilidades térmicas das camadas homogéneas, as resistências térmicas das várias camadas heterogéneas e homogéneas calculadas, assim como o somatório das várias resistências térmicas e o valor final do coeficiente de transmissão térmica superficial, valor-U das paredes estudadas, são apresentados numa tabela junto da descrição e da representação esquemática da parede em estudo.

Os resultados obtidos dos ensaios realizados vão ser apresentados na forma de gráfico, onde se mostram os valores da temperatura interior, da parede e exterior, o valor do coeficiente global de transmissão térmica e a classificação de zona obtido através do programa de análise preliminar dos resultados.

Juntamente com o gráfico são apresentadas numa tabela as médias dos vários parâmetros representados em cada gráfico.

Ensaio 1

O ensaio 1 foi realizado na câmara do laboratório onde foi testada uma parede constituída (do interior para o exterior) por placa MDF hidrófugo (19mm), placas de isolante térmico Wallmate IB (3x50mm) e placa MDF hidrofugo (19mm) como representado na figura 4.3.

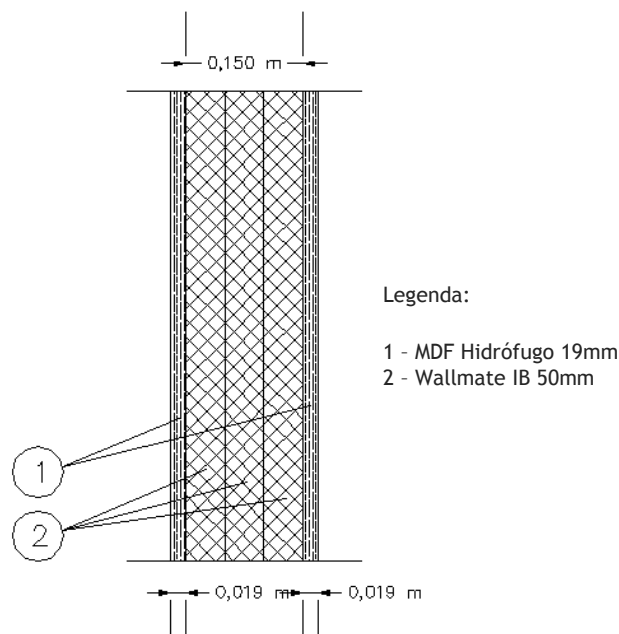


Figura 4.3 - Esquema de representação da parede da câmara do laboratório e respectiva legenda

Na tabela 4.2 são apresentados cálculos dos valores das resistências das várias camadas e do valor teórico do coeficiente global de transmissão térmica para a parede testada no ensaio 1.

Tabela 4.2 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 1

Resistência térmica das camadas:						Fluxo horizontal
Camada	Descrição da camada	Massa vol. aparente seca [Kg/m ³]	Espessura d, [m]	Condut. térmica λ , [W/(m. °C)]	Resistência Térmica R, [m ² . °C/W]	Resistência Térmica R, [m ² . °C/W]
1	Placa MDF hidrófugo		0,019	0,140		0,136
2	Isolante térmico Wallmate IB		0,150	0,031		4,839
3	Placa MDF hidrofugo		0,019	0,140		0,136
Espessura total, em metros:			0,188		$\sum R_j =$	5,110
Resistências térmicas superficiais:						Fluxo horizontal
Resistência térmica superficial interior, R_{si} , em [m ² . °C/W]					$R_{si} =$	0,13
Resistência térmica superficial exterior, R_{se} , em [m ² . °C/W]					$R_{se} =$	0,04
Coeficiente de transmissão térmica superficial:						Fluxo horizontal
Coeficiente de transmissão térmica superficial, U, em [W/(m ² . °C)]:						0,189

Para garantir uma temperatura constante dentro da câmara, foi utilizado o aparelho de ar condicionado disponível no laboratório, ligado em circuito fechado com uma resistência de aquecimento de 1,5 KW e que permaneceu ligada durante todo o ensaio.



Na figura 4.4 é mostrado o esquema de funcionamento da câmara do laboratório juntamente com o ar condicionado. O ar sai da câmara por uma ranhura na parte superior de uma das paredes laterais, passa pelo túnel do aparelho de ar condicionado onde é aquecido através da resistência eléctrica e volta a entrar na câmara por uma ranhura localizada na parte inferior da mesma parede lateral da saída.

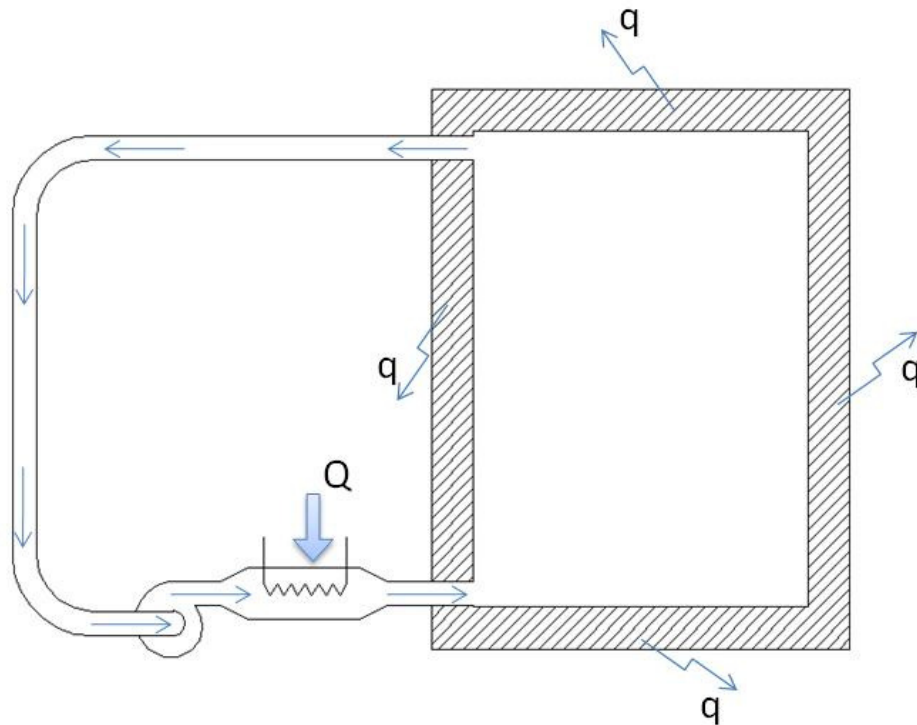


Figura 4.4 - Esquema de funcionamento da câmara do laboratório

A medição teve uma duração de 20 horas, tendo-se iniciado às 16:23h do dia 12 de Janeiro de 2011 e terminado às 12:23h do dia seguinte.

O instrumento de medição foi instalado no interior da câmara e a sonda sem fios no exterior.

Na figura 4.5 é apresentado o gráfico dos resultados obtidos neste ensaio, juntamente com a identificação de zona obtida através do programa da análise preliminar dos resultados.

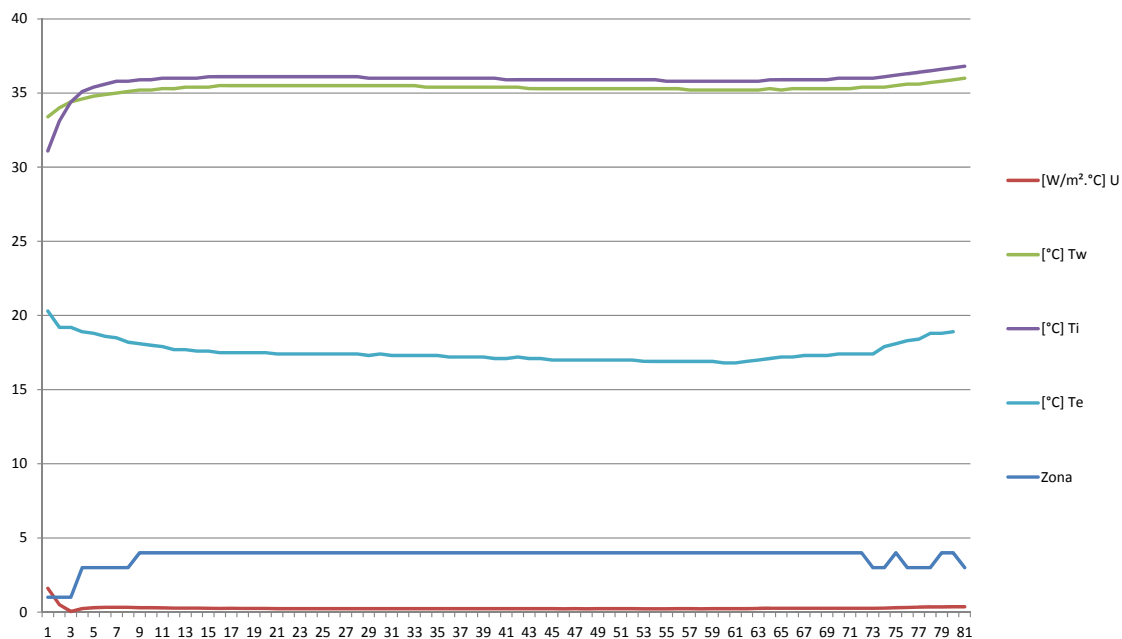


Figura 4.5 - Gráfico dos resultados obtidos com identificação de zona para o ensaio 1

Tabela 4.3 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.5

U [W/m ² °C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
0,272	35,311	35,868	17,549

Através da identificação da zona pode-se fazer uma análise rápida dos valores obtidos. Olhando para a linha de zona verifica-se que neste ensaio, esta permanece no nível 4 durante quase todo o ensaio, tendo um início no nível 1 passando para nível 3 e para o nível 4 depois de garantir o critério de estabilidade. Com base na informação de zona deste gráfico foram isolados os resultados que se situam na zona 4 e foi produzido um novo gráfico com uma escala mais refinada, apresentado na figura 4.6, apenas com os valores de U.

Dos valores representados no gráfico da figura 4.6 foi calculada a média apresentada na tabela 4.4 e este será o valor do coeficiente global de transmissão térmica da parede em estudo medido neste ensaio.

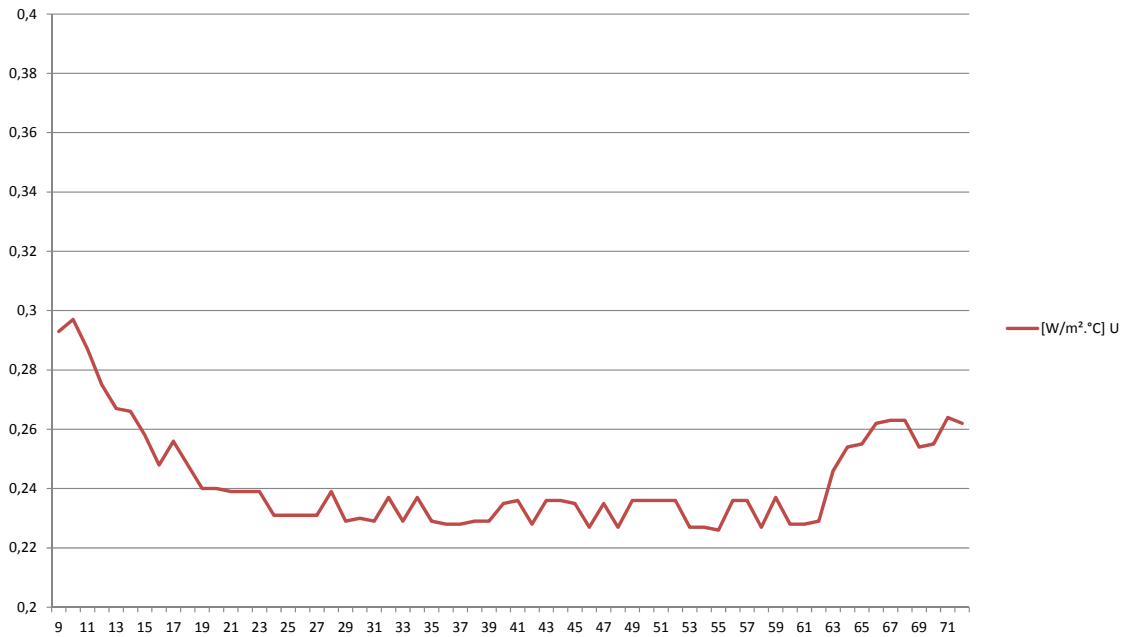


Figura 4.6 - Pormenor do gráfico dos valores de U no intervalo de zona 4 para o ensaio 1

Tabela 4.4 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.6

U [W/m ² °C]	0,242
-------------------------	-------

Neste gráfico pode ainda verificar-se que existe uma zona onde o valor de U quase não varia com o tempo, podendo assim dizer-se que o valor de U nessa zona é calculado em condições de estabilidade máxima.

Deste ensaio podemos concluir que o valor medido tem uma boa aproximação do valor teórico calculado, mas é um pouco mais elevado, sendo o valor teórico calculado de 0,189 W/m²°C e o valor medido de 0,242 W/m²°C, com uma diferença entre eles de 0,053 W/m²°C o que corresponde a uma variação de 28% em relação ao valor teórico calculado.

Ensaio 2

Este ensaio foi realizado a uma parede da envolvente exterior do pólo das Engenharias da Universidade da Beira Interior.

A medição teve uma duração de 20 horas, tendo-se iniciado às 15:35h do dia 1 de Fevereiro de 2011 e terminado às 11:35h do dia seguinte.



Na figura 4.7 encontra-se esquematizada a constituição da parede estudada neste ensaio. Esta é composta (do interior para o exterior) por estuque tradicional (1,5 cm), tijolo furado (20 cm), espaço de ar não ventilado (13 cm), tijolo furado (11 cm) e isolante térmico EPS (5 cm), com um total de 50,5 cm de espessura.

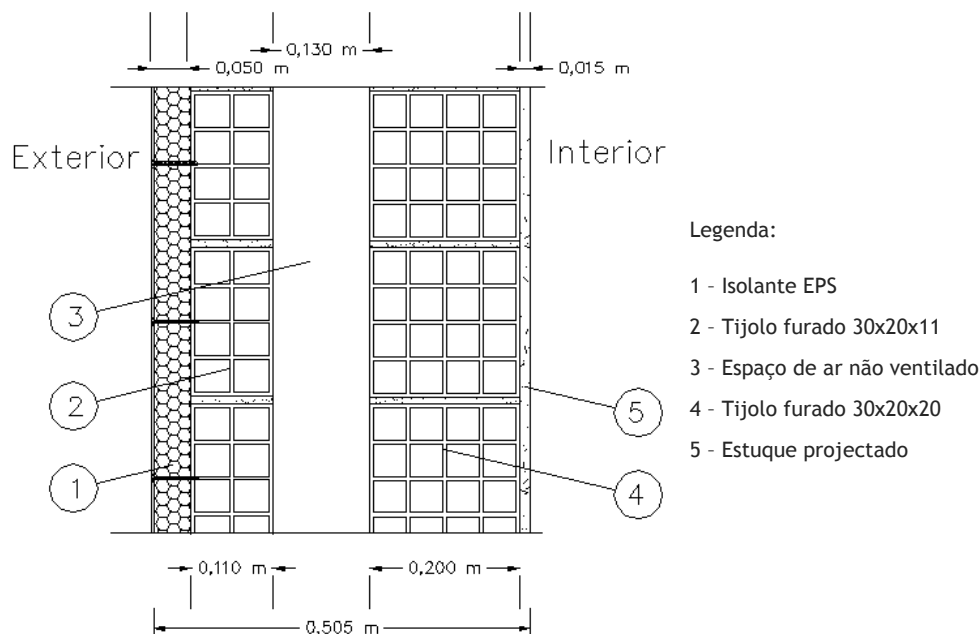


Figura 4.7 - Esquema de representação da parede da envolvente exterior do pólo das engenharias

Na tabela 4.5 são apresentados cálculos dos valores das resistências das várias camadas e do valor teórico do coeficiente global de transmissão térmica para a parede testada.

Tabela 4.5 - Cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 2

Resistência térmica das camadas:					Fluxo horizontal	
Camada	Descrição da camada	Massa vol. aparente seca [Kg/m ³]	Espessura d, [m]	Condut. térmica λ , [W/(m. °C)]	Resistência Térmica R, [m ² . °C/W]	Resistência Térmica R, [m ² . °C/W]
1	Estuque tradicional	900 - 1000	0,015	1,430		0,010
2	Tijolo furado 30x20x20 ao alto		0,200		0,520	0,520
3	Espaço de ar não ventilado		0,130		0,180	0,180
4	Tijolo furado 30x20x11 ao alto		0,110		0,270	0,270
5	Isolante térmico eps		0,050	0,037		1,351
Espessura total, em metros:			0,505		$\sum R_j =$	2,332
Resistências térmicas superficiais:					Fluxo horizontal	
Resistência térmica superficial interior, R_{si} , em [m ² . °C/W]					$R_{si} =$	0,13
Resistência térmica superficial exterior, R_{se} , em [m ² . °C/W]					$R_{se} =$	0,04
Coeficiente de transmissão térmica superficial:					Fluxo horizontal	
Coeficiente de transmissão térmica superficial, U, em [W/(m ² . °C)]:						0,400



Este foi o primeiro ensaio *in situ* realizado, tendo-se aplicado o mesmo tempo do ensaio executado em laboratório.

Os resultados obtidos são apresentados na figura 4.8 na forma de gráfico, juntamente com a classificação de zona obtida através do programa da análise preliminar dos resultados. Neste ensaio não se obteve o mesmo nível de estabilidade que no ensaio 1, efectuado em laboratório, pelo facto de as temperaturas não serem constantes e controladas.

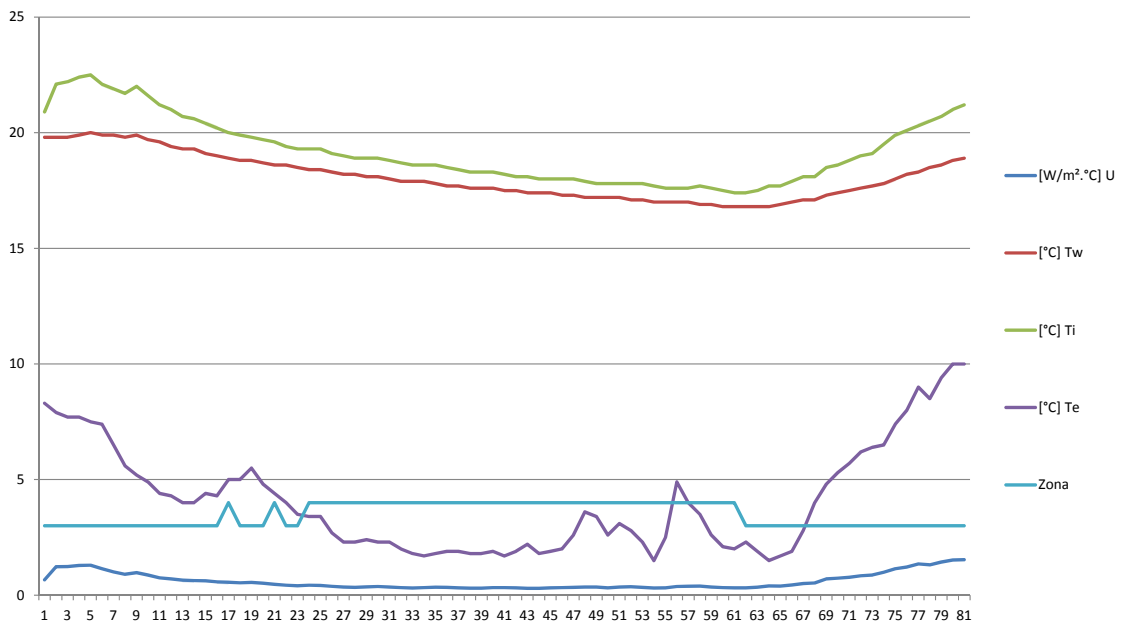


Figura 4.8 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 2 com identificação de zona

Tabela 4.6 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.8

U [W/m ² °C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
0,600	18,072	19,201	4,102

No gráfico apresentado na figura 4.8 podemos verificar que a temperatura exterior é a mais inconstante, pois esta depende das condições atmosféricas, que não podem ser controladas. As temperaturas interior e da parede dependem das condições climáticas interiores e variam com o sistema de climatização do edifício.

Analisando a classificação de zona obtida através do programa da análise preliminar dos resultados podemos verificar que existe uma zona em que os critérios de estabilidade definidos no programa são garantidos. Para melhor se visualizarem as variações do “valor U” nessa zona foi produzido um novo gráfico (figura 4.9) com escala mais refinada que apresenta os valores do coeficiente de transmissão térmica no intervalo de zona 4, da medição 24 à 61.

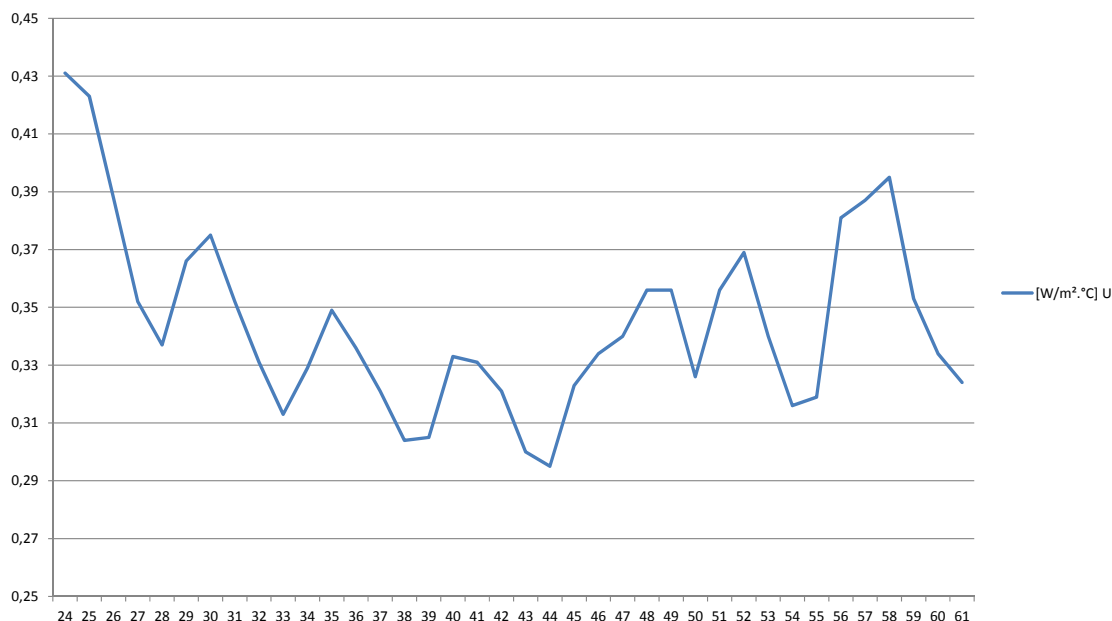


Figura 4.9 - Pormenor do gráfico dos valores de U no intervalo de zona 4 para o ensaio 2

Tabela 4.7 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.9

U [W/m ² °C]	0,345
-------------------------	-------

No gráfico apresentado na figura 4.9, pode visualizar-se que o valor-U nesse intervalo varia entre 0,29 W/m²°C e 0,43 W/m²°C, ou seja uma variação de 0,14 num intervalo de tempo de 9 horas e 15 minutos. Com base nos valores obtidos neste intervalo, foi calculada a média que é apresentada na tabela 4.7, e esse é o valor do coeficiente global obtido.

Deste ensaio podemos concluir que o valor medido tem uma boa aproximação do valor teórico calculado, mas é um pouco menor, sendo o valor teórico calculado de 0,400 W/m²°C e o valor medido de 0,345 W/m²°C, com uma diferença entre eles de 0,055 W/m²°C que corresponde a uma variação de 14% em relação ao valor teórico calculado.

Ensaio 3

Neste ensaio testou-se uma parede em alvenaria simples, de 24 cm de espessura, composta (do interior para o exterior) por reboco de argamassa de cimento (2 cm), bloco de alvenaria (20 cm) e reboco de argamassa de cimento (2 cm), como representado na figura 4.10. Esta parede tem orientação a Noroeste e o ensaio foi realizado no período de inverno com uma duração de 48h, tendo-se iniciado às 22:23h do dia 3 de Fevereiro.

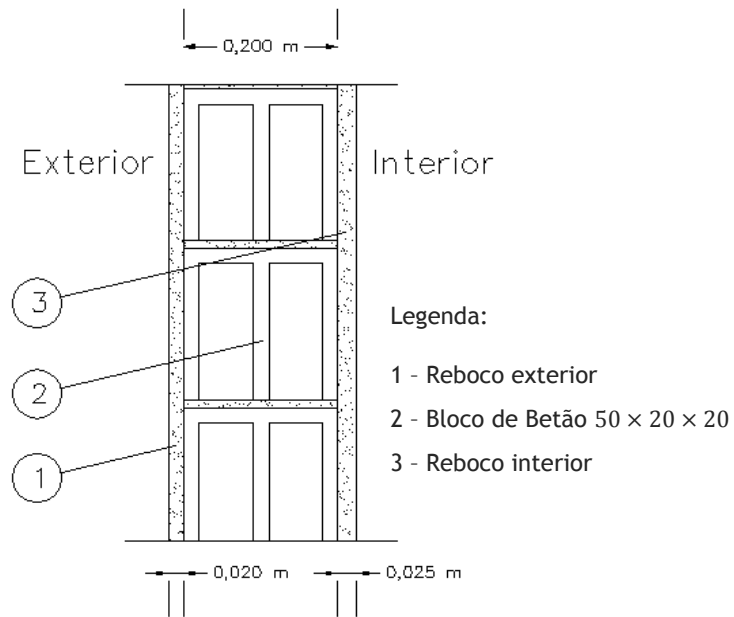


Figura 4.10 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 3

A constituição foi obtida através de dados fornecidos pelo proprietário, de medições realizadas às paredes, de dados visíveis e reportagem fotográfica cedida pelo dono da habitação apresentada na figura 4.11.



Figura 4.11 - Fotografia da constituição da parede em estudo numa zona sem reboco interior

Na tabela 4.8 são apresentados cálculos dos valores das resistências das várias camadas e do valor teórico do coeficiente global de transmissão térmica para a parede testada no ensaio 3 e 4.



Tabela 4.8 - Cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 3 e 4

Resistência térmica das camadas:						Fluxo horizontal
Camada	Descrição da camada	Massa vol. aparente seca [Kg/m ³]	Espessura d, [m]	Condut. térmica λ , [W/(m.°C)]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]
1	Reboco interior em argamassa tradicional	1800 - 2000	0,020	1,300		0,015
2	Bloco de alvenaria 50x20x20		0,200		0,300	0,300
3	Reboco exterior em argamassa tradicional	1800 - 2000	0,025	1,300		0,019
<i>Espessura total, em metros:</i>			0,245	$\sum R_j =$		0,335
Resistências térmicas superficiais:						Fluxo horizontal
Resistência térmica superficial interior, R_{si} , em [m ² .°C/W]					$R_{si} =$	0,13
Resistência térmica superficial exterior, R_{se} , em [m ² .°C/W]					$R_{se} =$	0,04
Coeficiente de transmissão térmica superficial:						Fluxo horizontal
Coeficiente de transmissão térmica superficial, U, em [W/(m ² .°C)]:						1,982

Os resultados deste ensaio são apresentados na figura 4.12 na forma de gráfico, onde podemos verificar que estes se apresentam de uma forma cíclica, e a frequência é exactamente 24 horas ou seja um dia, que neste caso de estudo perfaz dois ciclos.

Neste ensaio tanto as variações das temperaturas como do valor U são bastante acentuadas, sendo a análise mais difícil. Olhando para a linha da classificação de zona, concluímos que neste caso existem duas zonas distintas:

1. Uma zona definida como zona 3, em que a disposição gradual das temperaturas é a correcta e existe diferença superior à relação entre a temperatura interior e a temperatura da parede definida de 0,3°C, mas não se verifica o critério de estabilidade.
2. Uma zona definida como zona 1, em que a disposição gradual das temperaturas é transposta pelo aumento da temperatura exterior, influenciada pela radiação solar durante um pequeno período do dia.

Da análise no gráfico do valor-U, pode-se visualizar, que este atinge picos de valor elevado quando a temperatura exterior excede o valor da temperatura da parede e toma um valor entre esta e a temperatura interior, isto devido à fórmula de cálculo do valor-U.

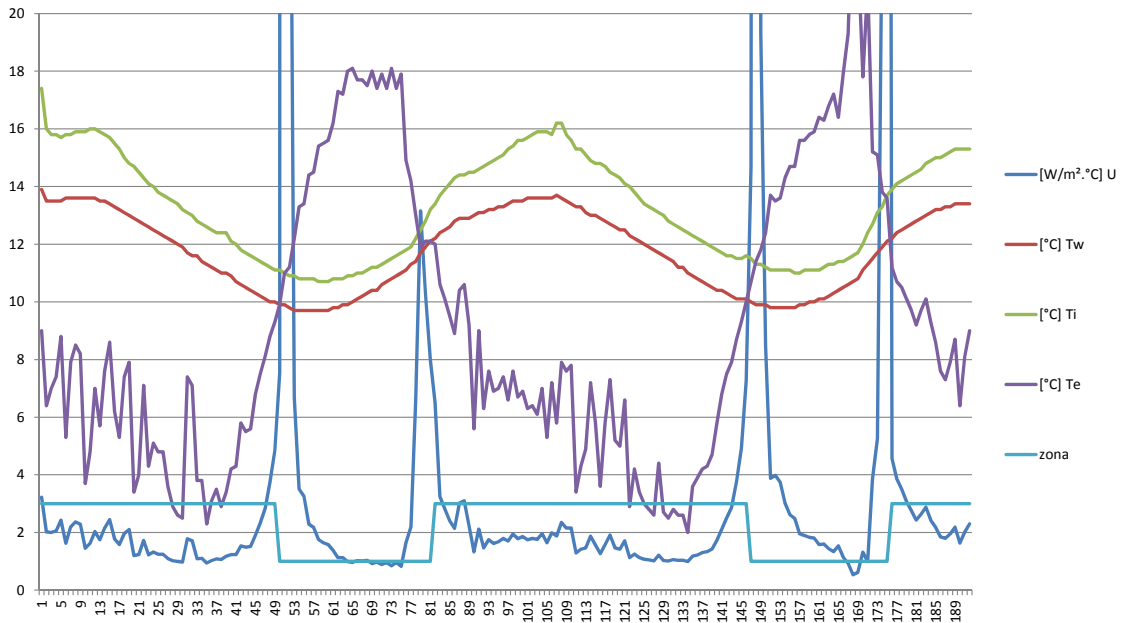


Figura 4.12 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 3 com identificação das zonas

Tabela 4.9 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.12

U [W/m ² °C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
100,872	11,739	13,238	9,279

Por não se ter atingido a estabilidade pretendida, não se conseguiu obter um resultado confiável para o valor U.

Ensaio 4

Este caso de estudo teve lugar na mesma casa de habitação que o anterior, numa parede da envolvente com o exterior, com a mesma caracterização, mas esta com orientação a Sudoeste e em condições de meia estação.

Esta medição teve uma duração de 48 horas, tendo-se iniciado às 16:50h do dia 13 de Maio de 2011.

Os resultados deste ensaio são apresentados na figura 4.13 na forma de gráfico, onde podemos verificar que o critério de estabilidade definido no programa da análise preliminar dos resultados não foi atingido, pois a zona nunca atinge o valor 4. Neste caso por ser meia estação a temperatura interior e a temperatura exterior estão próximas, e sendo um dos



requisitos impostos pelo fabricante do equipamento utilizado, uma diferença significativa entre estas duas temperaturas, este ensaio não teve o resultado desejado.

Observando a linha da temperatura exterior podemos observar uma região entre as medições 145 e 155 onde esta cai para o valor zero. Este fenómeno deve-se a uma falha no sensor por rádio frequência para a obtenção da temperatura exterior, ou falha de comunicação entre o sensor e o equipamento.

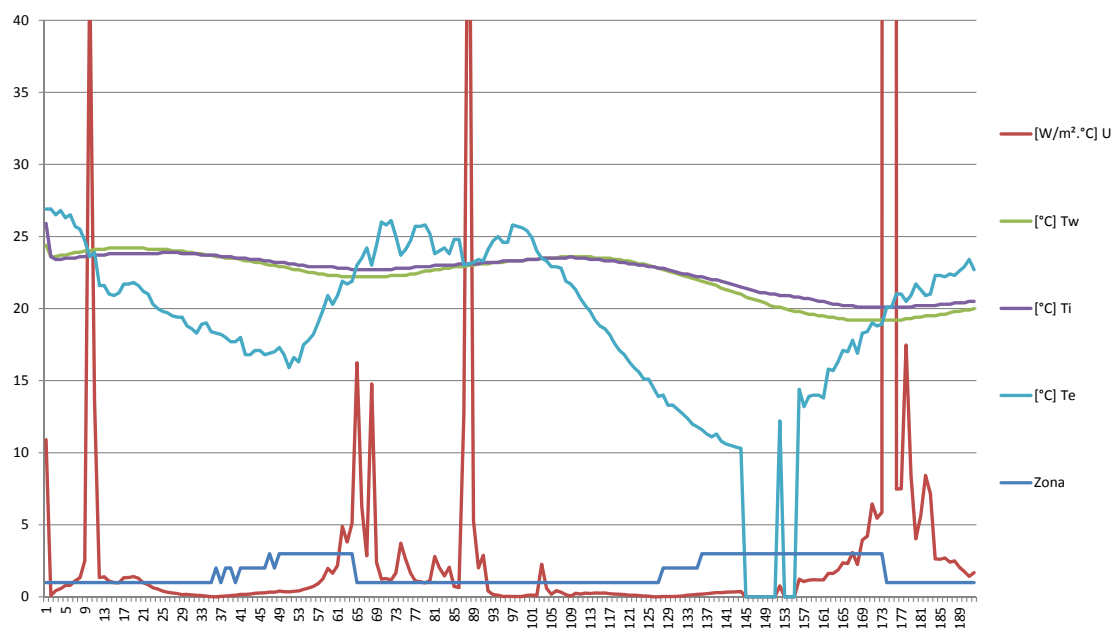


Figura 4.13 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 12 com identificação das zonas

Tabela 4.10 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.13

U [W/m ² °C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
16,896	22,226	22,502	18,858

Neste ensaio também não é possível obter um valor confiável para U por não se ter atingido a estabilidade pretendida.

Deste ensaio pode-se concluir em comparação com o anterior que a estação do ano pode influenciar na obtenção de um resultado, porque embora não tenha sido possível obter um resultado para o valor-U nos dois ensaios, no ensaio realizado de inverno tínhamos tudo para o obter, só não se obteve por não se ter verificado o critério de estabilidade, que no caso do ensaio de verão tem múltiplas complicações, como por exemplo a proximidade das temperaturas interior e exterior e a inversão da disposição das temperaturas.

Ensaio 5

No ensaio 5 testou-se uma parede em alvenaria dupla, de 36 cm de espessura, com isolamento na caixa-de-ar, composta (do interior para o exterior) por reboco de argamassa de cimento (2 cm), tijolo furado (7 cm), isolante térmico lã-de-vidro (5 cm), espaço de ar não ventilado (1cm), tijolo furado (22 cm) e reboco de argamassa de cimento (2 cm), como representado na figura 4.14. Esta parede tem orientação a sudeste e o ensaio foi realizado no período de inverno com uma duração de 48 horas, tendo-se iniciado às 14:46h do dia 6 de Fevereiro de 2011.

O edifício foi construído em 2000 e a constituição das paredes exteriores foi obtida através de dados fornecidos pelo proprietário e de medições realizadas às paredes.

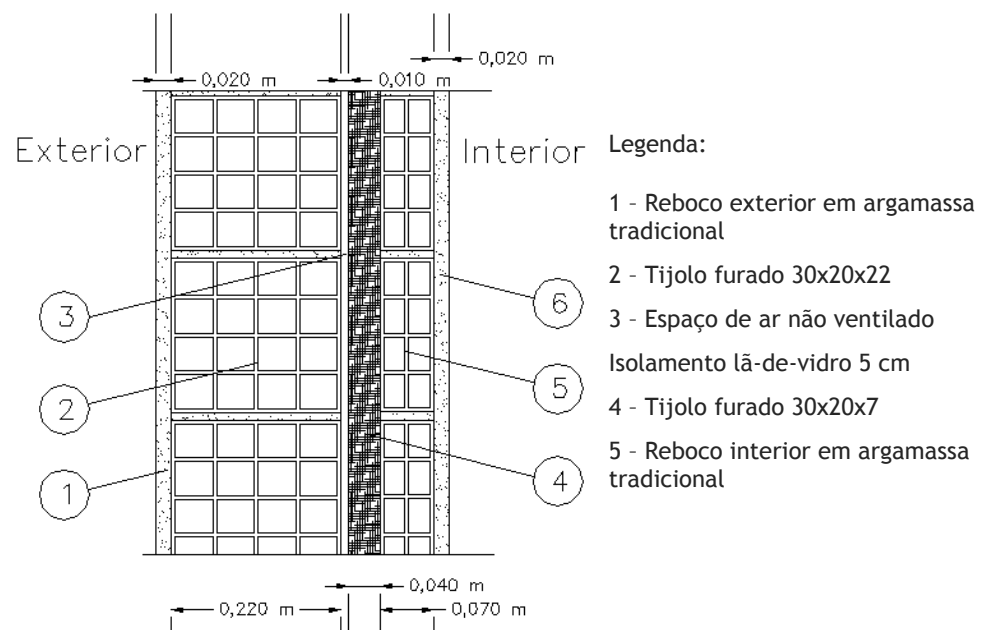


Figura 4.14 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 5 e 6 e respectiva legenda

Na tabela 4.11 são apresentados cálculos dos valores das resistências das várias camadas e do valor teórico do coeficiente global de transmissão térmica para a parede testada neste caso de estudo.



Tabela 4.11 - Cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 5 e 6

Resistência térmica das camadas:						Fluxo horizontal
Camada	Descrição da camada	Massa vol. aparente seca [Kg/m ³]	Espessura d, [m]	Condut. térmica λ , [W/(m.°C)]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]
1	Reboco interior em argamassa tradicional	1800 - 2000	0,020	1,300		0,015
2	Tijolo furado 30x20x7 ao alto		0,070		0,190	0,190
3	Isolante térmico lâ-de-vidro		0,050	0,042		1,190
4	Espaço de ar não ventilado		0,010		0,150	0,150
5	Tijolo furado 30x20x22 ao alto		0,220		0,520	0,520
6	Reboco exterior em argamassa tradicional	1800 - 2000	0,020	1,300		0,015
<i>Espessura total, em metros:</i>			0,390		$\sum R_j =$	2,081
Resistências térmicas superficiais:						Fluxo horizontal
Resistência térmica superficial interior, R_{si} , em [m ² .°C/W]					$R_{si} =$	0,13
Resistência térmica superficial exterior, R_{se} , em [m ² .°C/W]					$R_{se} =$	0,04
Coeficiente de transmissão térmica superficial:						Fluxo horizontal
Coeficiente de transmissão térmica superficial, U, em [W/(m ² .°C)]:						0,444

Os resultados deste ensaio são apresentados na figura 4.15 na forma de gráfico. Da análise deste gráfico pode-se verificar que foi atingido o critério de estabilidade em dois pontos distintos, classificados como zona 4.

Neste caso pode-se observar no gráfico regiões em que a temperatura da parede excede claramente a temperatura interior, sendo nessas medições o valor de temperatura mais elevado. Este fenómeno deve-se à inércia térmica da parede, ou seja à energia térmica acumulada na parede interior que é libertada quando a temperatura interior diminui devido à fuga por pontes térmicas noutros elementos da envolvente da habitação como por exemplo em janelas ou tecto.

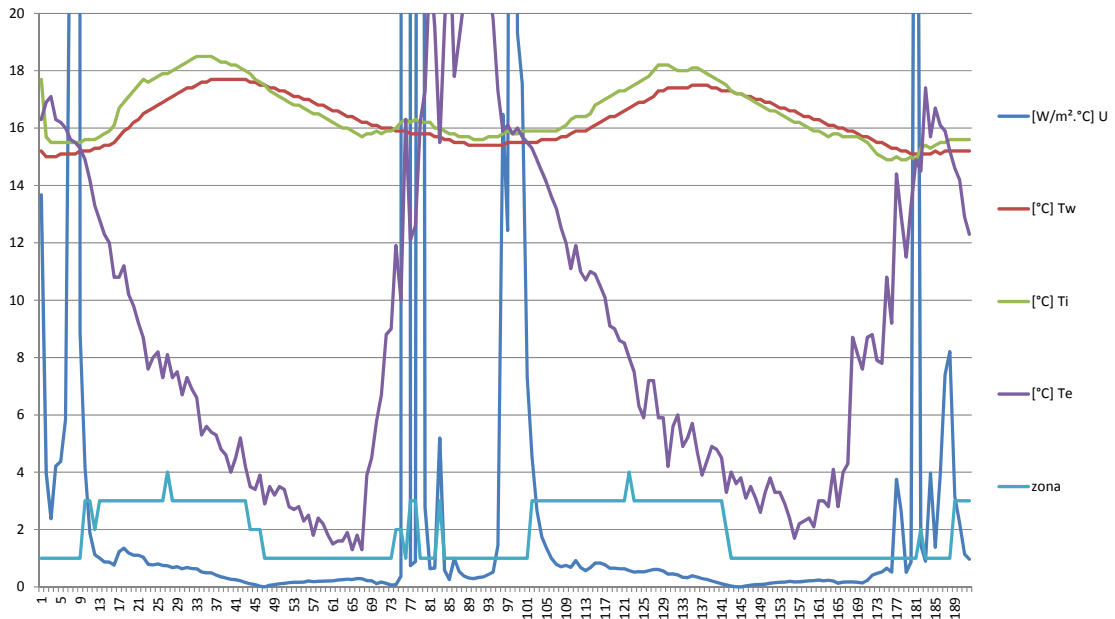


Figura 4.15 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 4 com identificação das zonas

Tabela 4.12 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.15

U [W/m ² °C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
8,146	16,271	16,533	9,122

Neste caso, visto que o critério de estabilidade se verifica num ponto e que este consiste na verificação da diferença entre o valor em estudo e os seus vizinhos no intervalo de 2 horas, considerou-se para estimar o valor do coeficiente global de transmissão térmica o intervalo de nove valores que o compreende no centro, ou seja, este valor, os quatro valores anteriores e os quatro valores seguintes e foi elaborado um novo gráfico (figura 4.16) onde se apresenta o valor-U nesse intervalo.

Com base nos valores obtidos neste intervalo, foi calculada a média que é apresentada na tabela 4.13, e é esse o valor do coeficiente global medido.

Da comparação do valor medido com o valor teórico calculado podemos concluir para este ensaio, que os dois valores têm uma discrepância considerável, sendo o valor teórico calculado de 0,444 W/m²°C e o valor medido de 0,587 W/m²°C, existindo uma diferença entre eles de 0,143 W/m²°C, que corresponde a uma variação de 32% em relação ao valor teórico calculado.

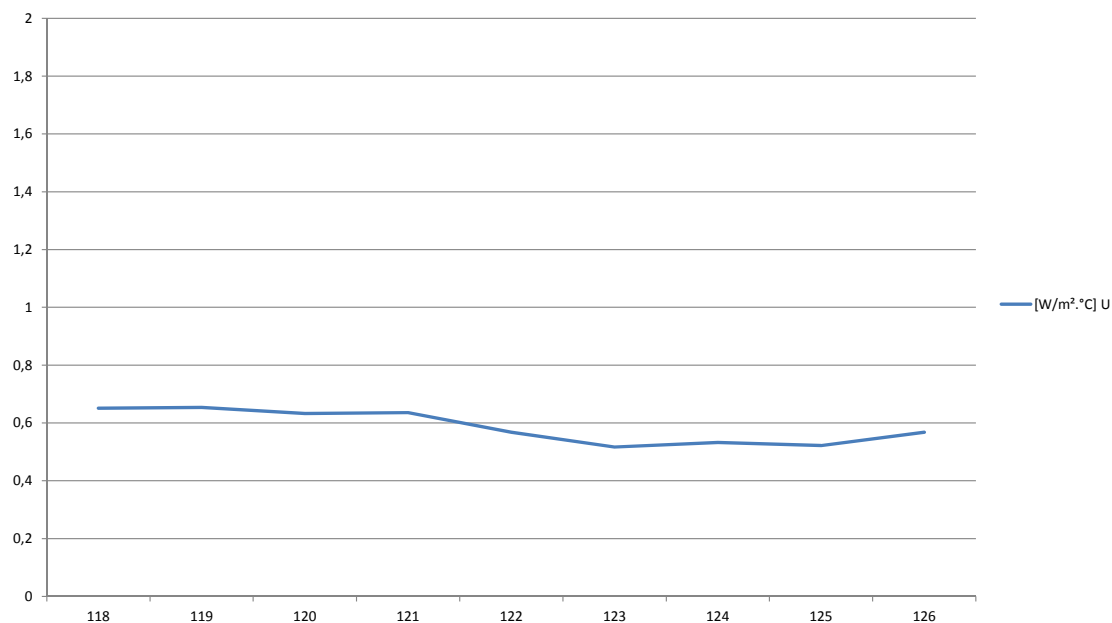


Figura 4.16 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 5 no intervalo de 118 a 126

Tabela 4.13 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.16

U [W/m ² °C]	0,587
-------------------------	-------

Ensaio 6

Neste ensaio testou-se a mesma parede que no ensaio anterior, também no período de inverno, tendo esta uma orientação a Nordeste. Este ensaio teve uma duração de 48 horas, tendo-se iniciado às 19:54h do dia 18 de Fevereiro de 2011.

Os resultados obtidos são apresentados na figura 4.17 na forma de gráfico onde se verifica que o critério de estabilidade foi conseguido em mais do que um ponto.

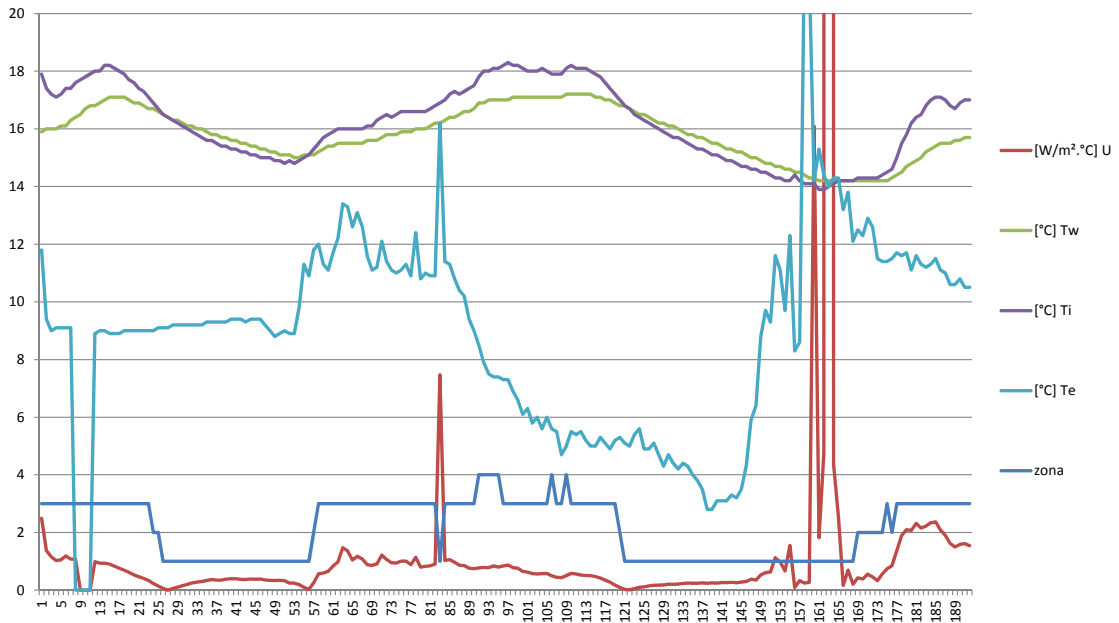


Figura 4.17 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 6 com identificação das zonas

Tabela 4.14 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.17

U [W/m ² °C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
18,832	15,833	16,218	8,896

Neste caso considerou-se para o cálculo do valor U o intervalo que compreende os valores classificados como zona 4 (da medição 91 à 109) representado na figura 4.18, e com base neste intervalo foi calculada a média apresentada na tabela 4.15 e é esse o valor do coeficiente global medido.

O resultado deste ensaio realizado na parede com orientação a nordeste é de 0,669 W/m²°C, tendo uma diferença do valor teórico calculado de 0,225 W/m²°C.

Da comparação com o resultado do ensaio anterior podemos concluir que para este caso com as mesmas características mas com orientação diferente o resultado obtido ainda se distancia mais do valor teórico. Se no ensaio 5 o valor medido era superior 0,143 W/m²°C ao valor teórico, neste ensaio ele é superior 0,225 W/m²°C, que corresponde a uma variação de 51% em relação ao valor teórico calculado.

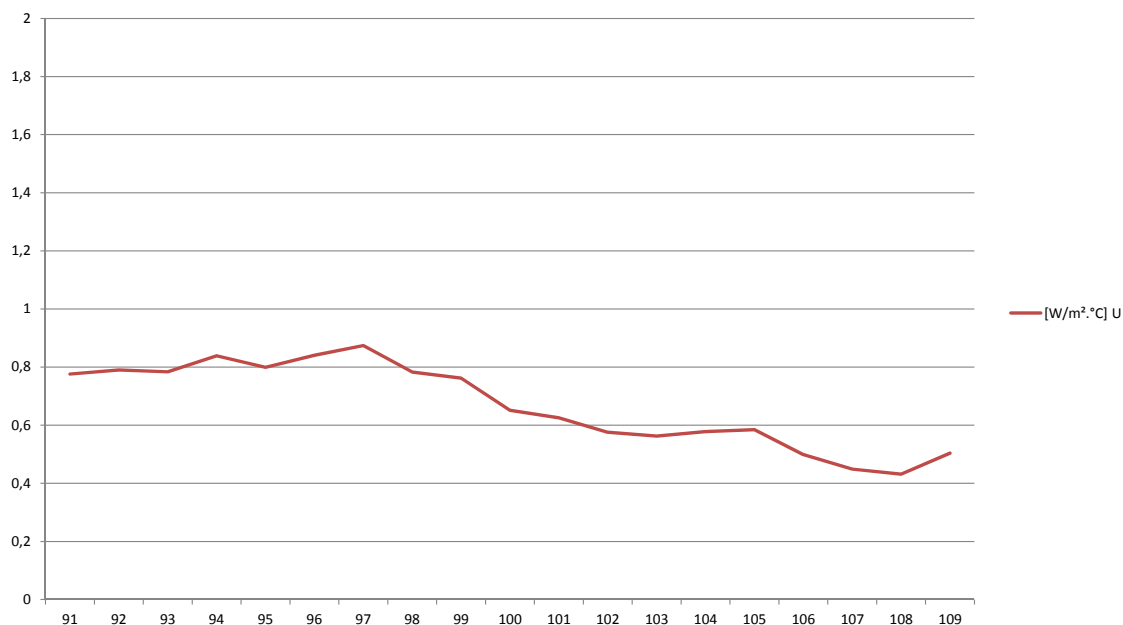


Figura 4.18 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 6 no intervalo de 91 a 109

Tabela 4.15 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.18

U [W/m ² °C]	0,669
-------------------------	-------

Ensaio 7

Este caso de estudo foi realizado a uma parede da envolvente exterior com orientação sul de um apartamento sito em Guarda com construção de 1999. Foi testada uma parede em alvenaria dupla, de 36 cm de espessura, com isolamento na caixa-de-ar, composta (do interior para o exterior) por estuque projectado (1,5 cm), tijolo furado (11 cm), isolante térmico XPS (4 cm), espaço de ar não ventilado (2 cm), tijolo furado (15 cm), emboço de argamassa tradicional (base para revestimento) (1,5 cm) e revestimento em pedra artificial (1 cm) como representado na figura 4.19.

Este ensaio teve uma duração de 42h, tendo-se iniciado às 18:26h do dia 2 de Março de 2011.

Na tabela 4.16 são apresentados cálculos dos valores das resistências das várias camadas e do valor teórico do coeficiente global de transmissão térmica para a parede testada neste ensaio.

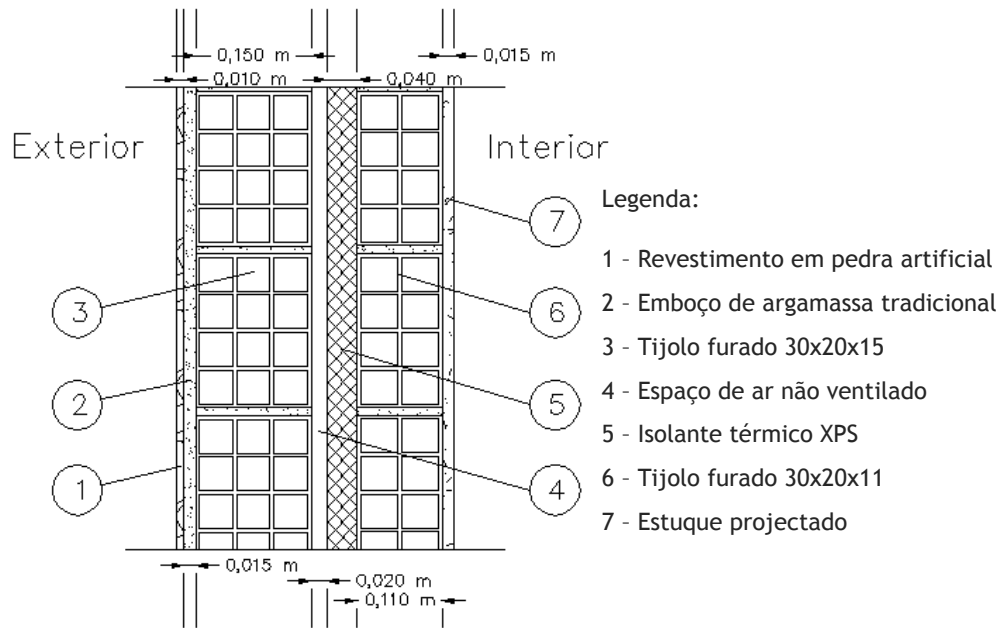


Figura 4.19 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 7 e respectiva legenda

Tabela 4.16 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 7

Resistência térmica das camadas:					Fluxo horizontal	
Camada	Descrição da camada	Massa vol. aparente seca [Kg/m ³]	Espessura d, [m]	Condução térmica λ , [W/(m. °C)]	Resistência Térmica R_j , [m ² . °C/W]	Resistência Térmica R_j , [m ² . °C/W]
1	Estuque projectado	900-1200	0,015	0,430		0,035
2	Tijolo furado 30x20x11 ao alto		0,110		0,270	0,270
3	Isolante térmico xps	35	0,040	0,037		1,081
4	Espaço de ar não ventilado		0,020		0,170	0,170
5	Tijolo furado 30x20x15 ao alto		0,150		0,390	0,390
6	Emboço de argamassa tradicional (base para revestimento)	1800 - 2000	0,015	1,300		0,012
7	Revestimento em pedra artificial	1750	0,010	1,300		0,008
<i>Espessura total, em metros:</i>			0,360		$\sum R_j =$	1,965
Resistências térmicas superficiais:					Fluxo horizontal	
Resistência térmica superficial interior, R_{si} , em [m ² . °C/W]					$R_{si} =$	0,13
Resistência térmica superficial exterior, R_{se} , em [m ² . °C/W]					$R_{se} =$	0,04
Coeficiente de transmissão térmica superficial:					Fluxo horizontal	
Coeficiente de transmissão térmica superficial, U, em [W/(m ² . °C)]:						0,468



Os valores resultantes da medição *in situ* a esta parede, são apresentados na figura 4.20. Da análise da classificação de zona é possível identificar duas regiões distintas com classificação zona 4 em que o critério de estabilidade foi atingido.

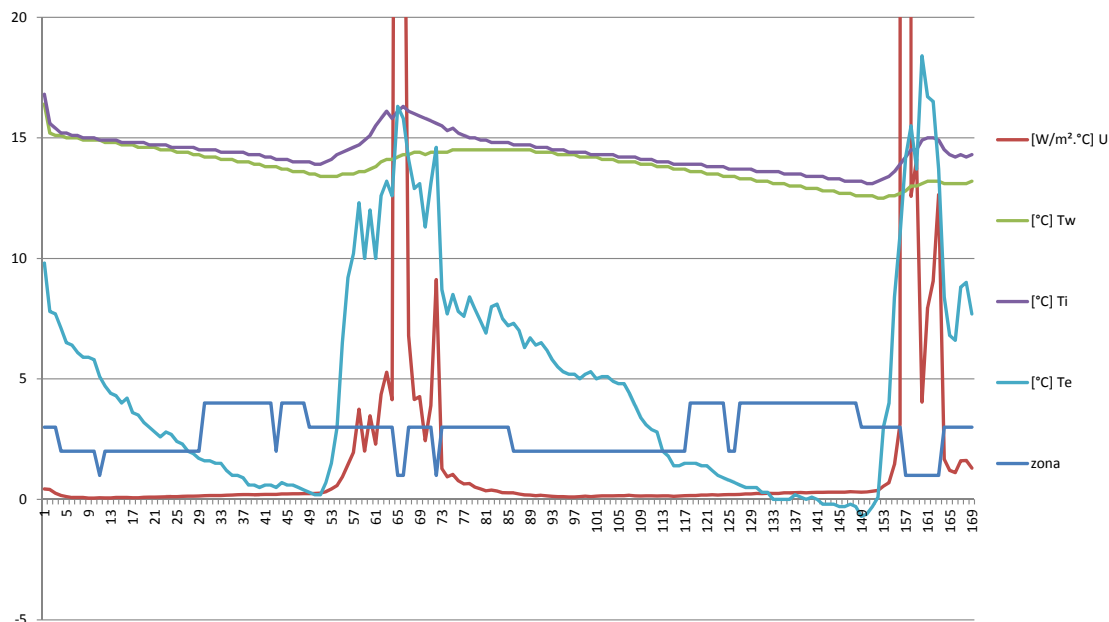


Figura 4.20 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 6 com identificação das zonas

Tabela 4.17 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.20

U [W/m ² °C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
15,179	13,870	14,421	4,817

Para a obtenção do valor U para esta parede isolaram-se os dados do segundo intervalo (da medição 118 à 148) num novo gráfico (figura 4.21) e com base nesses valores calculou-se a média que é apresentada na tabela 4.18 que é o valor medido de U para este ensaio.

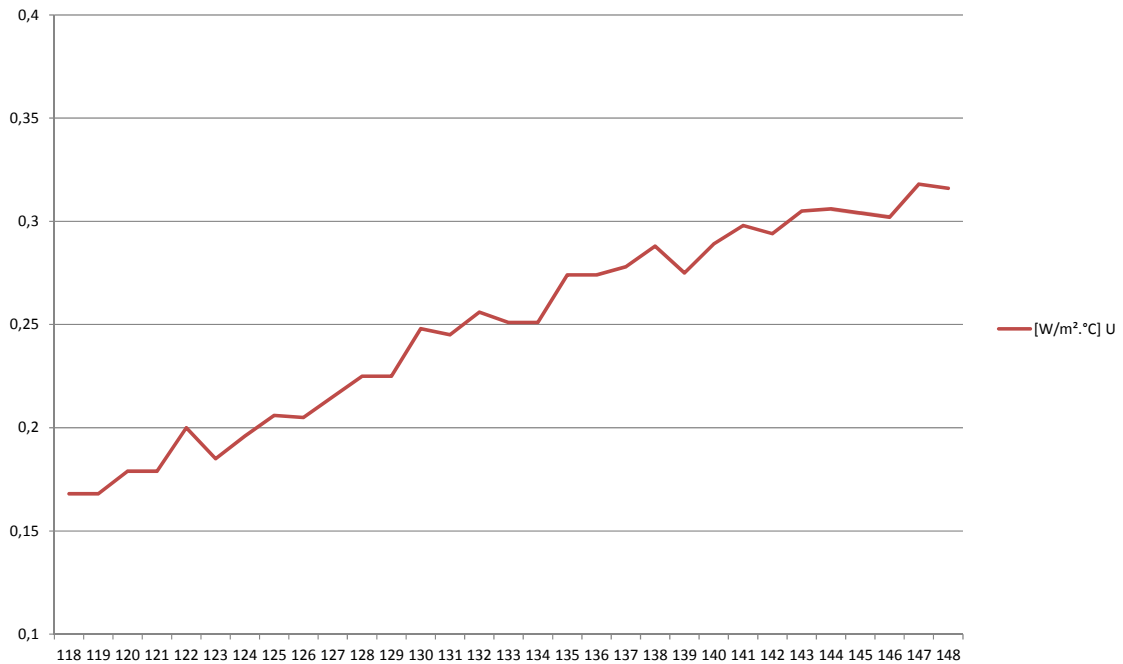


Figura 4.21 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 7 no intervalo de 118 a 148

Tabela 4.18 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.21

U [W/m ² °C]	0,249
-------------------------	-------

O valor do coeficiente global de transmissão térmica medido neste ensaio é muito inferior ao valor teórico calculado, sendo o valor medido de 0,249 W/m²°C e o calculado de 0,468 W/m²°C, com uma diferença entre eles de 0,219 W/m²°C, que corresponde a uma variação de 47% em relação ao valor teórico calculado.

Ensaio 8

Este ensaio foi realizado na mesma habitação que o ensaio anterior, na mesma parede, com a mesma orientação e no mesmo local de ensaio. As condições deste ensaio diferem do anterior, somente nas temperaturas verificadas. Este ensaio foi realizado num período quente.

Esta medição teve uma duração de 48 horas, tendo-se iniciado às 16:50h do dia 5 de Julho de 2011.

Os resultados deste ensaio são apresentados na figura 4.22 na forma de gráfico. Da análise deste, pode verificar-se que em nenhum momento foi atingido o critério de estabilidade. Deste ensaio e em comparação com o anterior, podemos concluir que para a mesma parede

mas em condições climatéricas diferentes temos resultados diferentes, não se conseguindo obter valores para U no período de Verão. À semelhança do que já se tinha concluído noutro ensaio para a mesma parede em condições de temperatura diferentes, neste ensaio também se pode concluir que a estação do ano interfere muito nos resultados obtidos.

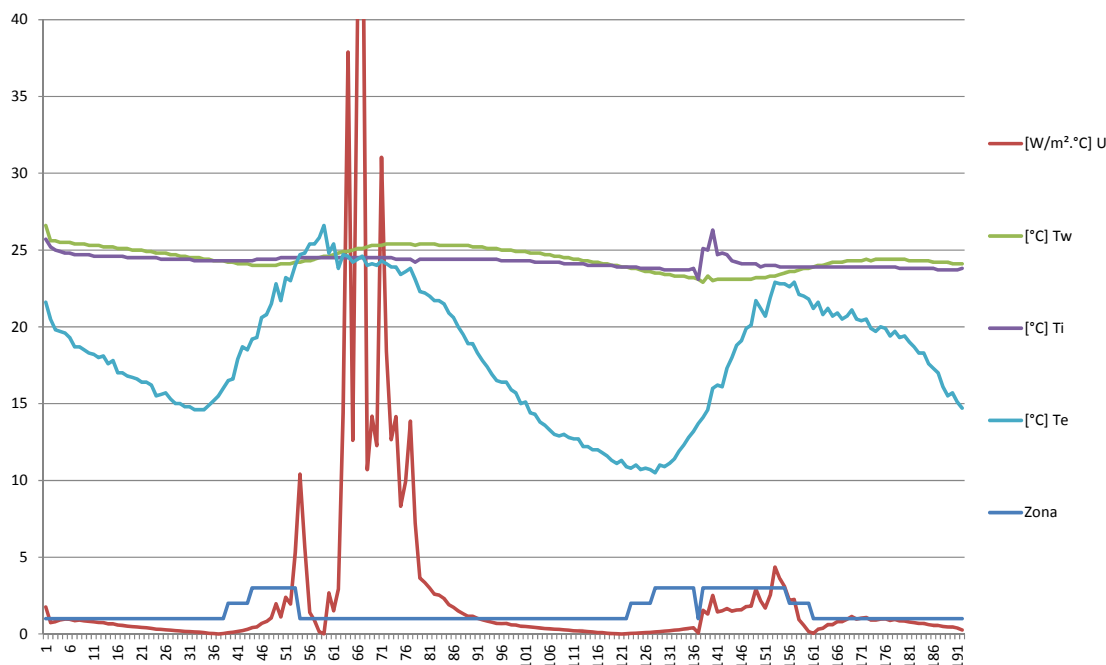


Figura 4.22 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 15 com identificação das zonas

Tabela 4.19 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.22

U [W/m ² °C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
2,502	24,427	24,246	18,197

Ensaio 9

O objecto de estudo deste ensaio foi uma parede em alvenaria dupla, de 38 cm de espessura, com isolamento na caixa-de-ar, composta (do interior para o exterior) por estuque tradicional (1,5 cm), tijolo furado (11 cm), isolante térmico XPS (6 cm), espaço de ar não ventilado (2 cm), tijolo furado (15 cm) e reboco exterior em argamassa tradicional (2,5 cm) como representado na figura 4.23. Esta parede tem orientação a sudoeste e o ensaio foi realizado no período de inverno com uma duração de 48 horas, tendo-se iniciado às 09:59h do dia 12 de Março de 2011.

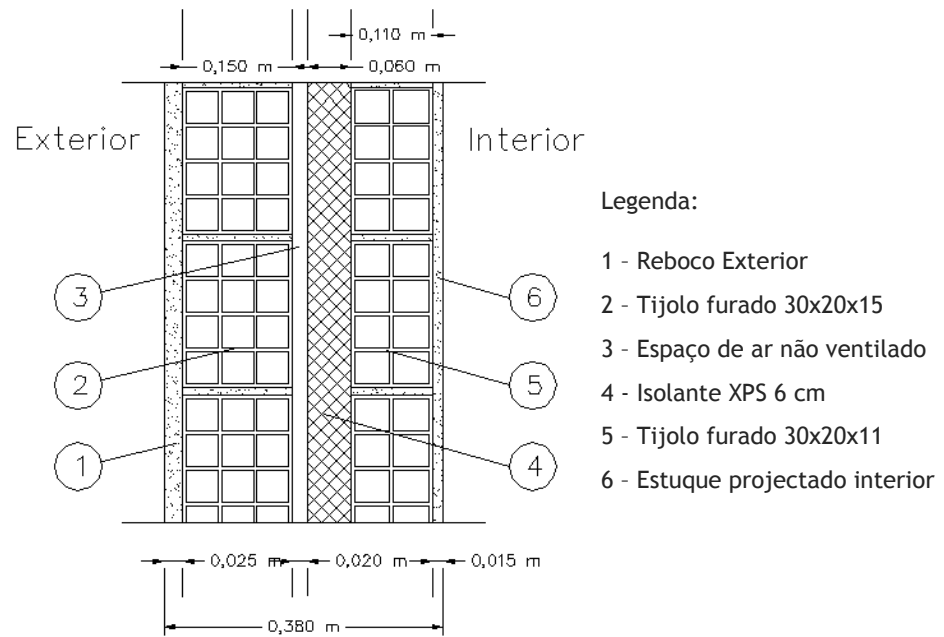


Figura 4.23 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 7

O edifício foi construído em 2010 e a constituição das paredes exteriores foi obtida através de dados fornecidos pelo proprietário que constam do projecto e no certificado energético e através de fotografias da sua construção (figura 4.24).



Figura 4.24 - Fotografia do pormenor da parede durante a construção



Na tabela 4.20 são apresentados cálculos dos valores das resistências das várias camadas e do valor do coeficiente global de transmissão térmica para a parede testada.

Tabela 4.20 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 7

Resistência térmica das camadas:						Fluxo horizontal
Camada	Descrição da camada	Massa vol. aparente seca [Kg/m ³]	Espessura d, [m]	Condut. térmica λ , [W/(m.°C)]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]
1	Estuque tradicional	900 - 1000	0,015	0,400		0,038
2	Tijolo furado 30x20x11 ao alto		0,110		0,270	0,270
3	Isolante térmico xps	35	0,060	0,037		1,622
4	Espaço de ar não ventilado		0,020		0,170	0,170
5	Tijolo furado 30x20x15 ao alto		0,150		0,390	0,390
6	Reboco exterior em argamassa tradicional	1800 - 2000	0,025	1,300		0,019
<i>Espessura total, em metros:</i>			0,380		$\sum R_j =$	2,508
Resistências térmicas superficiais:						Fluxo horizontal
Resistência térmica superficial interior, R_{si} , em [m ² .°C/W]					$R_{si} =$	0,13
Resistência térmica superficial exterior, R_{se} , em [m ² .°C/W]					$R_{se} =$	0,04
Coeficiente de transmissão térmica superficial:						Fluxo horizontal
Coeficiente de transmissão térmica superficial, U, em [W/(m ² .°C)]:						0,373

Os resultados das medições efectuadas são apresentados na figura 4.26 no aspecto gráfico.

Através da identificação de zona podemos verificar que para este caso nem sempre o critério de estabilidade é garantido existindo algumas zonas 3. O aparecimento no gráfico de vários períodos classificados como zona 2, deve-se ao facto de se verificarem, ao longo da medição, diversos momentos em que as temperaturas interior e da parede estão muito próximas. Ainda assim consegue-se visualizar uma região no gráfico em que a estabilidade é garantida durante um período de tempo considerável (da medição 122 à 181).

Para a obtenção do valor U para esta parede isolaram-se os dados obtidos nesse intervalo de medição (da medição 122 à 181) num novo gráfico (figura 4.26) onde se apresentam os valores de U e dos quais se calculou a média que é apresentado na tabela 4.22 e é esse o valor de U estimado.

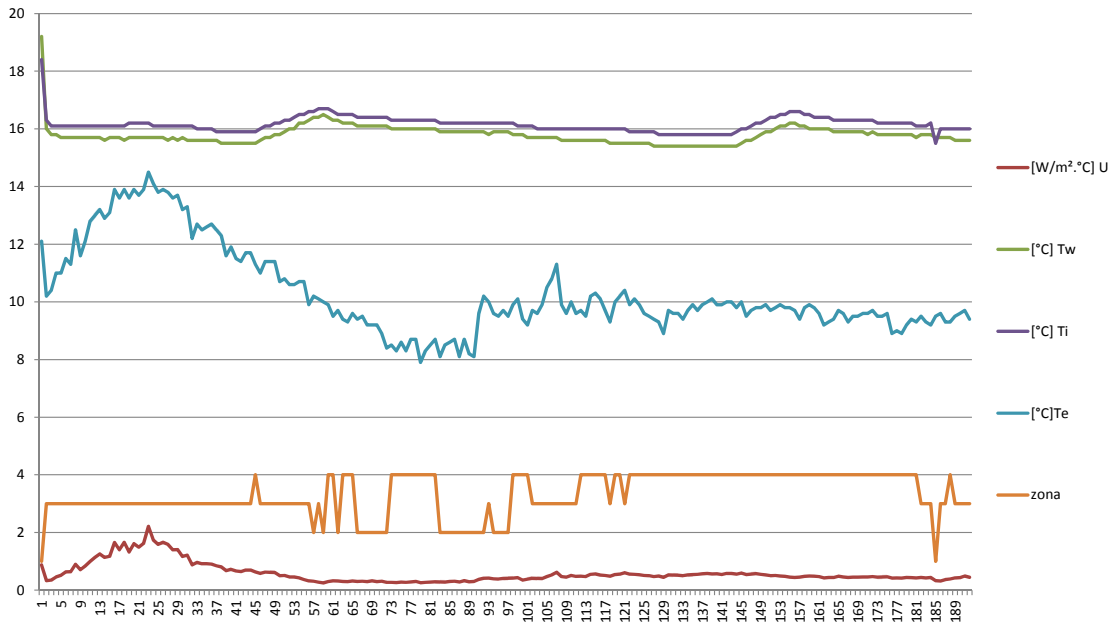


Figura 4.25 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 9 com identificação das zonas

Tabela 4.21 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.25

U [W/m ² °C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
0,584	15,789	16,159	10,303

Da comparação do valor medido com o valor teórico calculado podemos concluir para este ensaio, que os dois valores têm uma diferença considerável, sendo o valor teórico calculado de 0,373 W/m²°C e o valor medido de 0,498 W/m²°C, existindo uma diferença entre eles de 0,125 W/m²°C que corresponde a uma variação de 34% em relação ao valor teórico calculado.

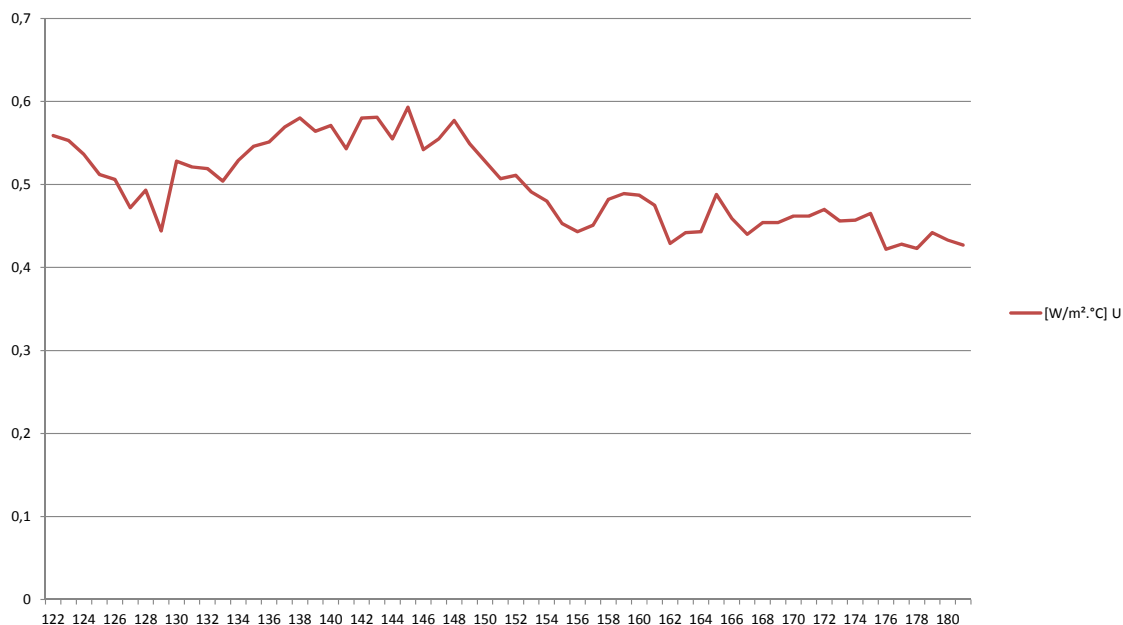


Figura 4.26 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 9 no intervalo de 122 a 181

Tabela 4.22 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.26

U [W/m ² °C]	0,498
-------------------------	-------

Ensaio 10

No ensaio 10 testou-se uma parede em alvenaria dupla de uma habitação unifamiliar, de 33 cm de espessura, composta (do interior para o exterior) por contraplacado de madeira (2,4 cm), espaço de ar não ventilado (0,6 cm), estuque tradicional (1,5 cm), tijolo furado (11 cm), impermeabilizante de argamassa de cimento e areia queimada à colher (0,3 cm), espaço de ar não ventilado (6,7 cm) e tijolo maciço (10,5 cm) como representado na figura 4.27. Esta parede tem orientação a sudoeste e o ensaio foi realizado no período de meia estação com uma duração de 48 horas, tendo-se iniciado às 18:14h do dia 4 de Abril de 2011.

O edifício foi construído em 1995 e a constituição das paredes exteriores foi obtida através de dados fornecidos pelo proprietário, de medições realizadas às paredes e dados visíveis.

Na tabela 4.23 são apresentados cálculos dos valores das resistências das várias camadas e do valor do coeficiente global de transmissão térmica para a parede testada.

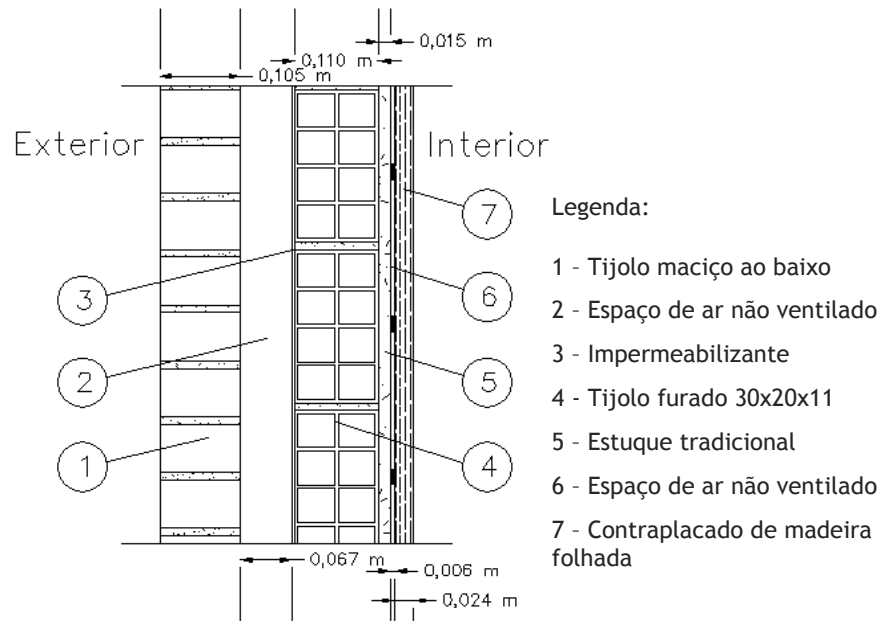


Figura 4.27 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 10 e respectiva legenda

Tabela 4.23 - Cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 10

Resistência térmica das camadas:					Fluxo horizontal	
Camada	Descrição da camada	Massa vol. aparente seca [Kg/m ³]	Espessura d, [m]	Condução térmica λ , [W/(m.°C)]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]
1	Contraplacado de madeira folhada	700	0,024	0,170		0,141
2	Espaço de ar não ventilado		0,006		0,110	0,110
3	Estuque tradicional	900 - 1000	0,015	0,400		0,038
4	Tijolo furado 30x20x11 ao alto		0,110		0,270	0,270
5	Impermeabilizante	1000	0,003	0,170		0,018
6	Espaço de ar não ventilado		0,067		0,180	0,180
7	Tijolo maciço ao baixo		0,105		0,130	0,130
<i>Espessura total, em metros:</i>			0,330		$\sum R_j =$	0,886
Resistências térmicas superficiais:					Fluxo horizontal	
Resistência térmica superficial interior, R_{si} , em [m ² .°C/W]					$R_{si} =$	0,13
Resistência térmica superficial exterior, R_{se} , em [m ² .°C/W]					$R_{se} =$	0,04
Coeficiente de transmissão térmica superficial:					Fluxo horizontal	
Coeficiente de transmissão térmica superficial, U, em [W/(m ² .°C)]:						0,947



Os dados recolhidos são apresentados na figura 4.28 em formato gráfico. Da análise gráfica podemos concluir que para este caso não foi atingida a estabilidade pretendida e as temperaturas da parede e interior estão muito próximas, alterando-se em alguns casos a disposição gradual natural.

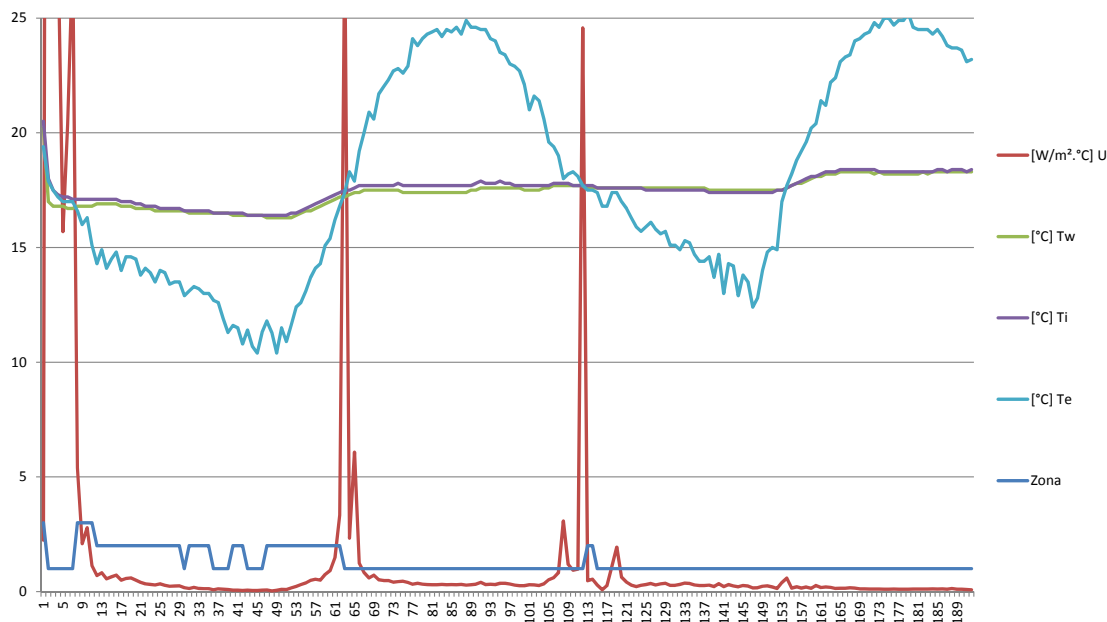


Figura 4.28 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 10 com identificação das zonas

Tabela 4.24 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.28

U [W/m ² °C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
2,348	17,393	17,509	18,138

Para este ensaio não foi possível obter um valor de U confiável porque não foi atingido o critério de estabilidade. Olhando para o gráfico e para a tabela 4.24 podemos aperceber-nos que as temperaturas interior e exterior estão muito próximas e em alguns períodos do dia a temperatura exterior excede o valor da temperatura interior que na média se reflecte numa temperatura exterior superior à interior. Por se verificarem próximas e por a média ser maior para a temperatura exterior o equipamento de medição não conseguiu dar um valor confiável.

Podemos concluir portanto que para temperaturas amenas não é viável a utilização deste instrumento.

Ensaio 11

Este ensaio teve lugar numa casa de habitação unifamiliar construída em 1995, sita em Covilhã, numa parede da envolvente com o exterior, com orientação noroeste e em condições de meia estação, teve uma duração de 48 horas, tendo-se iniciado às 18:21h do dia 6 de Abril de 2011.

Neste caso testou-se uma parede em alvenaria dupla, de 41,5 cm de espessura, com isolamento pelo exterior, composta (do interior para o exterior) Estuque tradicional (2 cm), tijolo furado (11 cm), espaço de ar não ventilado (11,7 cm), tijolo furado (11 cm), reboco em argamassa tradicional (3 cm), isolante térmico XPS (3 cm) e reboco exterior em argamassa não tradicional (0,3 cm), como representado na figura 4.29.

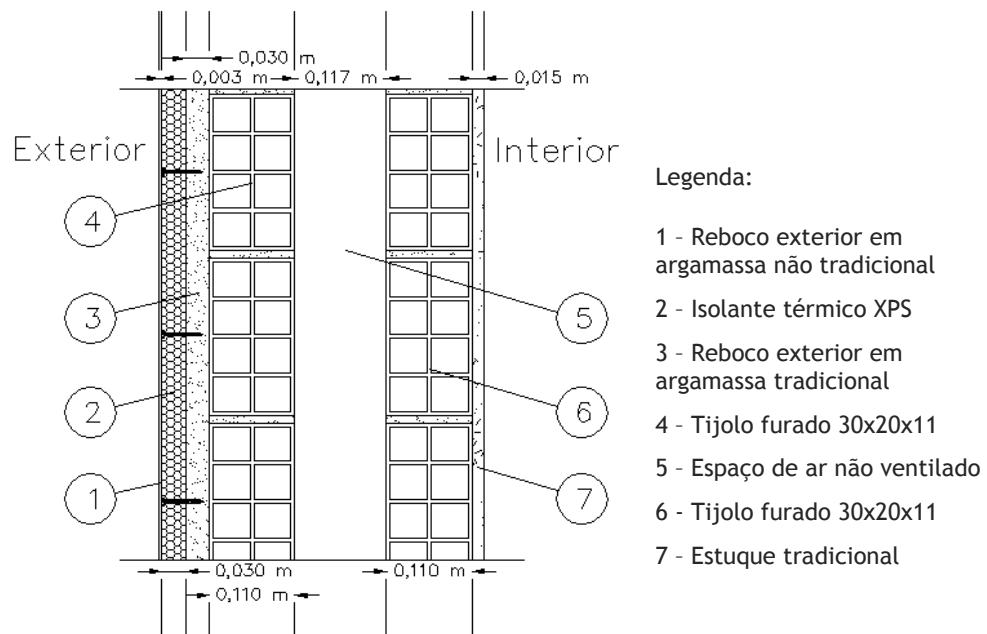


Figura 4.29 - Esquema de representação da parede testada nos ensaios 11 e 12 com respectiva legenda

A constituição das paredes exteriores foi obtida através de dados fornecidos pelo proprietário, de medições realizadas às paredes e dados visíveis.

Na tabela 4.25 são apresentados cálculos dos valores das resistências das várias camadas e do valor do coeficiente global de transmissão térmica para a parede testada nos ensaios 11 e 12.



Tabela 4.25 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para os ensaios 11 e 12

Resistência térmica das camadas:						Fluxo horizontal
Camada	Descrição da camada	Massa vol. aparente seca [Kg/m ³]	Espessura d, [m]	Condut. térmica λ , [W/(m. °C)]	Resistência Térmica R, [m ² . °C/W]	Resistência Térmica R, [m ² . °C/W]
1	Estuque tradicional	900 - 1000	0,015	0,400		0,038
2	Tijolo furado 30x20x11 ao alto		0,110		0,270	0,270
3	Espaço de ar não ventilado		0,117		0,180	0,180
4	Tijolo furado 30x20x11 ao alto		0,110		0,270	0,270
5	Reboco exterior em argamassa tradicional	>2000	0,030	1,800		0,017
6	Isolante térmico xps	35	0,030	0,037		0,811
7	Reboco exterior em argamassa não tradicional	750 - 1000	0,003	0,400		0,008
<i>Espessura total, em metros:</i>			0,415	$\sum R_j =$		1,592
Resistências térmicas superficiais:						Fluxo horizontal
Resistência térmica superficial interior, R_{si} , em [m ² . °C/W]					$R_{si} =$	0,13
Resistência térmica superficial exterior, R_{se} , em [m ² . °C/W]					$R_{se} =$	0,04
Coeficiente de transmissão térmica superficial:						Fluxo horizontal
Coeficiente de transmissão térmica superficial, U, em [W/(m ² . °C)]:						0,567

Os resultados das medições efectuadas são apresentados na figura 4.30. Da análise do gráfico podemos concluir que não foi atingido em nenhum momento a estabilidade definida no programa da análise preliminar dos resultados e na maior parte das medições as temperaturas interior e da parede estão quase coincidentes.

A temperatura exterior é muito inconstante, e encontra-se maioritariamente superior à temperatura interior reflectindo-se na média que é superior para a temperatura exterior, visível na tabela 4.26. Desta forma não foi possível registar um valor confiável para o valor de U. Podemos concluir que no verão, o instrumento de medição utilizado não funciona.

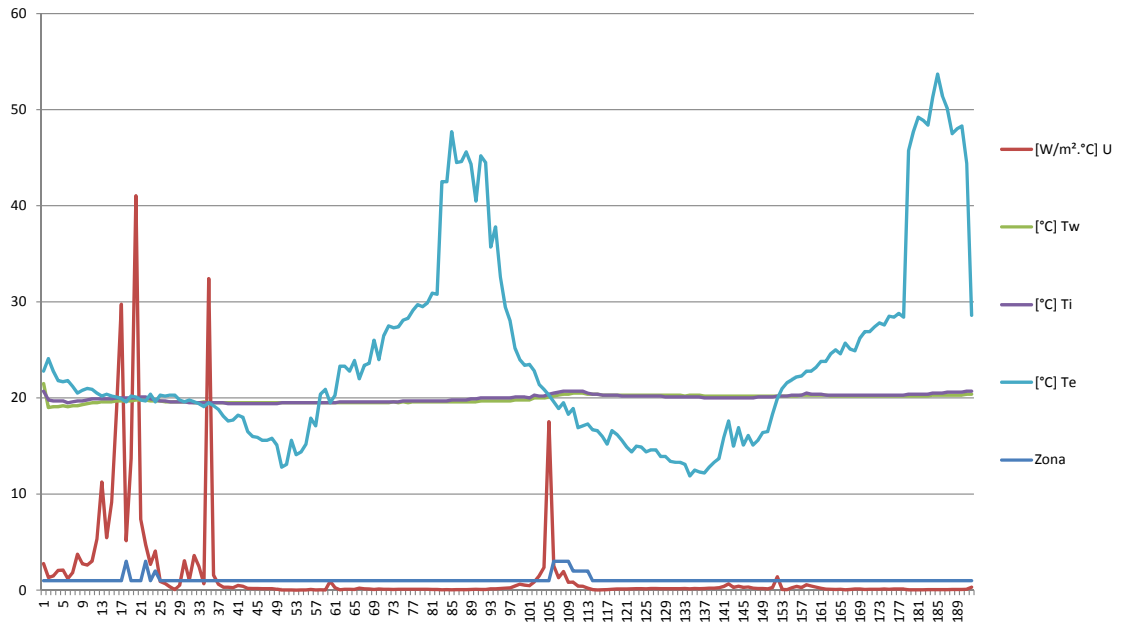


Figura 4.30 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 11 com identificação das zonas

Tabela 4.26 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.30

U [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]	Tw [$^\circ C$]	Ti [$^\circ C$]	Te [$^\circ C$]
1,492	19,892	19,981	23,684

Ensaio 12

Este caso de estudo teve lugar na mesma casa de habitação unifamiliar do ensaio anterior, sito em Covilhã, numa parede da envolvente com o exterior com as mesmas características, mas com orientação sudoeste e nas mesmas condições de verão. Esta medição teve uma duração de 48 horas, tendo-se iniciado às 18:06h do dia 11 de Abril de 2011.

Os resultados da medição são apresentados na figura 4.31 na forma de gráfico.

Da análise da classificação de zona podemos verificar que a estabilidade foi atingida em duas regiões diferentes no gráfico. Para obter o valor U, foram isolados os valores da medição 29 à 52 e foi elaborado um novo gráfico, apresentado na figura 4.32. Foi calculada a média dos valores U medidos neste intervalo que é apresentada na tabela 4.28.

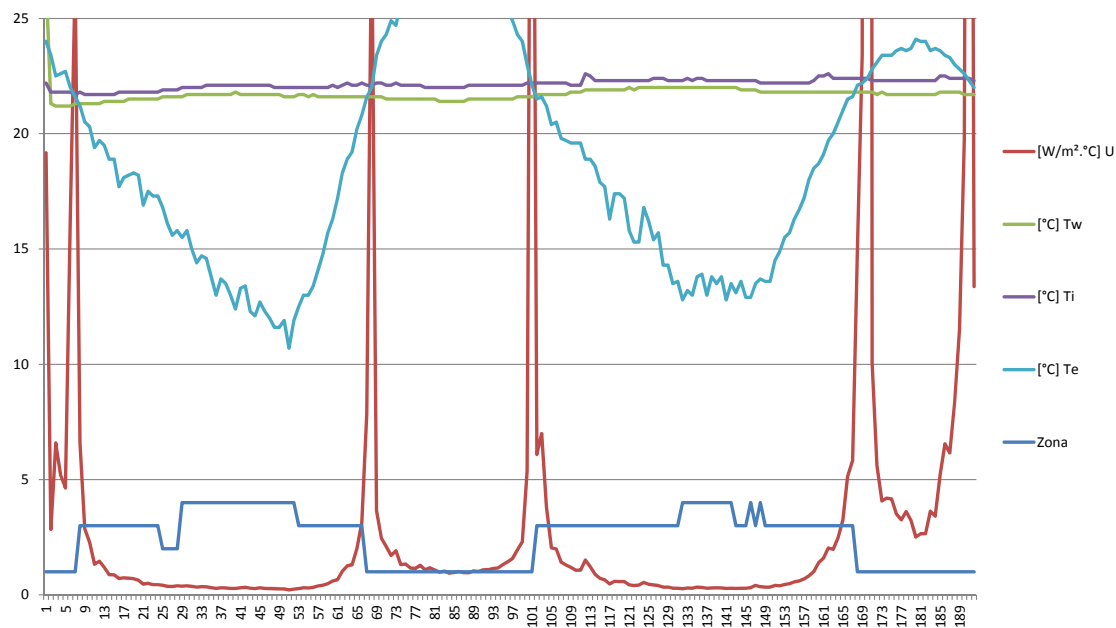


Figura 4.31 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 12 com identificação das zonas

Tabela 4.27 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.31

U [W/m ² ·°C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
4,436	21,707	22,146	18,970

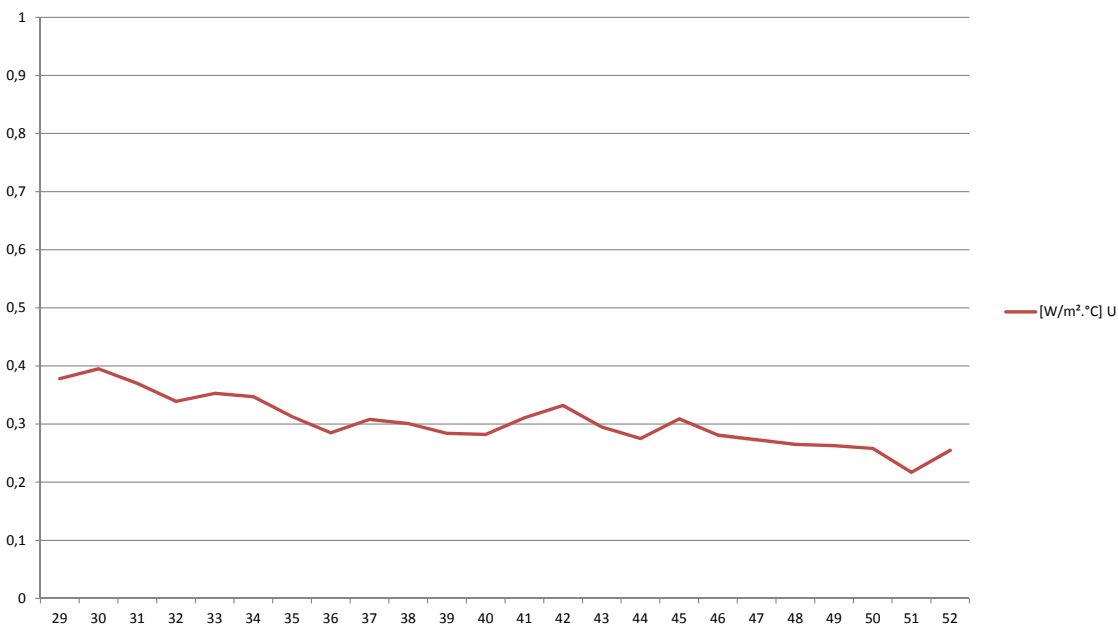


Figura 4.32 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 12 no intervalo de 29 a 52



Tabela 4.28 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.32

U [W/m ² °C]	0,304
-------------------------	-------

Da comparação do valor U obtido da medição com o valor calculado podemos concluir que este é bastante inferior. O valor obtido é de 0,304 W/m²°C e o calculado de 0,567 W/m²°C, existindo uma diferença entre eles de 0,263 W/m²°C que corresponde a uma variação de 46% em relação ao valor teórico calculado. Desta forma conclui-se que embora o critério de estabilidade tenha sido atingido, o valor para U obtido não tem uma boa aproximação da realidade.

Da comparação com o ensaio anterior efectuado a uma parede com as mesmas características em condições de verão mas com orientação diferente, podemos concluir que a orientação influencia as medições, pois no ensaio anterior não se atingiu a estabilidade. Mas ao contrário do que era de esperar, que o ensaio mais a sul fosse o de pior desempenho pela influência da radiação solar, foi o ensaio mais a norte, com orientação a noroeste que teve o pior desempenho, em vez da parede com orientação a sudoeste.

Ensaio 13

Neste ensaio testou-se uma parede exterior, de 27,5 cm de espessura, com isolamento pelo interior, composta (do interior para o exterior) Gesso cartonado (Pladur) (1,4 cm), espaço de ar não ventilado (12,6 cm), isolante térmico EPS (3 cm) e tijolo maciço (10,5 cm), como representado na figura 4.33. Esta parede tem orientação a sudoeste e o ensaio foi realizado no período de verão com uma duração de 48 horas, tendo-se iniciado às 18:05h do dia 13 de Abril de 2011.

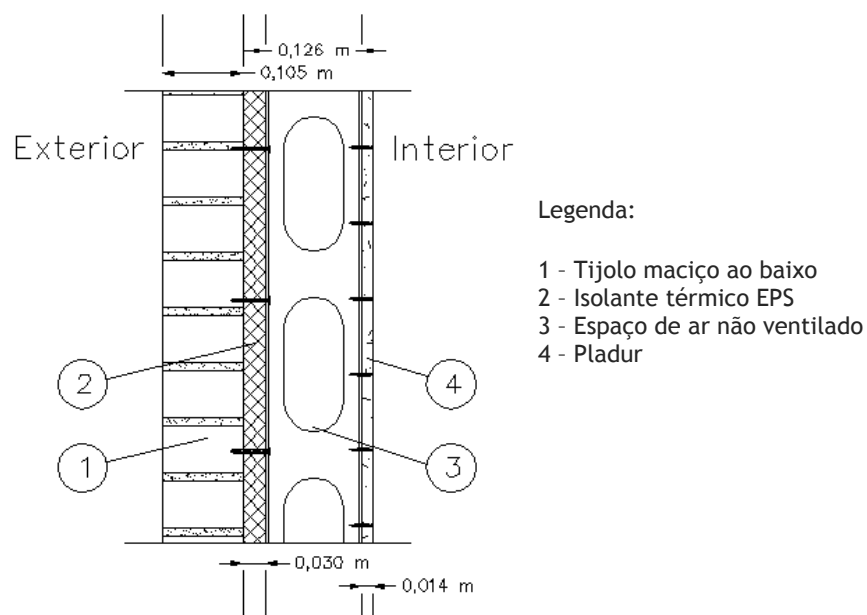


Figura 4.33 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 13 e respectiva legenda



Na tabela 4.29 são apresentados cálculos dos valores das resistências das várias camadas e do valor do coeficiente global de transmissão térmica para a parede em teste.

Tabela 4.29 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 13

Resistência térmica das camadas:						Fluxo horizontal
Camada	Descrição da camada	Massa vol. aparente seca [Kg/m ³]	Espessura d, [m]	Condut. térmica λ , [W/(m.°C)]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]
1	PLADUR	750 - 1000	0,014	0,250		0,056
2	ESPAÇO DE AR NÃO VENTILADO		0,126		0,180	0,180
3	ISOLANTE TÉRMICO EPS	35	0,030	0,037		0,811
4	TIJOLO MACIÇO AO BAIXO		0,105		0,130	0,130
Espessura total, em metros:			0,275	$\sum R_i =$		1,177
Resistências térmicas superficiais:						Fluxo horizontal
Resistência térmica superficial interior, R_{si} , em [m ² .°C/W]					$R_{si} =$	0,13
Resistência térmica superficial exterior, R_{se} , em [m ² .°C/W]					$R_{se} =$	0,04
Coeficiente de transmissão térmica superficial:						Fluxo horizontal
Coeficiente de transmissão térmica superficial, U, em [W/(m ² .°C)]:						0,742

Os resultados obtidos da medição são apresentados na figura 4.34 na forma de gráfico, onde podemos verificar que para este caso também não foi atingida a estabilidade pretendida.

Verifica-se a mesma situação que nos ensaios anteriores realizados no período de verão, a temperatura exterior está muito próxima da temperatura interior, como se pode ver na tabela 4.30 das médias dos valores do gráfico.

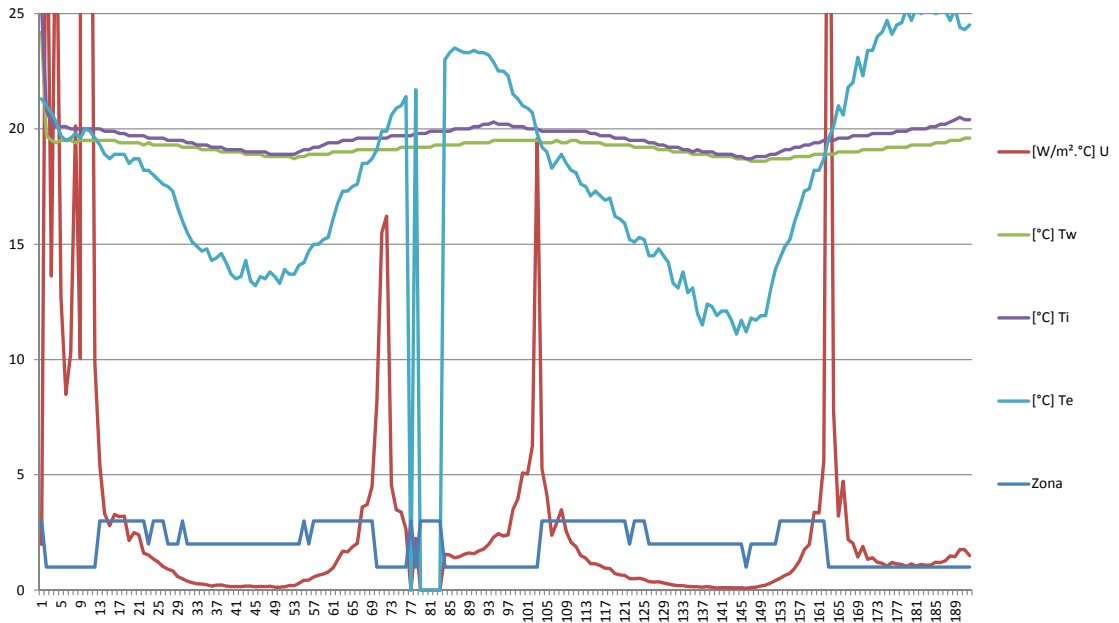


Figura 4.34 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 13 com identificação das zonas

Tabela 4.30 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.34

U [W/m ² °C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
6,326	19,187	19,616	17,531

Ensaio 14

No ensaio 14 testou-se uma parede exterior em alvenaria dupla, de 36,5 cm de espessura, com isolamento na caixa-de-ar, composta (do interior para o exterior) por estuque projectado (1,5 cm), tijolo furado (11 cm), isolante térmico XPS (4 cm), espaço de ar não ventilado (3 cm), tijolo furado (15 cm) e reboco exterior em argamassa tradicional, como representado na figura 4.35. Esta parede tem orientação a sudeste e o ensaio foi realizado no período de verão com uma duração de 48 horas, tendo-se iniciado às 17:41h do dia 16 de Maio de 2011.

A constituição das paredes exteriores (Figura 4.35) foi obtida através de dados fornecidos pelo proprietário, de medições realizadas às paredes e dados visíveis.

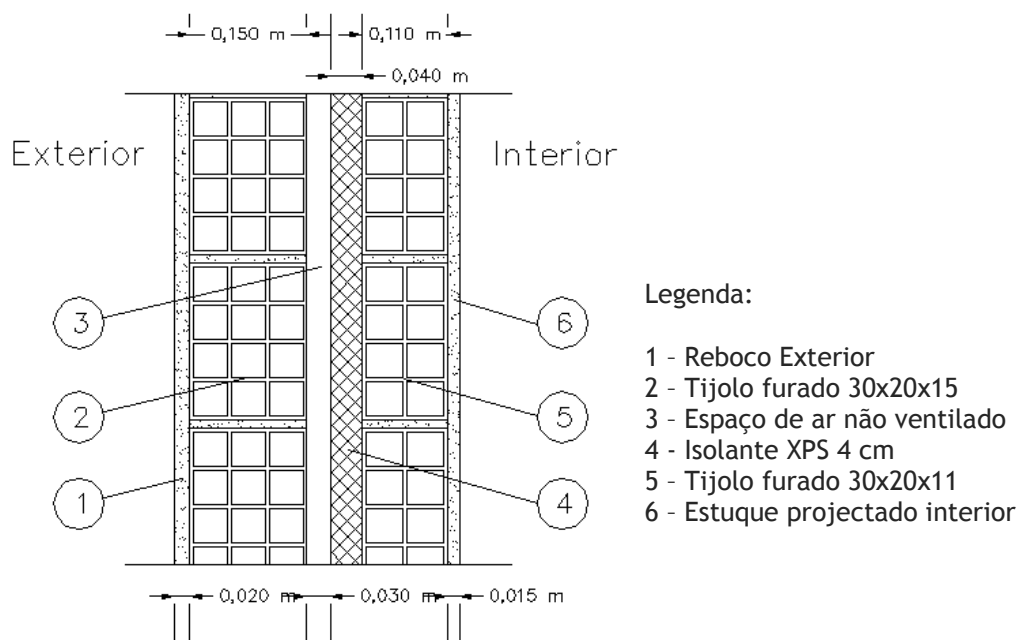


Figura 4.35 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 14 e respectiva legenda

Na tabela 4.31 são apresentados cálculos dos valores das resistências das várias camadas e do valor do coeficiente global de transmissão térmica para a parede testada.

Os resultados obtidos da medição *in situ* são apresentados na figura 4.36 na forma de gráfico.

Da análise dos resultados obtidos podemos concluir que para este caso foi atingida a estabilidade do valor U de onde podemos obter um valor final. Foi produzido um novo gráfico (figura 4.37) com os valores de U obtidos na região do gráfico de zona 4 mais os vizinhos no raio de 4 valores, 4 antes e 4 depois. Deste gráfico foi calculada a média apresentada na tabela 4.33, que é o valor final de U.

Em suma podemos concluir que embora neste ensaio as temperaturas interior e exterior estejam próximas, foi possível obter um valor para o coeficiente de transmissão térmica, que para este caso está um pouco elevado, sendo o valor teórico calculado de $0,535 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e o valor medido de $0,695 \text{ W/m}^2\text{°C}$, com uma diferença entre eles de $0,160 \text{ W/m}^2\text{°C}$ que corresponde a uma variação de 30% em relação ao valor teórico calculado.



Tabela 4.31 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 14

Resistência térmica das camadas:						Fluxo horizontal
Camada	Descrição da camada	Massa vol. aparente seca [Kg/m ³]	Espessura d, [m]	Condut. térmica λ , [W/(m.°C)]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]
1	Estuque projectado	900-1200	0,015	0,430		0,035
2	Tijolo furado 30x20x11 ao alto		0,110		0,270	0,270
3	Isolante térmico xps	35	0,030	0,037		0,811
4	Espaço de ar não ventilado		0,020		0,170	0,170
5	Tijolo furado 30x20x15 ao alto		0,150		0,390	0,390
6	Monomassa	1600	0,020	0,800		0,025
Espessura total, em metros:			0,345		$\sum R_j =$	1,701
Resistências térmicas superficiais:						Fluxo horizontal
Resistência térmica superficial interior, R_{si} , em [m ² .°C/W]					$R_{si} =$	0,13
Resistência térmica superficial exterior, R_{se} , em [m ² .°C/W]					$R_{se} =$	0,04
Coeficiente de transmissão térmica superficial:						Fluxo horizontal
Coeficiente de transmissão térmica superficial, U, em [W/(m ² .°C)]:						0,535

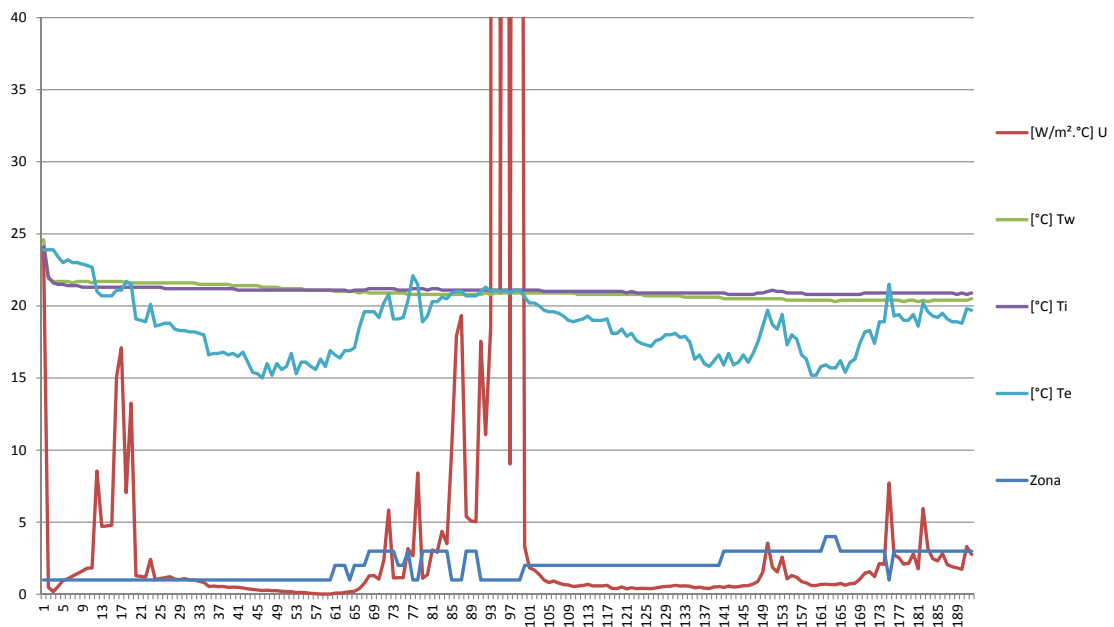


Figura 4.36 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 12 com identificação das zonas

Tabela 4.32 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.36

U [W/m ² .°C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
8,260	20,936	21,071	18,634

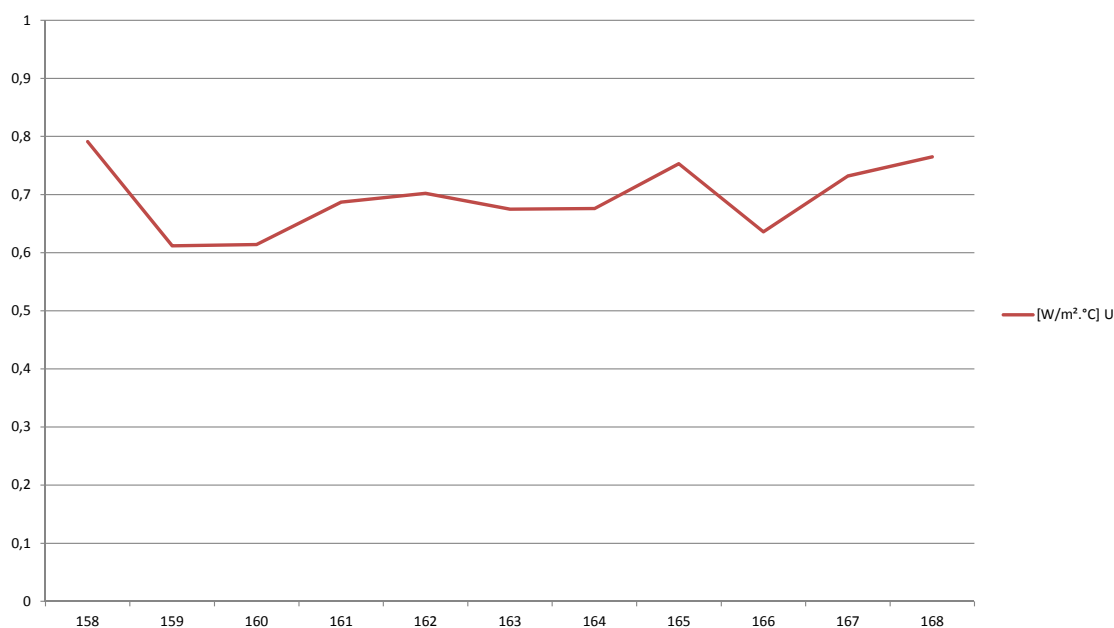


Figura 4.37 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 14 no intervalo de 158 a 168

Tabela 4.33 - Valor de U médio no intervalo do gráfico da figura 4.37

U [W/m ² °C]	0,695
-------------------------	-------

Ensaio 15

Neste ensaio foi testada uma parede exterior em alvenaria dupla idêntica à parede do ensaio 14, com 37 cm de espessura, com isolamento na caixa-de-ar, composta (do interior para o exterior) por Azulejo (1 cm), argamassa tradicional (1 cm), tijolo furado (11 cm), isolante térmico XPS (4 cm), espaço de ar não ventilado (3 cm), tijolo furado (15 cm) e reboco exterior em argamassa tradicional, como representado na figura 4.38. Esta parede tem orientação a noroeste e o ensaio foi realizado no período de verão com uma duração de 48 horas, tendo-se iniciado às 17:34h do dia 18 de Maio de 2011.

A constituição das paredes exteriores (Figura 4.38) foi obtida através de dados fornecidos pelo proprietário, de medições realizadas às paredes e dados visíveis.

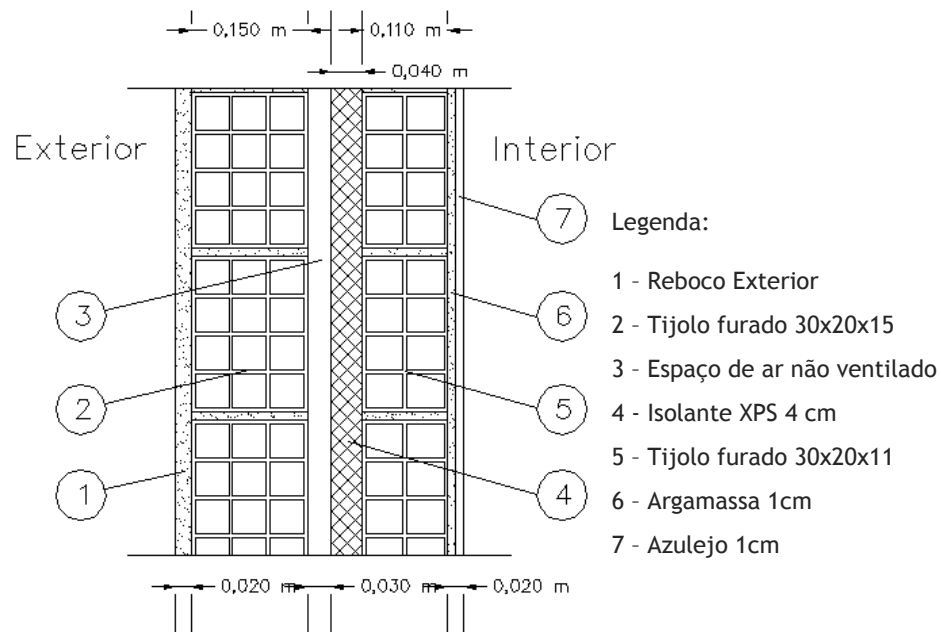


Figura 4.38 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 15 e respectiva legenda

Na tabela 4.34 são apresentados cálculos dos valores das resistências das várias camadas e do valor do coeficiente global de transmissão térmica para a parede testada.

Os resultados obtidos da medição *in situ* são apresentados na figura 4.39. Da análise da zona no gráfico podemos concluir que a estabilidade pretendida não foi atingida em nenhum momento. Sendo esta uma parede com características muito idênticas à parede da medição anterior e tendo-se obtido um valor de U no ensaio 14 e não conseguindo obter um valor confiável neste ensaio para condições idênticas, podemos concluir que neste caso a orientação tem influência no desempenho do equipamento de medição.

Tal como concluímos no ensaio 12, o equipamento de medição, volta a ter o pior desempenho na parede mais voltada a norte. Na comparação dos ensaios 14 (orientação a sudeste) e 15 (orientação a noroeste) tal como dos ensaios 11 (orientação a noroeste) e 12 (orientação a sudoeste), podemos concluir que foi na parede com a orientação mais a sul que se conseguiu obter um resultado para o coeficiente de transmissão térmica.



Tabela 4.34 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 15

Resistência térmica das camadas ⁽¹⁾ :						Fluxo horizontal
Camada	Descrição da camada	Massa vol. aparente seca [Kg/m ³]	Espessura d, [m]	Condut. térmica λ , [W/(m. °C)]	Resistência Térmica R, [m ² . °C/W]	Resistência Térmica R, [m ² . °C/W]
1	Azulejo	1800 - 2000	0,010	0,770		0,013
2	Emboco de argamassa tradicional (base para revestimento)	1800 - 2000	0,010	1,300		0,008
3	Tijolo furado 30x20x11 ao alto		0,110		0,270	0,270
4	Isolante térmico xps	35	0,030	0,037		0,811
5	Espaço de ar não ventilado		0,020		0,170	0,170
6	Tijolo furado 30x20x15 ao alto		0,150		0,390	0,390
7	Monomassa	1600	0,020	0,800		0,025
<i>Espessura total, em metros:</i>			0,345		$\sum R_j =$	1,687
Resistências térmicas superficiais ⁽²⁾ :						Fluxo horizontal
Resistência térmica superficial interior, R_{si} , em [m ² . °C/W]					$R_{si} =$	0,13
Resistência térmica superficial exterior, R_{se} , em [m ² . °C/W]					$R_{se} =$	0,04
Coeficiente de transmissão térmica superficial ⁽³⁾ :						Fluxo horizontal
Coeficiente de transmissão térmica superficial, U, em [W/(m ² . °C)]:						0,539

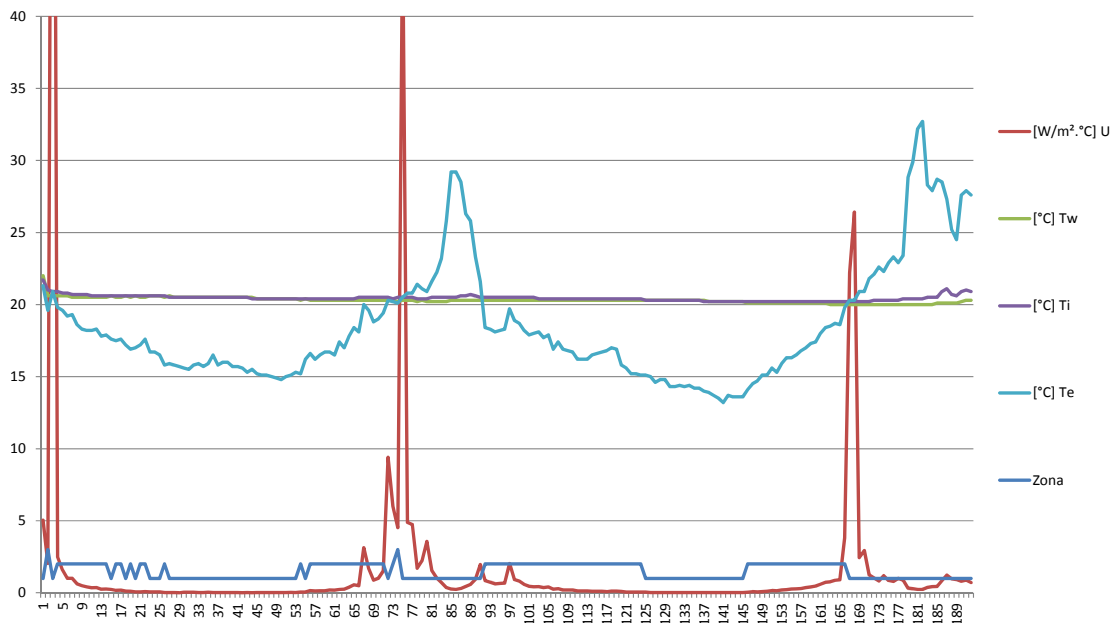


Figura 4.39 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 15 com identificação das zonas

Tabela 4.35 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.39

U [W/m ² °C]	T _w [°C]	T _i [°C]	T _e [°C]
1,601	20,299	20,444	18,461

Ensaio 16

Este ensaio foi realizado numa câmara de conservação de fruta em actividade, com o intuito de testar o instrumento de medição em condições de regime permanente, com as temperaturas estáveis.

O ensaio foi realizado numa parede da envolvente com outra câmara desactivada. Neste caso as condições da estação do ano não são relevantes visto que dentro da câmara em actividade a temperatura é controlada através de máquinas frigoríficas e na câmara desactivada embora a temperatura não seja controlada, mantém-se constante devido ao facto de as paredes estarem isoladas.

Esta medição teve uma duração de 48 horas, tendo-se iniciado às 16:50h do dia 11 de Julho de 2011.

A constituição da parede (Figura 4.40) foi obtida através de dados fornecidos pelo proprietário, de medições realizadas e dados visíveis.

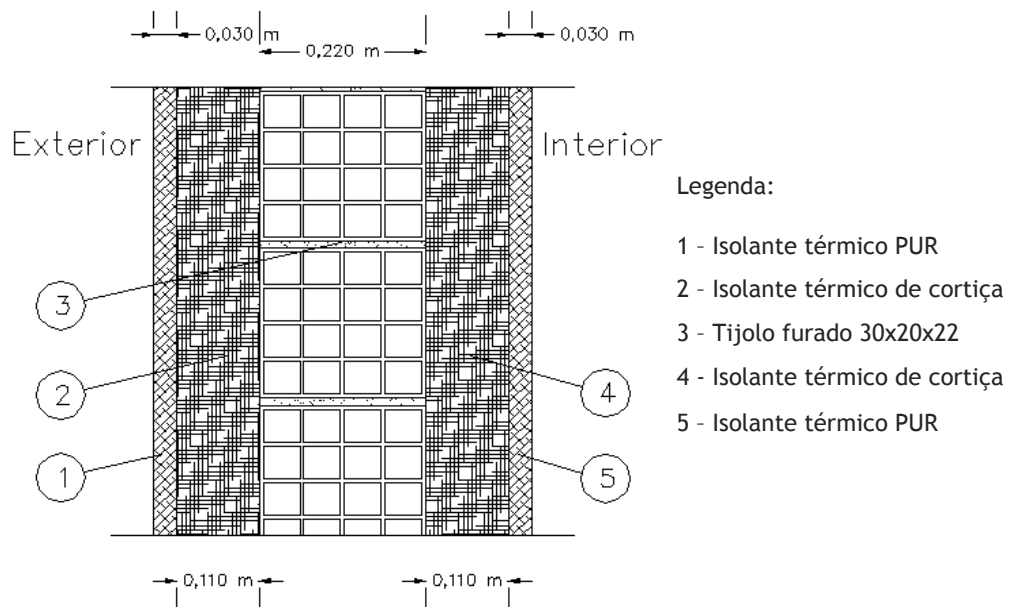


Figura 4.40 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 16 e respectiva legenda



Na tabela 4.36 são apresentados cálculos dos valores das resistências das várias camadas e do valor do coeficiente global de transmissão térmica para a parede testada.

Tabela 4.36 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 16

Resistência térmica das camadas:						Fluxo horizontal
Camada	Descrição da camada	Massa vol. aparente seca [Kg/m ³]	Espessura d, [m]	Condut. térmica λ , [W/(m.°C)]	Resistência Térmica R , [m ² .°C/W]	Resistência Térmica R , [m ² .°C/W]
1	Isolante térmico poliuretano projectado PUR	20 - 50	0,030	0,042		0,714
2	Isolante térmico de aglomerado de cortiça expandida em placas	90 - 140	0,110	0,045		2,444
3	Tijolo furado 30x20x22 ao alto		0,220		0,520	0,520
4	Isolante térmico de aglomerado de cortiça expandida em placas	20 - 50	0,110	0,042		2,619
5	Isolante térmico poliuretano projectado PUR	90 - 140	0,030	0,045		0,667
Espessura total, em metros:			0,500		$\sum R_j =$	6,964
Resistências térmicas superficiais:						Fluxo horizontal
Resistência térmica superficial interior, R_{si} , em [m ² .°C/W]					$R_{si} =$	0,13
Resistência térmica superficial exterior, R_{se} , em [m ² .°C/W]					$R_{se} =$	0,04
Coeficiente de transmissão térmica superficial:						Fluxo horizontal
Coeficiente de transmissão térmica superficial, U , em [W/(m ² .°C)]:						0,140

Os resultados obtidos da medição *in situ* são apresentados na figura 4.41 na forma de gráfico.

Analisando a zona no gráfico pode-se concluir que esta permanece no valor 4 durante quase todo o ensaio, tendo um início de ensaio em zona 3 passando para 4 e com duas quebras para 2.

Isolou-se o intervalo da medição 17 à medição 105 e produziu-se um novo gráfico com os valores de U apresentados na figura 4.42, onde se pode visualizar a variação nesse intervalo.

Com base nos valores apresentados neste gráfico foi calculada a média, que é apresentada na tabela 4.38.

Comparando o valor teórico calculado com o valor medido, pode-se concluir que tem uma muito boa aproximação, sendo o valor calculado de 0,140 W/m²°C e o valor medido de 0,194 W/m²°C com uma diferença entre eles de 0,054 W/m²°C que corresponde a uma variação de 39% em relação ao valor teórico calculado.

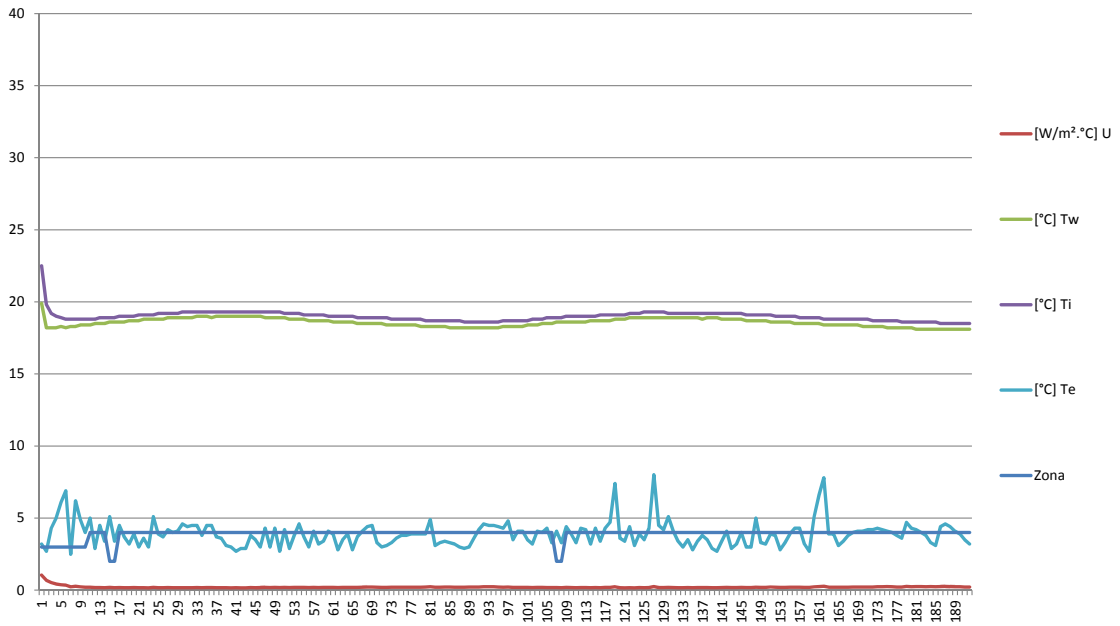


Figura 4.41 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 16 com identificação das zonas

Tabela 4.37 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.41

U [W/m ² °C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
0,211	18,573	18,982	3,893

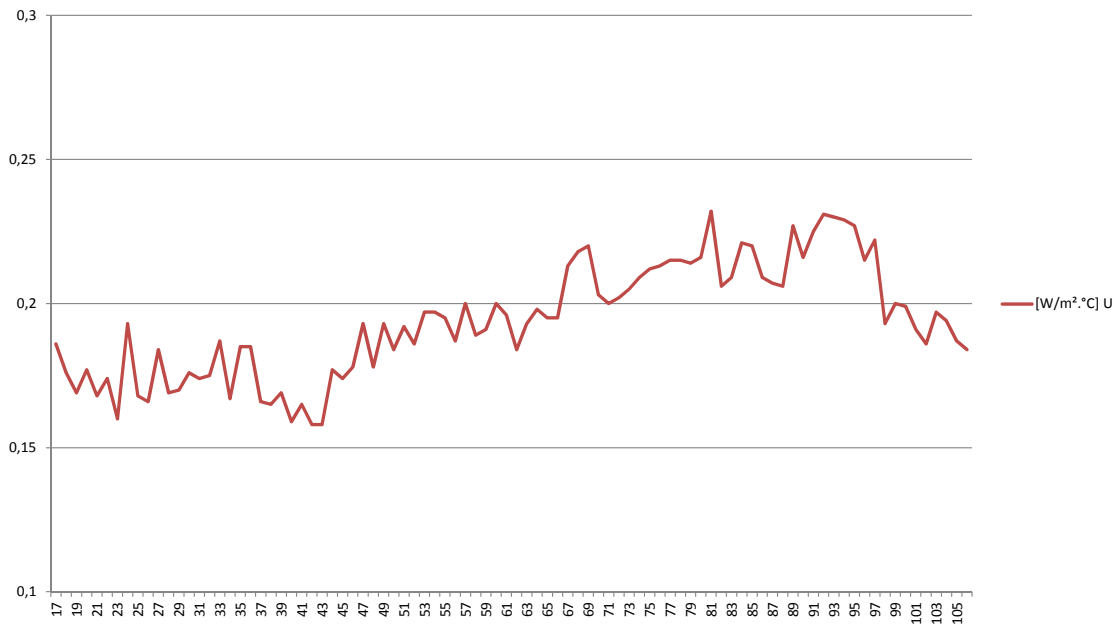


Figura 4.42 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 16 no intervalo de 17 a 105

Tabela 4.38 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.42

U [W/m ² °C]	0,194
-------------------------	-------

Deste ensaio, realizado em condições estáveis, onde se garante uma diferença térmica de aproximadamente 15°C durante todo o ensaio, com pequenas variações das temperaturas, podemos concluir que este é realizado nas melhores condições e que garante todos os requisitos aconselhados pelo fabricante do instrumento.

É considerado que nestas condições o instrumento de medição tem o seu desempenho máximo, de onde concluímos que mesmo nas melhores condições de estabilidade o resultado obtido das medições *in situ* tem desvio do valor teórico calculado.

Ensaio 17

Este ensaio foi realizado numa câmara de conservação de fruta em actividade, num edifício sito em Covilhã, numa parede da envolvente com outra câmara desactivada. Neste caso, tal como no ensaio anterior, as condições da estação do ano não são relevantes visto que dentro da câmara em actividade a temperatura é controlada e na câmara desactivada embora a temperatura não seja controlada, esta mantém-se constante devido ao facto de as paredes estarem devidamente isoladas.

Esta medição teve uma duração de 48 horas, tendo-se iniciado às 16:50h do dia 13 de Julho de 2011.

A constituição das paredes exteriores (Figura 4.43) foi obtida através de dados fornecidos pelo proprietário, de medições realizadas às paredes e dados visíveis.

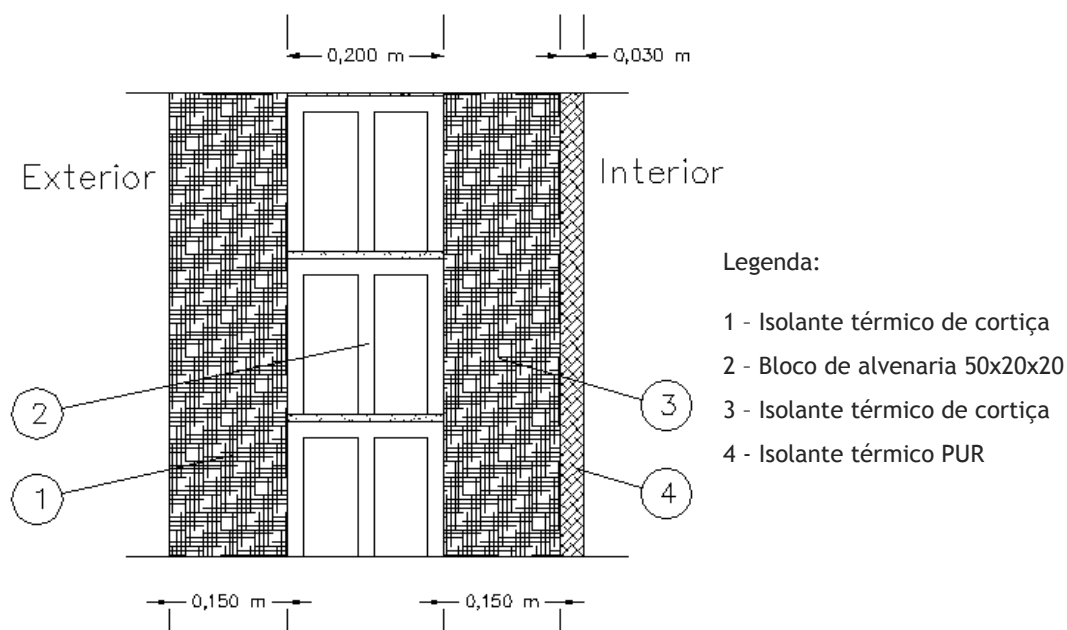


Figura 4.43 - Esquema de representação da parede testada no ensaio 17 e respectiva legenda



Na tabela 4.39 são apresentados cálculos dos valores das resistências das várias camadas e do valor do coeficiente global de transmissão térmica para a parede testada. Os resultados obtidos da medição *in situ* são apresentados na figura 4.44 na forma de gráfico.

Tabela 4.39 - Tabela do cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para o ensaio 17

Resistência térmica das camadas:						Fluxo horizontal
Camada	Descrição da camada	Massa vol. aparente seca [Kg/m ³]	Espessura d, [m]	Condut. térmica λ , [W/(m.°C)]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]	Resistência Térmica R, [m ² .°C/W]
1	Isolante térmico poliuretano projectado pur	20 - 50	0,030	0,042		0,714
2	Isolante térmico de aglomerado de cortiça expandida em placas	90 - 140	0,150	0,045		3,333
3	Bloco de alvenaria 50x20x20		0,200		0,300	0,300
4	Isolante térmico de aglomerado de cortiça expandida em placas	90 - 140	0,150	0,045		3,333
<i>Espessura total, em metros:</i>			0,530	$\sum R_j =$		7,681
Resistências térmicas superficiais:						Fluxo horizontal
Resistência térmica superficial interior, R_{si} , em [m ² .°C/W]					$R_{si} =$	0,13
Resistência térmica superficial exterior, R_{se} , em [m ² .°C/W]					$R_{se} =$	0,04
Coeficiente de transmissão térmica superficial:						Fluxo horizontal
Coeficiente de transmissão térmica superficial, U, em [W/(m ² .°C)]:						0,127

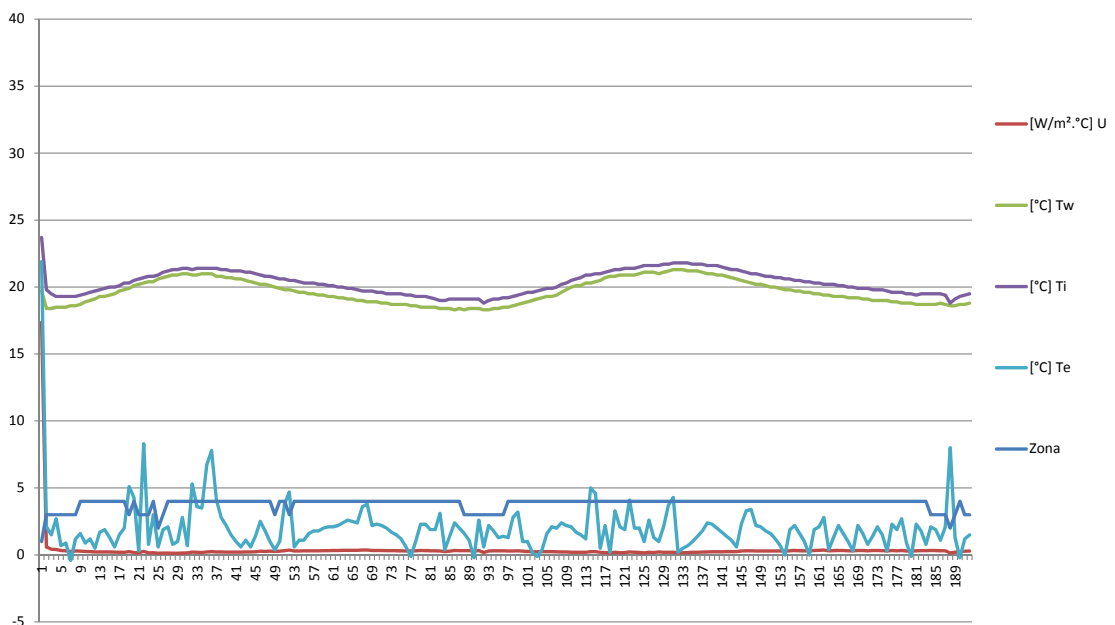


Figura 4.44 - Gráfico dos resultados obtidos no ensaio 17 com identificação das zonas



Tabela 4.40 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.44

U [W/m ² °C]	Tw [°C]	Ti [°C]	Te [°C]
0,362	19,639	20,310	1,976

Analisando a zona no gráfico podemos ver que esta permanece no valor 4 durante quase todo o ensaio, tendo alguns pontos de zona 3.

Isolou-se o intervalo da medição 97 à medição 183 e produziu-se um novo gráfico com os valores de U apresentados na figura 4.45, onde se pode visualizar a variação nesse intervalo.

Com base nos valores apresentados neste gráfico foi calculada a média, que é apresentada na tabela 4.41.

Comparando o valor teórico calculado com o valor medido, podemos concluir que tem uma boa aproximação, sendo o valor calculado de 0,127 W/m²°C e o valor medido de 0,267 W/m²°C, com uma diferença entre os dois de 0,140 W/m²°C que corresponde a uma variação de 110% em relação ao valor teórico calculado.

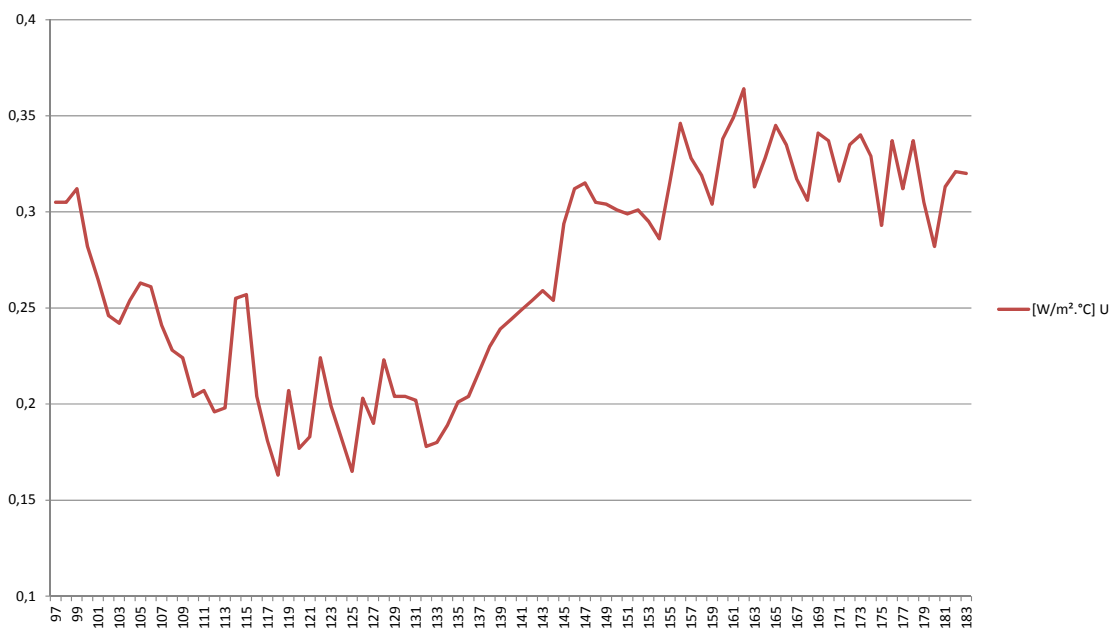


Figura 4.45 - Pormenor do gráfico dos valores de U no ensaio 17 no intervalo de 97 a 183

Tabela 4.41 - Valores médios no intervalo do gráfico da figura 4.45

U [W/m ² °C]	0,267
-------------------------	-------



Com base nas médias dos valores do gráfico da figura 4.44 apresentadas na tabela 4.40 podemos dizer que este ensaio foi realizado tal como no ensaio anterior com uma diferença superior a 15°C entre a temperatura interior e exterior. Neste caso para condições de condução térmica da parede em regime permanente obteve-se um valor U, 0,140 W/m²°C superior ao teórico calculado. Esta diferença é significativamente grande em comparação com o ensaio anterior, podendo resultar da existência de deficiência no isolamento, visto que este ensaio foi realizado em condições ideais de medição *in situ*.





5. Conclusão

5.1. Recapitulação

De forma a dar uma visão geral dos resultados obtidos das várias medições efectuadas *in situ* apresentam-se na tabela 5.1 os vários ensaios com as datas, a orientação das paredes, os valores teóricos calculados, os valores medidos e a percentagem de variação do valor medido em relação ao calculado.

Tabela 5.1 - Tabela dos resultados obtidos

Ensaio	Data	Orientação da Parede	Valor Teórico calculado (W/m ² .°C)	Valor Obtido da medição <i>in situ</i> (W/m ² .°C)	Varição do valor obtido em relação ao calculado (%)
Ensaio 1	12/01/2011	Indiferente	0,189	0,242	28 %
Ensaio 2	01/02/2011	Oeste	0,400	0,345	14 %
Ensaio 3	03/02/2011	Noroeste	1,982	---	---
Ensaio 4	13/05/2011	Sudeste	1,982	---	---
Ensaio 5	06/02/2011	Sudeste	0,444	0,587	32 %
Ensaio 6	18/02/2011	Nordeste	0,444	0,669	51 %
Ensaio 7	02/03/2011	Sul	0,468	0,249	47 %
Ensaio 8	05/07/2011	Sul	0,468	---	---
Ensaio 9	12/03/2011	Sudoeste	0,373	0,498	34 %
Ensaio 10	04/04/2011	Sudoeste	0,947	---	---
Ensaio 11	06/04/2011	Noroeste	0,567	---	---
Ensaio 12	11/04/2011	Sudoeste	0,567	0,304	46 %
Ensaio 13	13/04/2011	Sudoeste	0,742	---	---
Ensaio 14	16/05/2011	Sudeste	0,535	0,695	30 %
Ensaio 15	18/05/2011	Noroeste	0,539	---	---
Ensaio 16	11/07/2011	Indiferente	0,140	0,194	39 %
Ensaio 17	13/07/2011	Indiferente	0,127	0,267	110 %

No ensaio 1 realizado no laboratório obteve-se um valor para o coeficiente de transmissão térmica de 0,242 W/m².°C, um pouco superior ao teórico calculado, com uma variação de 28%. Para este caso pode dizer-se que este resultado tem uma boa aproximação.

Para o ensaio 2 obteve-se um resultado com variação de 14% em relação ao valor calculado, que para este caso, sendo uma medição *in situ* mostra-se ser um muito bom resultado.



Nos ensaios 3 e 4 realizados em paredes com as mesmas características mas com orientações diferentes e em diferentes datas, não se obtiveram resultados confiáveis das medições *in situ* mas pode-se concluir, da comparação dos resultados obtidos nas duas medições, que a estação do ano pode influenciar na obtenção de um resultado, porque no caso do ensaio 3 realizado no inverno só não se obteve um resultado por não se ter verificado o critério de estabilidade, pois tínhamos tudo para o obter e no caso do ensaio 4 realizado no mês de Maio registaram-se múltiplas complicações, como por exemplo a proximidade das temperaturas interior e exterior e a inversão da disposição das temperaturas.

Os ensaios 5 e 6 também realizados a paredes com as mesmas características e no mesmo mês, mas com diferentes orientações, obtiveram resultados na medição *in situ*. Dos quais podemos concluir que a orientação tem influência nos resultados, visto que para a parede com orientação sudeste se obteve uma variação de 32%, menor que no ensaio 6, relativo a uma parede com orientação nordeste, da qual a variação foi de 51%. Com base nestes valores podemos concluir que se obtêm resultados mais próximos dos teóricos calculados de paredes com orientação sudeste, em comparação com outras com orientação nordeste.

Nos ensaios 7 e 8 realizados na mesma parede, com a mesma orientação mas em condições climatéricas diferentes obtiveram-se resultados diferentes. Não se conseguindo obter valores confiáveis para o ensaio 8 realizado num período em que se registaram temperaturas mais elevadas, sendo que no ensaio 7, realizado em condições de inverno, o valor obtido para o coeficiente de transmissão térmica foi $0,249 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Concluindo deste ensaio que a estação do ano é um factor crucial na determinação do coeficiente de transmissão térmica, sendo impossível obter resultados nos períodos de temperatura exterior mais elevada.

No caso de estudo seguinte, ensaio 9, para uma parede com orientação sudoeste, com um coeficiente de transmissão térmica calculado de $0,373 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, obteve-se da medição *in situ*, o valor de $0,498 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, existindo uma variação do valor obtido de 34% em relação ao teórico calculado. Embora a variação seja considerável, o valor obtido é visto como uma boa aproximação, já que a percentagem de variação é relativa ao valor teórico que se mostra ser bastante baixo.

No ensaio 10 e 13 para paredes diferentes, em condições climatéricas semelhantes e com a mesma orientação a sudoeste não foi possível obter um valor de U confiável, visto a temperatura interior estar muito próxima da exterior. Conclui-se que para temperaturas interior e exterior próximas não é viável a utilização do instrumento em estudo.

Os ensaios 11 e 12 tiveram como objecto de estudo a mesma parede nas mesmas condições climatéricas, mas com orientações diferentes: no primeiro caso, ensaio 11, com orientação a noroeste, não se conseguiu obter um valor do coeficiente de transmissão térmica confiável; e no segundo caso, ensaio 12, com orientação a sudoeste, obteve-se um resultado 46% inferior ao valor teórico calculado, não sendo esta uma boa aproximação da realidade, visto que o



valor obtido é pouco mais de metade do valor teórico calculado. Para este caso, e ao contrário do que era de esperar foi a parede com orientação mais a sul que teve o melhor resultado.

Nos casos de estudo 14 e 15 testaram-se duas paredes muito semelhantes em condições climatéricas idênticas, mas com orientações opostas, onde, à semelhança de outros casos de estudo foi na parede com orientação mais a sul que se obtiveram resultados confiáveis e estes com uma variação de 30% em relação ao valor teórico calculado.

Os últimos dois ensaios foram realizados com o intuito de testar o equipamento de medição em condições de regime permanente, com as temperaturas estáveis. Sendo que no primeiro caso, ensaio 16, obteve-se um valor de U, 39% superior ao teórico calculado; e no segundo caso o valor obtido admitiu uma variação superior a 100%, ou seja mais do dobro do valor calculado. Conclui-se portanto que para coeficientes de transmissão térmica muito baixos, as variações percentuais podem ser muito elevadas.

Observando o global dos resultados apresentados na tabela 5.1 pode-se ainda concluir que os casos de estudo para os quais não foi possível obter *in situ* um valor confiável para o coeficiente de transmissão térmica, apresentam os valores mais elevados do cálculo teórico, ou seja, as paredes mais condutoras de calor foram aquelas para as quais não se conseguiu obter um valor de U nas medições *in situ*.

5.2. Principais conclusões

Da análise aos ensaios realizados, conclui-se que a orientação e a estação do ano têm influência nos resultados. Verificou-se que nas estações quentes os resultados não são satisfatórios, não se conseguiu na maior parte dos casos obter um resultado para o valor U e nos casos em que se obteve um resultado, este diverge muito do valor teórico calculado.

A boa avaliação do comportamento térmico de paredes *in situ* com o instrumento utilizado neste estudo, depende de diversos factores, tais como a estabilidade das temperaturas durante um período de tempo considerável para que as medições se façam em regime constante e a uma diferença significativa entre a temperatura interior e a temperatura exterior. Outro factor que também tem influência na avaliação é a classe de inércia térmica da parede, que retarda a resposta da temperatura da parede a uma variação térmica exterior, influenciando desta forma o cálculo do coeficiente, que é efectuado com base nas temperaturas que se fazem sentir no momento da medição.

Na análise do coeficiente de transmissão térmica em regime constante com pequenas variações das temperaturas, este instrumento mostra-se bastante satisfatório, mas em situações de medições *in situ* em edifícios de habitação, tem muitas limitações, pelo facto de



se verificar variação da temperatura exterior ao longo do dia, leva a que a transmissão térmica através da parede não aconteça em regime constante.

5.3. Recomendações para trabalho Futuro

Para trabalhos futuros a continuação da execução de ensaios em novos casos e diferentes soluções construtivas, terá interesse para uma total abrangência deste estudo sobre o comportamento térmico de edifícios.

Poderá também ser aplicado a diferentes soluções conhecidas com diferentes classes de inércia térmica em que se quantifique também a inércia térmica e onde se faça uma análise da influência desta nos resultados. Podendo com esta análise criar um parâmetro de correcção da influência da inércia térmica nos resultados finais.

Provavelmente, um trabalho executado para uma só solução construtiva mas que envolvesse um balanço energético do espaço em teste, onde se quantificasse de alguma forma a contribuição de cada elemento da envolvente para o parâmetro temperatura interior. Realizando vários ensaios com diferentes soluções para os restantes elementos da envolvente de forma a quantificar de que maneira uma envolvente não uniforme influencia os resultados obtidos.



Referências Bibliográficas

- [1] Eurostat, *Environment and energy*. Luxemburgo:European Union, 2011.
- [2] DGEG-Direcção Geral de Energia e Geologia. <http://www.dgge.pt/>. [Online] [Citação: 11 de Julho de 2011.]
- [3] Estratégia Nacional para a Energia. *Diário da República* . 1ª Série nº73 , Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010. 15 de Abril 2010.
- [4] **Ogilvy & Mather Portugal**. *Eficiência Energética nos Edifícios*. s.l. : Direcção Geral de Energia - Ministério da Economia, Fevereiro 2002.
- [5] *Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia. Desempenho Energético dos Edifícios*. 31 de Julho de 2009.
- [6] *Decreto-Lei Nº 80/2006 - Regulamento das características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)*. 4 de Abril de 2006.
- [7] *Decreto-Lei Nº 78/2006 - Sistema nacional de certificação energética e da qualidade do ar Interior nos edifícios*. 4 de Abril de 2006.
- [8] **Lucio Laurenti, Fulvio Marcotullio, Filippo de Monte**. *Determination of the thermal resistance of walls*. International Journal of Thermal Sciences 43. 2003.
- [9] **M. Cucumo, A. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, V. Marinelli**. *A method for the experimental evaluation in situ of the wall conductance*. Energy and Buildings 38. 2005.
- [10] **Changhai Peng, Zhishen Wu**. *In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction*. Energy and Buildings 40. 2008.
- [11] **Paul Baker (Centre for Research on Indoor Climate &Health, Glasgow Caledonian University)**. In Situ U-value measurements in traditional buildings - preliminary results. Historic Scotland-Technical Conservation Group. 2008.
- [12] **G.-Fivos Sargentis, A. Chatzimpiros and N. Symeonidis**. *Determination method of thermal conductivity of building parts in situ through IR imaging by minimizing the influence of environmental parameters*. International Conference on Environmental Science and Technology. 2009.



- [13] Fenghao Wang, Dongyang Wang, Xinke Wan, Jianbo Yao. *A data analysis method for detecting wall thermal resistance considering wind velocity in situ*. Energy and Buildings 42. 2010.
- [14] Min-Hwi Kim, Jin-Hyo Kim, Oh-Hyun Kwon, An-Seop Choi and Jae-Weon Jeong. *Overall heat transfer coefficient of a korean traditional building envelope estimated through heat flux measurements*. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2011.
- [15] Pier Giorgio Cesaratto, Michele De Carli, Sergio Marinetti. *Effect of different parameters on the in situ thermal conductance evaluation*. Energy and Buildings 43. 2011.
- [16] Incropera, Frank P. e De Witt, David P. *Fundamentos de transferência de Calor e de massa*. LTC - Livros técnicos e científicos editora. 1998.
- [17] Yunus A. Çengel, Michael A. Boles e Roque, tradução Katia Aparecida. *Termodinâmica 5ª Edição*. Mc Graw Hill. 2007.
- [18] Frank Kreith, Mark S. Bohn. *Princípios de transferência de Calor*. Thomson 2003.
- [19] Yunus A. Çengel. *Heat and Mass Transfer: A Practical Approach, 2ª Edição*. Mc Graw Hill. 2002.
- [20] Miguel Costa Santos Nepomuceno. *Comportamento Térmico de Edifícios - Parte I*. Apontamentos das Aulas de Física das Construções - Universidade da Beira Interior. 2009.
- [21] ISO 9869:1994. *Building components and elements - In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance*. 1994.
- [22] Changhai Peng, Zhishen Wu. *Thermoelectricity analogy method for computing the periodic heat transfer in external building envelopes*. Applied Energy 85. 2008.
- [23] Carlos A. Pina dos Santos, Luís Matias. *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. Edifícios ITE - 50. LNEC 2006.