



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Avaliação *in situ* do desempenho térmico de soluções construtivas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Construções

Autor

Ana Margarida Gregório Gonçalves

Orientadores

Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira

Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Janeiro, 2015

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação teve o contributo de várias pessoas, às quais desejo manifestar o meu sincero agradecimento.

Desde logo aos meus orientadores, Professora Doutora Andreia Pereira e Professor Doutor Diogo Mateus, pela constante disponibilidade para a orientação do trabalho bem como pelo inestimável contributo para a sua realização, com conhecimentos, conselhos e sugestões.

Agradeço também à Marina por se ter mostrado sempre disponível e pronta a ajudar, e por me ter iniciado na instalação de equipamentos e medições, apontando sugestões práticas que se revelaram essenciais.

Aos meus pais e à minha irmã, que me apoiaram e incentivaram durante todo o percurso académico e me deram oportunidade de um futuro melhor. Tenho que agradecer também pelo exemplo de dedicação, pela compreensão, carinho e amor.

Ao Zé, não posso deixar de agradecer mais uma vez todo o amor, paciência e apoio. A tua simples presença foi fundamental para superar os obstáculos e chegar ao fim desta etapa.

E finalmente, a todos os meus colegas e amigos que me apoiaram e estiveram presentes quando foi necessário, contribuindo direta ou indiretamente para a realização desta dissertação.

RESUMO

As questões de ordem ambiental têm sido cada vez mais motivo de preocupação a nível mundial, por resultarem em alterações climáticas e consequentes problemas ambientais, sociais e económicos. Em Portugal, o setor dos edifícios é responsável por uma percentagem significativa dos consumos energéticos, sendo também um dos principais responsáveis pelas emissões de dióxido de carbono.

Desta forma, é dada grande importância às intervenções ao nível dos edifícios, apostando na promoção da eficiência energética e na adoção de medidas legislativas que obriguem ao aumento dessa eficiência.

Sabe-se que o desempenho térmico dos edifícios está diretamente relacionado com o comportamento térmico das suas envolventes, sendo determinante o coeficiente de transmissão térmica.

É apresentada neste trabalho uma metodologia para a avaliação *in situ* do desempenho térmico de soluções construtivas, com recurso a um sistema de medição do fluxo de calor e das temperaturas superficiais e ambientes. Concluídas as medições, essa avaliação pode ser feita recorrendo a cálculos e determinando o respetivo coeficiente de transmissão térmica. O objetivo desta determinação consiste na comparação entre os valores medidos *in situ* com os valores previstos para o edifício na fase de projeto.

Os resultados dos ensaios indicam que pode existir convergência entre os valores do coeficiente de transmissão térmica medidos e os valores de projeto. Durante as medições deve ser mantido um diferencial de temperatura significativo entre o interior e o exterior do edifício. Para além disso, a temperatura interior deve ser mantida o mais estável possível e a duração do ensaio não deve ser inferior a 4 dias. Desta forma, o método pode ser usado na avaliação do desempenho energético de edifícios e na deteção de causas de eventuais patologias.

ABSTRACT

The environmental issues have been more and more reasons of a world concern, as they result in climate changes and related environmental, social and economic problems. The building sector in Portugal is responsible for a significant percentage of power consumption, being also one of the main responsible for the carbon dioxide emissions.

Thus, it is given great importance to the buildings level interventions, focusing in the energy efficiency promotion and in adopting legislative measures mandatory for this efficiency increase.

It is known that buildings thermal performance is directly related to the thermal behavior of their surroundings, being determinant the thermal transmittance coefficient.

In this paper is presented a methodology for an *in situ* thermal performance evaluation of constructive solutions, using a heat flux, surface and ambient temperatures measurements system. Collected the measurements, this evaluation can be made using calculations and obtaining the correspondent thermal transmittance coefficient. The target of this determination is to compare the *in situ* measured values with the building projected values.

The test results indicate that there can be a convergence between measured thermal transmittance coefficient values and project values. During the measurement period it should be kept a significant differential temperature from the inside and the outside of the building. Either the inside temperature should be kept as stable as possible and the test time length should not be less than 4 days. This way, the method can be used for the buildings energetic efficiency evaluation and in detection of possible buildings pathologies causes.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento e motivação.....	1
1.2 Objetivos do trabalho.....	1
1.3 Estrutura do trabalho.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Eficiência Energética	3
2.1.1 Aspetos condicionantes da eficiência energética	3
2.1.2 O consumo de energia em Portugal.....	4
2.1.3 A evolução das emissões de CO ₂	5
2.2 Conforto Térmico	6
2.2.1 O conforto térmico	6
2.2.2 Parâmetros do conforto térmico	7
2.3 Regimes de Transmissão de Calor	7
2.3.1 Regime Permanente.....	8
2.3.2 Regime Variável.....	9
2.4 Fenómenos de Transmissão de Calor	10
2.4.1 Condução.....	10
2.4.2 Convecção	12
2.4.3 Radiação	12

2.5 Caracterização Térmica de Materiais e Elementos de Construção	13
2.5.1 Condutibilidade térmica	13
2.5.2 Resistência térmica.....	14
2.5.3 Coeficiente de transmissão térmica.....	15
2.6 Ensaio para Avaliação do Comportamento Térmico dos Edifícios	16
2.6.1 Termografia.....	16
2.6.2 Ensaio de ventilação pressurizada.....	18
2.6.3 Sistema de identificação de envidraçados	19
2.6.4 Inspeção visual remota.....	20
2.6.5 Inspeção ultrassónica.....	21
2.6.6 Detecção por radar	22
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	23
3.1 Método da Medição do Fluxo de Calor	23
3.2 Equipamentos.....	24
3.2.1 Termofluxímetro	24
3.2.2 Termopares.....	25
3.2.3 Datalogger	26
3.2.4 Câmara de termografia	26
3.3 Procedimento	27
3.3.1 Escolha das fachadas a analisar.....	28
3.3.2 Definição da localização e instalação dos equipamentos.....	28
3.3.3 Levantamento de dados relativos ao elemento analisado.....	29
3.3.4 Recolha de dados <i>in situ</i>	30
3.3.5 Análise de dados.....	30
3.3.6 Correção de dados devido ao efeito do armazenamento térmico.....	32
3.3.7 Interpretação de resultados.....	34
3.3.8 Cálculo do valor de U de projeto	34
3.3.9 Comparação entre os diversos valores de U.....	35
3.4 Erros Operacionais e Precisão das Leituras	36

4 CASOS DE ESTUDO	37
4.1 Caso de estudo 1	37
4.1.1 Fachada a analisar	37
4.1.2 Descrição do ensaio.....	37
4.1.3 Resultados obtidos na faixa constituída por uma parede de betão revestida com pedra calcária	40
4.1.4 Resultados obtidos na faixa constituída por uma parede de betão revestida com o sistema ETICs	46
4.2 Caso de estudo 2	52
4.2.1 Fachada a analisar	53
4.2.2 Descrição do ensaio.....	53
4.2.3 Resultados obtidos no pilar	54
4.2.4 Resultados obtidos na parede	59
5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	64
5.1 Conclusões	64
5.2 Trabalhos Futuros	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Consumo de energia primária (ktep) em Portugal de 2000 a 2012 (DGEG, 2014)...	5
Figura 2.2 - Regime permanente e variável (Michels et al., 2011).....	8
Figura 2.3 - Regime permanente.....	9
Figura 2.4 - Regime variável.....	9
Figura 2.5 - Transmissão de calor em edifícios (Valério, 2007).....	10
Figura 2.6 - Lei de Fourier (Rodrigues e Piedade, 1998).....	11
Figura 2.7 - Lei de Newton (Rodrigues e Piedade, 1998).....	12
Figura 2.8 - Câmara termográfica (FLIR, 2014).....	17
Figura 2.9 - Exemplo de um termograma da fachada de um edifício (Santos, 2014).....	17
Figura 2.10 - Técnica de ventilação pressurizada (Keefe, 2010).....	19
Figura 2.11 - Equipamento para identificação da espessura dos vidros e da caixa-de-ar de envidraçados (BRE, 2006).....	20
Figura 2.12 - Técnica de inspeção visual remota de uma fachada (BRE, 2006).....	21
Figura 2.13 - Esquema de funcionamento do método ultrassónico (Berke, 1990).....	21
Figura 2.14 - Método da deteção por radar (Sato et al., 2014).....	22
Figura 3.1 - Termofluxímetro (Hukseflux, 2000).....	24
Figura 3.2 - Termopar tipo K (Pico Technology, 2014).....	25
Figura 3.3 - Datalogger (Pico Technology, 2014).....	26
Figura 3.4 - Câmara de termografia (FLIR, 2014).....	27
Figura 3.5 - Sistema de medição utilizado no trabalho experimental.....	29
Figura 4.1 - Esquema da instalação dos equipamentos.....	38
Figura 4.2 - Termograma interior da faixa constituída por uma parede de betão revestida com pedra calcária (junto a um radiador que se encontrava desligado).....	38
Figura 4.3 - Termograma interior da faixa constituída por uma parede de betão revestida com o sistema ETICs.....	39
Figura 4.4 - Termograma exterior da faixa constituída por uma parede de betão revestida com pedra calcária.....	39
Figura 4.5 - Termograma exterior da faixa constituída por uma parede de betão revestida com o sistema ETICs.....	40
Figura 4.6 - Corte do pormenor construtivo da solução 1.....	40
Figura 4.7- Termofluxímetro e sensores de temperatura na solução 1.....	41
Figura 4.8 - Temperaturas e fluxo da solução 1 sem aquecimento.....	41
Figura 4.9 - Temperaturas e fluxo da solução 1 com aquecimento.....	42

Figura 4.10 - Valores de U obtidos para a solução 1 sem aquecimento.....	45
Figura 4.11 - Valores de U obtidos para a solução 1 com aquecimento.....	45
Figura 4.12 - Corte do pormenor construtivo da solução 2.....	47
Figura 4.13 - Termofluxímetro e sensores de temperatura na solução 2.....	47
Figura 4.14 - Temperaturas e fluxo da solução 2 sem aquecimento.....	48
Figura 4.15 - Temperaturas e fluxo da solução 2 com aquecimento.....	49
Figura 4.16 - Valores de U obtidos para a solução 2 sem aquecimento.....	51
Figura 4.17 - Valores de U obtidos para a solução 2 com aquecimento.....	51
Figura 4.18 - Termograma interior da zona do pilar.....	53
Figura 4.19 - Termograma interior da zona da parede de alvenaria dupla.....	54
Figura 4.20 - Corte do pormenor construtivo no pilar.....	55
Figura 4.21 - Termofluxímetro e sensor de temperatura no pilar.....	55
Figura 4.22 - Temperaturas e fluxo do pilar.....	56
Figura 4.23 - Valores de U obtidos para o pilar.....	58
Figura 4.24 - Corte do pormenor construtivo na parede.....	59
Figura 4.25 - Termofluxímetro e sensor de temperatura na parede.....	59
Figura 4.26 - Temperaturas e fluxo da parede.....	60
Figura 4.27 - Valores de U obtidos para a parede.....	62

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Parâmetros do conforto térmico.....	7
Quadro 2.2 - Condutibilidade térmica dos principais materiais de construção (adaptado de Aipex, 2011).....	14
Quadro 3.1 - Características dos termopares tipo K (Grupo ECIL, 2014).....	26
Quadro 3.2 - Características da câmara FLIR E40bx (FLIR, 2014).....	27
Quadro 3.3 - Calor específico dos principais materiais de construção (adaptado de Çengel, 2008)	32
Quadro 3.4 - Valores das resistências térmicas superficiais.....	35
Quadro 4.1 - Características das camadas da solução 1.....	43
Quadro 4.2 - Cálculo dos fatores de massa térmica da solução 1.....	44
Quadro 4.3 - Cálculo de $U_{projeto}$ da solução 1.....	44
Quadro 4.4 - Variação entre os valores de U medidos, corrigidos e de projeto para a solução 1.....	46
Quadro 4.5 - Características das camadas da solução 2.....	49
Quadro 4.6 - Cálculo dos fatores de massa térmica da solução 2.....	50
Quadro 4.7 - Cálculo de $U_{projeto}$ da solução 2.....	50
Quadro 4.8 - Variação entre os valores de U medidos, corrigidos e de projeto para a solução 2.....	52
Quadro 4.9 - Características das camadas do pilar.....	56
Quadro 4.10 - Cálculo dos fatores de massa térmica do pilar.....	57
Quadro 4.11 - Cálculo de $U_{projeto}$ do pilar.....	57
Quadro 4.12 - Variação entre os valores de U medidos, corrigidos e de projeto do pilar.....	58
Quadro 4.13 - Características das camadas da parede.....	60
Quadro 4.14 - Cálculo dos fatores de massa térmica da parede.....	61
Quadro 4.15 - Cálculo de $U_{projeto}$ da parede.....	62
Quadro 4.16 - Variação entre os valores de U medidos, corrigidos e de projeto da parede.....	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e motivação

As principais preocupações na área do ambiente, da conservação da natureza e das alterações climáticas têm vindo a requerer a atenção de todo o mundo. Em Portugal, o setor dos edifícios é responsável por uma percentagem significativa dos consumos energéticos, onde os combustíveis fósseis apresentam um papel de destaque no que diz respeito ao consumo de energia primária. Com o objetivo de reduzir tanto os consumos de energia como as emissões de gases que provocam o efeito de estufa, surgiu o protocolo de Quioto em 1997.

Desde então, os regulamentos têm sido cada vez mais exigentes ao nível do desempenho energético dos edifícios de forma a contribuir para o cumprimento das normas impostas, tornando-se uma das medidas de redução do consumo de energia e de emissões de CO₂. Em Portugal, entrou muito recentemente em vigor o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (DL 118/2013, 2013), que veio substituir o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006). Este novo regulamento introduz alterações ao nível dos requisitos térmicos e energéticos dos edifícios, tornando-os mais exigentes. Por outro lado, existe uma valorização do uso de energias renováveis.

Neste trabalho é proposta uma metodologia para a avaliação *in situ* do desempenho térmico de soluções construtivas, com recurso a um sistema de medição de fluxo de calor e temperaturas superficiais e ambientes. Essa avaliação pode ser feita através da determinação do respetivo coeficiente de transmissão térmica, pois este coeficiente é um dos parâmetros que influencia de forma significativa o desempenho energético dos edifícios, permitindo garantir que a eficiência energética projetada para o edifício antes da construção está presente após a sua construção.

1.2 Objetivos do trabalho

O principal objetivo desta dissertação de mestrado é a avaliação do desempenho térmico de diversas soluções construtivas existentes, através da determinação *in situ* do respetivo coeficiente de transmissão térmica.

Após essa determinação, torna-se útil e interessante verificar se os valores de U obtidos através da medição *in situ* estão em conformidade com os valores previstos para elementos construtivos da mesma natureza, utilizando uma abordagem próxima da habitual em projeto. Caso a diferença entre os valores medidos e os valores de projeto seja significativa, é importante encontrar uma explicação para esse facto.

Posto isto, pretende-se que este trabalho possa contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia mais eficaz e fiável de avaliação energética de edifícios *in situ*, nomeadamente uma verificação do desempenho térmico do edifício na fase de utilização.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se estruturado em 5 capítulos, sendo o primeiro capítulo a Introdução.

Segue-se o Capítulo 2, onde são apresentados todos os conceitos fundamentais que estão na base do desempenho térmico de soluções construtivas. Começa-se por abordar a temática da eficiência energética e do consumo energético em Portugal, passando para uma breve referência ao tema do conforto térmico. São também tecidas algumas considerações sobre o fenómeno da transferência de calor, passando tanto pelos regimes de transferência de calor como pelos fenómenos envolvidos. De seguida, são descritos os parâmetros térmicos fundamentais para a avaliação e caracterização de materiais e elementos na construção, sendo descrito o processo de cálculo analítico utilizado para a determinação dos seus valores. Por último, são apresentados os principais ensaios para avaliação do comportamento térmico dos edifícios, sendo sempre que possível, referidas as principais vantagens e desvantagens.

O Capítulo 3 consiste na apresentação e descrição detalhada do método experimental, bem como os equipamentos utilizados e o processo de escolha dos elementos a analisar.

No Capítulo 4 são incluídos os resultados das medições realizadas *in situ* com recurso a um termofluxímetro e termopares. Os resultados obtidos são expostos e analisados.

Por último, no Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões a que se chegou com o trabalho desenvolvido, propondo através destas possíveis trabalhos futuros a realizar neste contexto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Eficiência Energética

2.1.1 Aspetos condicionantes da eficiência energética

A eficiência energética pode ter diversas definições. No entanto, esta consiste em obter o máximo desempenho na realização de uma atividade com o menor gasto de energia possível, ou seja, a eficiência energética é a otimização do consumo de energia. Essa energia, para ser utilizada necessita de ser transformada, surgindo assim um grande desperdício durante este processo de transformação. Como tal as empresas que processam e vendem energia têm centrado a sua atenção neste assunto, que tem vindo a ser cada vez mais uma preocupação de ordem mundial. Contudo, esses desperdícios não ocorrem apenas durante o processo de transformação, prolongando-se mesmo até à fase do consumo. Aqui, a eficiência energética é associada ao termo “Utilização Racional da Energia” (URE) que admite a adoção de medidas para um melhor aproveitamento da energia nos setores domésticos, de serviços e da indústria (EcoEDP, 2014).

Esses desperdícios trazem consequências para o meio ambiente, sendo a mais grave o aumento do efeito de estufa, que surge através das elevadas emissões de alguns gases para a atmosfera terrestre, resultantes da combustão de recursos fósseis, como o petróleo ou o carvão. Isto acontece devido à excessiva concentração de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases na atmosfera terrestre, reduzindo a libertação de calor para o espaço e provocando um aquecimento do planeta. Neste sentido, 36 países industrializados comprometeram-se em 1997, ao assinar o Protocolo de Quioto, a reduzir tanto os consumos de energia como as emissões de gases que provocam o efeito de estufa (Guia EDP, 2006).

Desde então, os regulamentos têm sido cada vez mais exigentes ao nível do desempenho energético dos edifícios, tornando-se uma das medidas de redução do consumo de energia e de emissões de CO₂. A Diretiva Europeia relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD, 2013), inspirada no protocolo de Quioto, regula os requisitos mínimos de desempenho energético para a construção de edifícios na Europa, tendo sido das principais impulsionadoras da renovação das normas de construção assim como das técnicas de verificação de desempenho (ADENE, 2014a). De acordo com a Diretiva 2010/31/EU, a União Europeia impõe metas para

o ano de 2020, em que os objetivos são o aumento de 20% na eficiência energética, a redução de 20% nas emissões de CO₂ e a utilização de 20% de energia proveniente de fontes renováveis (ADENE, 2014a).

Essa meta imposta pela Diretiva obriga à alteração dos regulamentos anteriores, tendo surgido muito recentemente em Portugal (dezembro de 2013) o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação, designado por REH (DL 118/2013, 2013), que veio substituir o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, RCCTE (RCCTE, 2006). Este novo regulamento veio definir um mapa evolutivo com vista à adoção de requisitos com um nível ótimo de rentabilidade, atualizando os requisitos regulamentares e introduzindo requisitos de eficiência dos sistemas. Visa também a promoção da utilização de fontes de energia renováveis, incentivando à utilização de sistemas passivos.

2.1.2 O consumo de energia em Portugal

Portugal é um país que consome cada vez mais energia, produzindo apenas 20% da energia que consome, tornando-o num dos países mais dependentes da utilização de energias fósseis importadas. Segundo a DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia), em 2012 a dependência de Portugal em termos de importação de energia foi de 80%. Esse facto gera anomalias na economia do país, uma vez que o custo dos combustíveis fósseis importados encarece a produção de bens e serviços no território nacional. Como alternativa surge o aumento da eficiência no uso da energia e o aproveitamento do potencial de energias renováveis, que em Portugal se baseia, fundamentalmente, em energia hídrica e eólica.

Observando os dados da DGEG (Figura 2.1), em 2012 o petróleo continuou a manter no nosso país um papel fundamental no consumo energético, representando 44% do consumo total de energia primária. Comparando com os dados de 2000, nota-se uma grande redução na dependência exterior em relação ao petróleo, ganhando destaque as energias renováveis, que contribuíram em 21%, e o gás natural, que contribuiu em 19% para a diversificação da oferta de energia. Já o consumo de carvão representou em 2012 cerca de 14% do total do consumo de energia primária, tendo-se notado uma pequena redução progressiva do peso desta energia na produção de eletricidade.

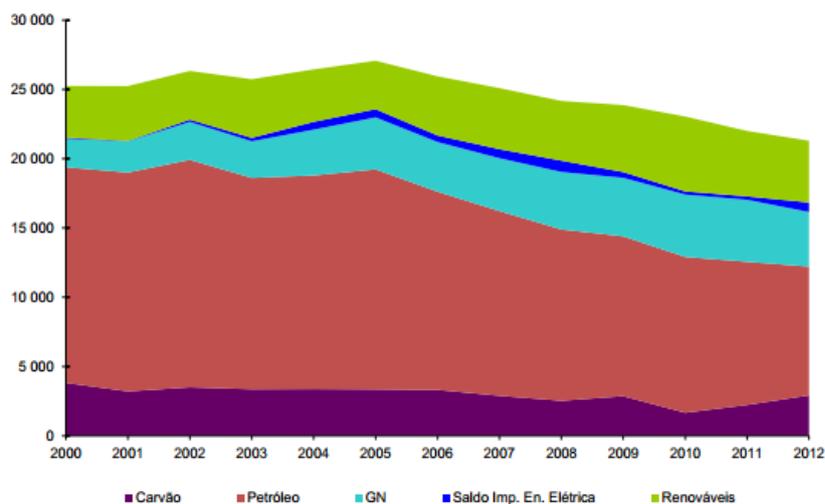


Figura 2.1 – Consumo de energia primária (ktep) em Portugal de 2000 a 2012 (DGEG, 2014)

Passando então a analisar o consumo de energia por setores, a liderar o consumo energético estiveram os setores de transportes e da indústria. Assim, no balanço de 2012, os transportes foram responsáveis por 35,5% da energia consumida, a indústria por 29,1%, o setor doméstico por 13,5%, o setor de serviços por 12,9% e os restantes 9% estiveram relacionados com outras atividades como a agricultura, pesca, construção e obras públicas (DGEG, 2014).

É importante referir que se encontra a decorrer em Portugal “O Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética – Portugal Eficiência 2016 (PNAEE)”, que estabelece como meta a alcançar até 2016, a implementação de medidas de melhoria de eficiência energética, equivalentes a 9% do consumo final de energia. Este plano passa a abranger seis áreas específicas: transportes, residencial e serviços, indústria, estado, comportamentos e agricultura (ADENE, 2014b).

2.1.3 A evolução das emissões de CO₂

Ao longo dos últimos anos, as preocupações sobre a eficiência energética aumentaram em muitos países, particularmente para os países com um regulamento energético em comum, como os estados membros da União Europeia. Neste aspeto, durante as duas últimas décadas, tem havido uma preocupação constante sobre os efeitos nocivos de certos poluentes, como o CO₂, dióxido de enxofre (SO₂) ou óxido nitroso (N₂O).

De acordo com (Gómez-Calvet et al., 2014a), o setor elétrico representa, simultaneamente, um desafio e uma oportunidade para a redução das emissões de gases de efeito estufa no meio

ambiente. Por um lado, é um desafio porque a eletricidade é gerada principalmente a partir de combustíveis fósseis, representando mais de 40% das emissões de CO₂ relacionadas com a energia global. Estes são fontes não renováveis que, quando queimados produzem energia, mas que poluem o ambiente quando os resíduos da queima são libertados para a atmosfera.

Considerando que as emissões de CO₂ para o ambiente são diretamente proporcionais ao consumo de combustíveis à base de carbono queimado (carvão, petróleo ou gás natural, entre outros), o desafio reside no facto de que é impossível manter o nível de combustível fóssil não renovável, e ao mesmo tempo, reduzir a quantidade de CO₂ libertada. Este desafio torna-se ainda maior se tivermos em conta que, de acordo com as tendências atuais, as emissões anuais de carbono associadas à produção de eletricidade e de calor derivado são projetadas para superar o nível de 4000 Mt C em todo o mundo até 2020 (Mt C representa milhões de toneladas de matéria de carbono e matéria de carbono representa 27,27% da massa total de CO₂).

Por outro lado, o setor da energia elétrica também representa uma oportunidade na redução de emissões desses gases de efeito de estufa, pois torna-se mais fácil de acompanhar e controlar essas emissões a partir de um número limitado de grandes estações de energia centralizadas do que de milhões de veículos, pequenas caldeiras, entre muitos outros.

(Gómez-Calvet et al., 2014b) afirmam que, se o objetivo é reduzir as quantidades de CO₂ emitidas, algumas das alternativas são:

- Usar centrais nucleares. A energia nuclear pode produzir tanta energia como os combustíveis fósseis com um baixo custo. Já as preocupações com a segurança, a eliminação de resíduos de radioatividade e a proliferação tornam-na uma alternativa controversa;
- Aumentar o uso de fontes renováveis de energia. Muito esforço tem sido depositado neste domínio, oferecendo novas oportunidades e reduzindo custos por KW.h. No entanto, existem várias dificuldades importantes relacionados a estas fontes, como a disponibilidade, o armazenamento de energia e as perdas no transporte.

2.2 Conforto Térmico

2.2.1 O conforto térmico

Para além de toda a importância dada à questão da eficiência energética, o conforto térmico é uma condição fundamental a alcançar para o bem-estar e para a saúde dos ocupantes, de forma a aumentar o seu grau de satisfação. Assim, o principal objetivo dos estudos de térmica nos edifícios do ponto de vista da satisfação das exigências de conforto, é conseguir equilibrar a

comodidade humana, mantendo as temperaturas interiores e dos paramentos dentro de limites razoáveis, com o mínimo de custos globais resultantes dessa melhoria.

Define-se conforto térmico como “o estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda” (Lamberts, 2005a). Esta condição também pode ser avaliada por meio de investigações objetivas, olhando para o corpo humano como um sistema termodinâmico que troca calor com o ambiente físico circundante (d’Ambrosio Alfano et al., 2014). A diferença entre o calor produzido pelo corpo e o calor libertado para o ambiente provoca no ser humano uma sensação de desconforto, podendo ser devido ao calor ou ao frio.

Existe ainda uma norma internacional para assegurar o conforto térmico em ambientes, sendo a ISO 7730 (1994). Esta considera que um espaço apresenta condições de conforto térmico quando não mais do que 10% dos seus ocupantes se sintam desconfortáveis (Águas, 2000).

2.2.2 Parâmetros do conforto térmico

Os parâmetros mais importantes do conforto térmico subdividem-se em duas classes: parâmetros individuais ou humanos ou parâmetros ambientais, apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Parâmetros do conforto térmico

Parâmetros individuais/humanos	Parâmetros ambientais
Atividade desenvolvida	Temperatura do ar
	Humidade do ar
Vestuário usado	Velocidade do ar
	Temperatura radiante média

Existem também outras variáveis a ser consideradas, com influência nas condições de conforto de cada pessoa, como o sexo, idade, raça, hábitos alimentares, peso, altura, entre outros (Lamberts, 2005b). A temperatura do ar é a principal variável do conforto térmico, sendo também a mais fácil de controlar, pois todos os restantes parâmetros ambientais dependem desta.

2.3 Regimes de Transmissão de Calor

Considere-se uma parede com todos os paramentos suficientemente isolados, exceto dois, opostos e paralelos. Num instante inicial, estes dois paramentos encontram-se à mesma temperatura, T_i , não existindo portanto transmissão de calor. Eleva-se posteriormente um dos

paramentos à temperatura T_f , passando a haver transferência de calor no sentido do eixo x , como ilustra a Figura 2.2.

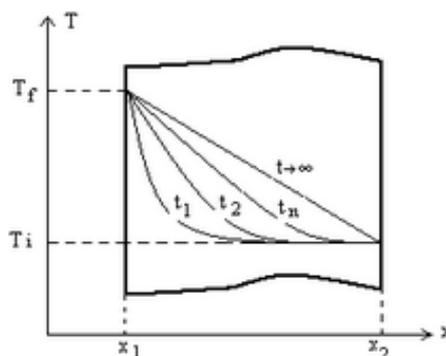


Figura 2.2 - Regime permanente e variável (Michels et al., 2011)

Supondo que T_i e T_f são temperaturas mantidas constantes, haverá para cada instante t uma curva $T=f(x)$, ou seja, um ponto escolhido dentro da mesma secção reta irá ter temperaturas diferentes com o decorrer do tempo. No entanto irá chegar a uma altura em que, desde que se conservem T_i e T_f , os pontos dentro da mesma secção reta deixarão de ter a sua temperatura a variar com o tempo. Este exemplo caracteriza os dois regimes em que pode ocorrer a transmissão de calor: regime permanente e regime variável (Michels et al., 2011).

2.3.1 Regime Permanente

Durante o período em que um mesmo ponto da parede manteve a sua temperatura constante no tempo, pode-se afirmar que se estava perante o regime permanente. Por outras palavras, o regime permanente é aquele em que o fluxo de calor é constante no interior da parede, sendo o fluxo que entra igual ao fluxo que sai do elemento, como exemplificado na Figura 2.3.

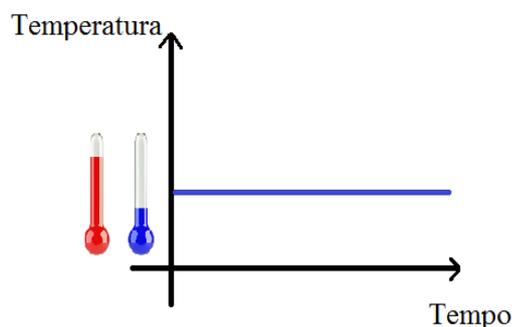


Figura 2.3 - Regime permanente

No cálculo térmico dos edifícios, verifica-se por vezes uma flutuação das temperaturas exteriores ao longo do tempo tal como uma variação na intensidade da radiação solar que intervém nas fachadas. Por este motivo, o regime permanente dificilmente é atingido numa situação real.

2.3.2 Regime Variável

Voltando ao exemplo anterior, durante o período em que o mesmo ponto da parede alterou a sua temperatura em função do tempo, diz-se que a parede estava em regime variável. Ou seja, o fluxo de calor é variável nas diferentes secções da parede, sendo o fluxo que entra diferente do fluxo que sai, como mostra a Figura 2.4.

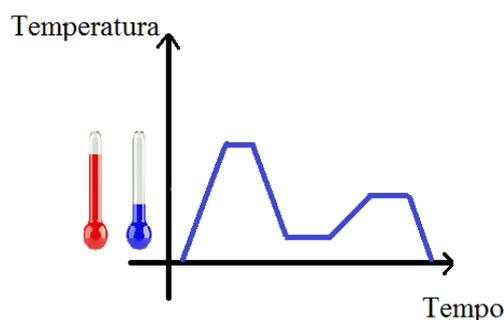


Figura 2.4 - Regime variável

Para avaliar a transmissão de calor numa parede em regime variável, pode ser adotado um método de diferenças finitas adequado para um sistema de condução de calor em elementos opacos onde se verifiquem variações de temperatura ao longo do dia (Incropera et al., 2007a).

2.4 Fenómenos de Transmissão de Calor

Para estudar ou prever o comportamento térmico dos edifícios face às ações que o sujeitam é necessário conhecer o modo de propagação do calor através dos elementos de construção que o constituem. Através dos princípios básicos da termodinâmica, podemos afirmar que se verifica uma transmissão de calor entre dois elementos, ou entre dois pontos de um elemento, sempre que entre eles se estabelece uma diferença de temperaturas, dando-se uma transferência de energia de um para o outro. Esta transferência faz-se sempre no sentido do elemento a mais elevada temperatura para o de mais baixa, com conservação de energia, ou seja, a quantidade de calor que o elemento mais quente transmite é igual à quantidade de calor recebida pelo elemento mais frio.

A transmissão de calor a partir da envolvente pode ocorrer segundo três mecanismos distintos, ilustrados na Figura 2.5 e detalhados de seguida: condução, convecção e radiação. Atendendo à variação das condições de fronteira e à inércia do sistema, estes são fenómenos de regime dinâmico.

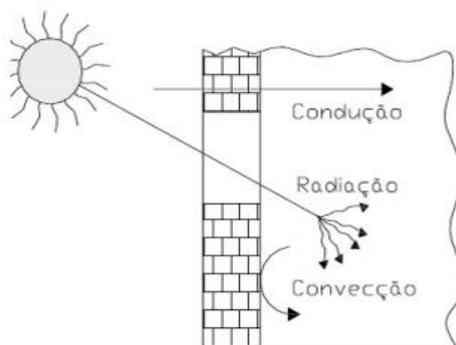


Figura 2.5- Transmissão de calor em edifícios (Valério, 2007)

2.4.1 Condução

Condução é a forma típica de transmissão nos corpos, que ocorre principalmente em sólidos, embora possa estar presente também em fluidos e gases. Acredita-se que esta forma de transmissão de calor está fortemente ligada à energia interna da matéria, correspondendo ao movimento aleatório das moléculas e dos átomos dentro do corpo. Deste modo, é transferida a energia de um ponto com maior potencial energético (maior temperatura) para um de menor potencial (menor temperatura).

A expressão matemática que rege os fenómenos de transferência de calor por condução é estabelecida pela lei de Fourier em 1822, que mostra que o fluxo de calor que atravessa uma dada superfície é proporcional ao produto da área atravessada pelo gradiente de temperatura existente, estando ilustrada na Figura 2.6 (Rodrigues e Piedade, 1998).

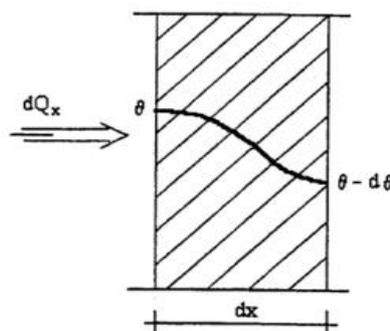


Figura 2.6 - Lei de Fourier (Rodrigues e Piedade, 1998)

O fluxo de calor por condução é dado pela seguinte expressão:

$$Q = -\lambda A \frac{d\theta}{dx} \quad (1)$$

Sendo Q o calor que atravessa a superfície (W), λ a condutibilidade térmica (W/m°C), A a área da superfície (m²) e $\frac{d\theta}{dx}$ o gradiente de temperatura existente (°C/m).

O fluxo de calor para esta situação é admitido como sendo unidirecional, pois existe uma distribuição uniforme e constante no tempo da temperatura interna e externa. Mesmo que na realidade o fluxo seja principalmente tridimensional, as condições de fronteira são muito próximas das representadas e a espessura do elemento é consideravelmente menor do que as suas faces, continuando assim a considerar-se para a maioria dos casos um fluxo unidirecional de forma a simplificar a análise.

Verifica-se um fluxo bidimensional em envolventes com elementos de resistência térmica substancialmente diferentes, inseridos no elemento de construção corrente (pontes térmicas) ou nos elementos de construção com camadas paralelas (com características térmicas diferentes) ao sentido fluxo.

2.4.2 Convecção

Convecção é a forma corrente de transmissão no interior de um fluido ou entre este e uma superfície sólida. O estudo da transmissão de calor por convecção, pressupõe o conhecimento acerca do movimento aleatório das moléculas juntamente com o movimento do fluido, dependendo se este movimento se realiza devido às diferenças de pressão provocadas por gradientes térmicos (convecção natural), ou se essas mesmas diferenças são relativas ou impostas por causas externas (convecção forçada) (Incropera et al., 2007b).

A expressão matemática que descreve o fenómeno de transferência de calor por convecção foi descrita por Newton em 1701, mostrando que o fluxo de calor transmitido por convecção entre uma superfície e um fluido é proporcional à área considerada e à diferença de temperatura estabelecida, como mostra a Figura 2.7.

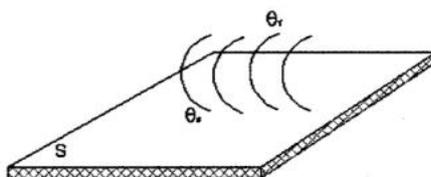


Figura 2.7 - Lei de Newton (Rodrigues e Piedade, 1998)

O fluxo de calor por condução é dado pela seguinte expressão:

$$Q = h_c A (\theta_s - \theta_f) \quad (2)$$

Sendo Q o fluxo de calor transferido (W), h_c o coeficiente de transmissão de calor ($W/m^2\text{°C}$), A a área de transmissão (m^2), θ_s a temperatura da superfície (°C) e θ_f a temperatura do fluido (°C).

2.4.3 Radiação

Como foi visto, tanto os fenómenos de condução como os de convecção requerem a presença de suportes físicos. De acordo com (Çengel e Ghajar, 2011), a radiação destaca-se das anteriores pelo facto de ocorrer em todos os materiais e em qualquer fase, pois todos os corpos emitem e recebem radiação, sendo assim mais eficiente no vácuo. Deve-se, portanto, a uma mudança na

configuração dos elétrons dos átomos constituintes ou das moléculas, levando a uma transferência de energia na forma de ondas eletromagnéticas (fotões).

A energia radiante que um corpo emite é dada pela lei de Stefan-Boltzman, tendo sido estabelecida experimentalmente em 1879 e comprovada teoricamente em 1884. Demonstra que a energia radiante emitida por um corpo negro (corpo que absorve toda a radiação incidente em qualquer comprimento de onda, não refletindo assim qualquer radiação), é proporcional à área do corpo e à quarta potência da sua temperatura absoluta. Esta lei permite calcular o poder emissor de um corpo (Santos, 2014).

$$Q = \varepsilon\sigma AT^4 \quad (3)$$

Sendo Q o fluxo de calor (W), ε a emissividade da superfície emissora, σ a constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), A a área de transmissão (m^2) e T a temperatura do corpo (K).

2.5 Caracterização Térmica de Materiais e Elementos de Construção

Existem parâmetros térmicos fundamentais para a avaliação e caracterização de materiais e elementos na construção, quando sujeitos a fenómenos de transmissão de calor em regime permanente: a condutibilidade térmica, a resistência térmica e o coeficiente de transmissão térmica.

2.5.1 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica é uma característica dos materiais de construção que traduz o efeito da condução e que representa a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente um metro desse material, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário. Por outras palavras, a condutibilidade térmica do material representa a facilidade e rapidez com que o calor fluirá através dele. Este coeficiente varia consoante o tipo de material, fase, peso, porosidade, humidade, entre outros.

$$\lambda = \frac{e}{R_t} \quad (4)$$

Sendo λ a condutibilidade térmica do material ($\text{W/m}^\circ\text{C}$), e a espessura da secção (m) e R_t a resistência térmica da camada ($\text{m}^2\text{C/W}$).

No que respeito aos produtos de construção, em particular aos isolantes térmicos e no âmbito da marcação CE, os fabricantes declaram um valor da condutibilidade térmica ou da resistência térmica (Santos e Matias, 2006). Apresenta-se no Quadro 2.2 alguns valores da condutibilidade térmica para os principais materiais de construção.

Quadro 2.2 - Condutibilidade térmica dos principais materiais de construção (adaptado de Aipex, 2011)

Material	Condutibilidade térmica (W/m°C)
Metais	35 (chumbo) - 381 (cobre)
Cimento	1,63-2,74
Água	0,60 (líquida) - 2,50 (gelo)
Tijolo maciço	0,72-0,90
Blocos de betão	0,35-0,79
Tijolo oco	0,49-0,76
Estuque de gesso	0,26-0,30
Tijolo multialveolar	0,20-0,30
Madeiras, lâminas	0,10-0,21
Betão celular	0,09-0,18
Isolamentos	0,026-0,050
Ar	0,026

(Asdrubali et al., 2014a) afirmam que os valores de condutibilidade térmica para as camadas altamente isoladas são geralmente bem estabelecidos e geralmente suportados por evidências experimentais, já o mesmo não se pode afirmar para outros componentes das paredes verticais, como tijolos e telhas, cujas propriedades térmicas apenas podem ser avaliadas através de análises complexas.

2.5.2 Resistência térmica

A resistência térmica de um elemento é decomposta em duas parcelas distintas: as resistências térmicas superficiais, interior e exterior, e ainda a resistência térmica da camada em questão. Tal como o nome indica, a resistência térmica da camada corresponde à dificuldade de transmissão de calor no material que a constitui e é determinada pelo quociente entre a espessura do material (e) e a sua condutibilidade térmica (λ), resultando na Equação (5).

$$R_t = \frac{e}{\lambda} \quad (5)$$

O cálculo da resistência térmica total de determinado elemento construtivo, é efetuado somando as resistências térmicas superficiais às resistências térmicas de todas as camadas que constituem esse elemento.

$$R_t = R_{si} + \sum_{i=1}^n R_n + R_{se} \quad (6)$$

Sendo R_{si} a resistência térmica superficial interior (m^2C/W), R_n a resistência da camada n do elemento (m^2C/W) e R_{se} a resistência térmica superficial exterior (m^2C/W).

No que respeita às resistências térmicas superficiais, estas traduzem o efeito da convecção e da radiação (em função da rugosidade da superfície, posição da superfície, entre outros).

2.5.3 Coeficiente de transmissão térmica

O coeficiente de transmissão térmica, também chamado de transmitância térmica, é a medida do fluxo térmico que, para uma diferença de temperatura de um Kelvin, atravessa um metro quadrado de material. Para o seu cálculo, é suficiente conhecer o valor calculado da resistência térmica de determinado elemento construtivo, uma vez que um é o inverso do outro (ISO 6946, 2007).

$$U = \frac{1}{R_t} \quad (7)$$

Sendo U o coeficiente de transmissão térmica (W/m^2C). O valor deste coeficiente pode ainda ser medido *in situ* através de ensaios não destrutivos. A medição do valor de U , é efetuada a partir da variação de fluxo de calor em condições de estabilidade, dividido pela diferença de temperatura entre os dois meios de cada lado do sistema (ISO 9869, 1994).

A transmissão térmica de paredes opacas é o principal parâmetro para avaliar a eficiência do edifício durante a estação de aquecimento, enquanto que durante a estação de arrefecimento outros parâmetros (sobretudo a capacidade de massa e o calor) têm que ser tidos em conta, devido ao comportamento dinâmico da estrutura (Asdrubali et al., 2014b).

Quanto menor for o valor do coeficiente global de transmissão térmica, menores serão as trocas de calor entre as duas superfícies de um elemento construtivo, contribuindo para a diminuição do consumo de energia nas operações relacionadas com a manutenção das condições de conforto térmico dos espaços.

2.6 Ensaios para Avaliação do Comportamento Térmico dos Edifícios

De forma a obter-se o nível de desempenho térmico projetado e, conseqüentemente, uma boa classificação energética, é essencial detalhar e instalar corretamente medidas eficientes. Torna-se assim crucial a utilização de testes pós-construção que identifiquem defeitos que possam ter ocorrido durante o processo de construção, não sendo geralmente visíveis. Estes defeitos podem levar a um aumento dos custos de funcionamento do edifício, a um desconforto por parte dos utilizadores e a uma deterioração precoce da estrutura.

Alguns dos procedimentos utilizados são um pouco mais complexos do que outros e exigem a experiência de especialistas, tanto para a realização do teste como para a interpretação dos resultados. Estes testes podem também ser classificados como invasivos, quando é causado um dano no material estudado, ou não invasivos quando não provocam alterações no elemento. Para além disso, alguns dos ensaios que irão ser referidos não são suficientes por si só para avaliar o comportamento térmico dos edifícios, porque apenas permitem avaliar um aspeto relativo a essa avaliação. Assim, ocorre muitas vezes a utilização simultânea de dois ou mais métodos para tornar possível a avaliação qualitativa e quantitativa dos elementos.

As principais técnicas realizadas pós-construção para avaliação do comportamento térmico dos edifícios são:

- Medição do fluxo de calor, através de um termo fluxímetro;
- Termografia;
- Ensaio de ventilação pressurizada;
- Sistema de identificação de envidraçados;
- Inspeção visual remota;
- Inspeção ultrassónica;
- Detecção por radar.

Face ao exposto, apresenta-se de seguida uma breve descrição dos ensaios acima referidos. Uma vez que este trabalho é dedicado ao cálculo do valor do coeficiente de transmissão térmica através de dados recolhidos *in situ* usando um termofluxímetro, este método de medição do fluxo de calor não será apresentado neste capítulo, mas será descrito com detalhe no capítulo seguinte.

2.6.1 Termografia

A termografia é um dos ensaios mais utilizados atualmente para avaliar o comportamento térmico *in situ*, talvez por ser um método não invasivo relativamente simples e que não necessita

de longos períodos de medições nem de contacto com a superfície a analisar. Esta técnica é realizada através de uma câmara termográfica (Figura 2.8) que deteta a radiação infravermelha emitida por um corpo (invisível ao olho humano), e converte-a numa imagem térmica que representa a distribuição de temperaturas superficiais do corpo, denominada de termograma. Como não existe uma cor associada ao infravermelho, todos os termogramas são reproduzidos através de um esquema de cores falsas, onde os azuis/pretos representam temperaturas mais frias do que os amarelos/branco, que representam temperaturas mais quentes (Figura 2.9).



Figura 2.8 – Câmara termográfica (FLIR, 2014)

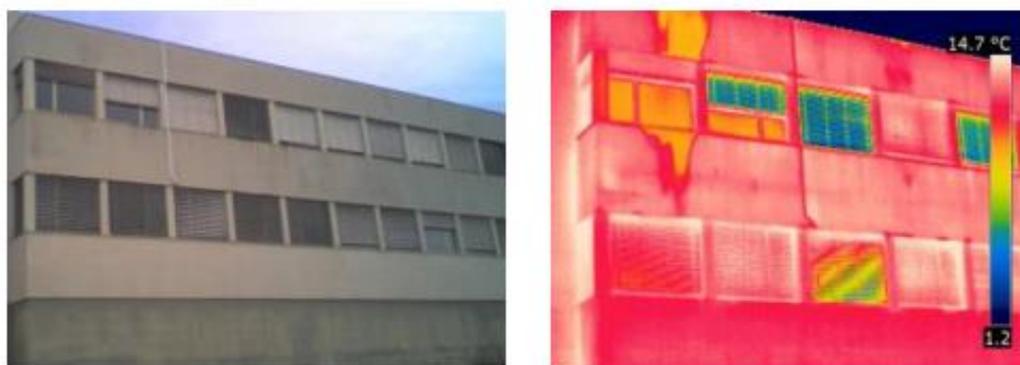


Figura 2.9 – Exemplo de um termograma da fachada de um edifício (Santos, 2014)

Existem dois tipos de análise termográfica: aqueles que são obtidos através de uma análise quantitativa e outros obtidos através de uma análise qualitativa. A análise quantitativa requer o uso de vários parâmetros que não são utilizados *in situ*, mas sim em computador, sendo portanto uma análise mais detalhada e exaustiva. A análise qualitativa é a mais frequente podendo ser usada na observação direta da estrutura para identificação de possíveis anomalias. De acordo com (Santos, 2014), a termografia possibilita várias aplicações no âmbito da térmica dos edifícios:

- Verificação de anomalias no isolamento;
- Identificação de elementos construtivos;
- Investigação de falhas no desempenho térmico da envolvente do edifício, como a localização de zonas com perdas de calor, humidades, zonas fissuradas, entre outros;
- Avaliação da extensão e do impacto das pontes térmicas.

(Albatici e Tonelli, 2010a) afirma que quando comparada com o método do termo fluxímetro, esta técnica oferece como vantagens o facto de as medições serem mais rápidas e contemplarem todas as superfícies do elemento, identificando zonas de pontes térmicas e áreas com humidades, obtendo uma diferença mínima entre os valores teóricos e os valores medidos.

Apesar disso, a termografia, tal como o método do cálculo do fluxo de calor, apresenta como condicionante a dependência das condições ambientais adequadas para assegurar a interpretação satisfatória dos resultados. Estas ocorrem geralmente durante os meses de inverno, quando a diferença de temperaturas entre o interior de um edifício e o exterior ronda os 10/15°C. É igualmente importante que o edifício não esteja exposto à radiação solar, que a superfície esteja seca (sem períodos de chuva durante o período de ensaio) e que a velocidade do vento seja baixa de forma a evitar fenómenos de convecção excessivos. No entanto, a principal limitação deste método é a dificuldade em avaliar o parâmetro de emissividade, devido à superfície de acabamento das paredes existentes, e a interpretação do coeficiente de transmissão térmica (Albatici e Tonelli, 2010b).

2.6.2 Ensaio de ventilação pressurizada

O ensaio de ventilação pressurizada avalia a permeabilidade ou impermeabilidade de um edifício. É uma técnica simples, que se aplica tanto a construções novas como a existentes, e que tem como objetivo o cálculo das renovações de ar por hora, estando assim fortemente ligada à eficiência energética. Caso o número de renovações de ar horárias não atinja os mínimos, poderão ocorrer condensações superficiais, alterando os valores do coeficiente de transmissão térmica das soluções. Caso contrário, se o edifício estiver perante uma ventilação excessiva, podem ocorrer perdas de calor significativas pela envolvente.

Começa-se então pela montagem de um ventilador num painel impermeável, colocado e fixado no vão da porta do compartimento a analisar. Para além deste equipamento, é também necessário um medidor da velocidade do vento (anemómetro), um termómetro e um barómetro para controlar a pressão. Esta técnica está ilustrada na Figura 2.10. Para evitar possíveis fugas de ar, a divisão a analisar deve permanecer completamente fechada. A ventoinha que constitui o equipamento de ventilação envia ar para dentro ou para fora da divisão, obtendo-se os valores

de permeabilidade pela análise da taxa de ar que é atravessada pelo ventilador, mantendo a diferença de pressão entre o interior e o exterior do compartimento constante (BRE, 2006a).



Figura 2.10 – Técnica de ventilação pressurizada (Keefe, 2010)

2.6.3 Sistema de identificação de envidraçados

A falta de dados relativos aos envidraçados pode comprometer o cálculo do coeficiente de transmissão térmica e também a análise do desempenho térmico do edifício no que toca à eficiência destes dispositivos. Torna-se então necessário confirmar que os vidros instalados são os pretendidos ou ainda especificar informação quando se está perante um envidraçado danificado. Esta técnica não invasiva mostra-se bastante útil, pois em envidraçados duplos ou triplos depois de construídos, é difícil verificar a espessura dos vidros utilizados e da caixa-de-ar existente entre eles, através da inspeção visual.

São comercializados medidores de laser, como mostra a Figura 2.11, que permitem identificar o tipo de envidraçado instalado e a presença de características de baixa emissividade, efetuando também a medição da espessura do vidro constituinte e da caixa-de-ar existente. O equipamento é colocado contra o vidro e é então ligado, sendo que a luz do laser passa através do envidraçado, refletindo em cada superfície para dar uma leitura instantânea numa escala de medição calibrada. A radiação solar direta não afeta as leituras.



Figura 2.11 – Equipamento para identificação da espessura dos vidros e da caixa-de-ar de envidraçados (BRE, 2006)

No entanto, este método não consegue detetar a presença de argon ou outro gás semelhante dentro da caixa-de-ar, ou o tipo de pigmentação aplicada no vidro (BRE, 2006b).

2.6.4 Inspeção visual remota

A inspeção visual remota na construção civil é feita usando um fibroscópio e permite a identificação de possíveis defeitos ocultos no elemento a analisar. Esta técnica é útil para a inspeção de serviços, nomeadamente sistemas de drenagem de água e esgotos, verificar pormenores construtivos, e detetar defeitos em paredes, pavimentos e coberturas, como humidades. Combinando esta técnica com a técnica da termografia anteriormente falada, é possível obter a causa exata do aparecimento de manchas devido à inexistência de isolamento térmico, ou devido à sua incorreta instalação. As inspeções podem ser realizadas, utilizando-se um endoscópio rígido ou um fibroscópio flexível, exemplificado na Figura 2.12, dependendo do tipo de acesso e da localização do elemento.

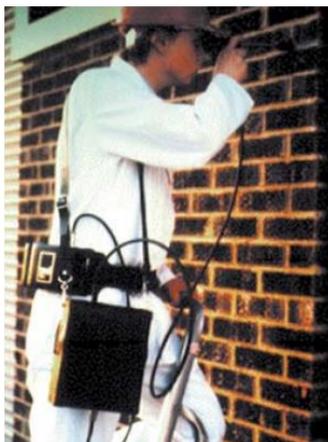


Figura 2.12 – Técnica de inspeção visual remota de uma fachada (BRE, 2006)

É necessário perfurar um furo de inspeção (cerca de 13 milímetros de diâmetro), utilizando a imagem termográfica como um guia para a sua localização, sendo por isso considerado um método invasivo. Os resultados podem ser registados anexando ao sistema uma câmara fotográfica ou uma câmara de vídeo (BRE, 2006c).

2.6.5 Inspeção ultrassónica

A inspeção por ultrassons é uma técnica amplamente utilizada em aplicações médicas e industriais. Sendo um ensaio não invasivo, permite que ondas de alta frequência atravessem as várias camadas que constituem o elemento analisado como ilustrado na Figura 2.13. Ao contrário do que acontece na maioria dos testes descritos, este equipamento não produz uma imagem, exigindo a necessidade de um especialista com experiência e conhecimento de física para realizar o teste e interpretar os resultados com sucesso.

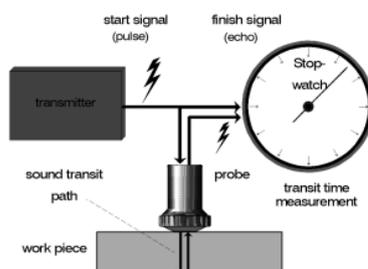


Figura 2.13 – Esquema de funcionamento do método ultrassónico (Berke, 1990)

Esta técnica pode ser usada em superfícies frágeis, sem causar danos, tendo sido frequentemente utilizada em edifícios históricos. Permite identificar a presença de deteriorações, zonas de descontinuidade, e também permite verificar a existência de sistemas de isolamento térmico e caixas-de-ar nos elementos analisados, sem que para isso seja necessária a desmontagem da estrutura ou até mesmo a demolição. Porém, esta técnica não irá proporcionar informações úteis e fiáveis quando a estrutura tiver um elevado número de descontinuidades no seu interior, pois o sinal dos ultrassons vai dispersar em várias direções (BRE, 2006d).

2.6.6 Deteção por radar

A técnica da deteção por radar foi desenvolvida a partir de aplicações militares e geotécnicas, sendo atualmente mais utilizada na deteção de defeitos em estruturas e pavimentos. É uma técnica não invasiva que permite determinar a composição da estrutura e verificar as suas condições, recolhendo dados das camadas constituintes da secção em estudo, através de sondas de eco com baixo poder de radiação, como mostra a Figura 2.14.

Uma antena ligada a um transmissor e a um recetor passa sobre a superfície da estrutura a uma velocidade controlada. O recetor regista a energia refletida para posterior processamento. É necessária a presença de um especialista para a análise do sinal emitido, podendo identificar a presença de fissuras, corrosão de elementos metálicos, presença de humidade e existência de descontinuidades em paredes e pavimentos.



Figura 2.14 – Método da deteção por radar (Sato et al., 2014)

Esta técnica apresenta como vantagem o facto de requerer o acesso apenas a uma das faces da superfície analisada. No entanto, estes sistemas precisam geralmente de ser calibrados no local e as sondas de eco não podem penetrar materiais altamente condutores, como os metais (BRE, 2006e).

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Método da Medição do Fluxo de Calor

O principal objetivo deste trabalho é avaliar e caracterizar termicamente soluções construtivas de paredes exteriores, recorrendo à medição *in situ* e posterior determinação dos valores dos coeficientes de transmissão térmica, U. Nesse sentido, foi utilizado o método da medição do fluxo de calor definido na norma ISO 9869:1994, sendo um método não invasivo que se baseia no estabelecimento de um gradiente de temperatura, analisando o fluxo de calor que atravessa de um lado para o outro do elemento (Desogus et al., 2011). Segundo (gSKIN, 2014), este é o único método que fornece informações quantitativas confiáveis relativas à envolvente do edifício.

As camadas do elemento a analisar devem ser opacas, perpendiculares ao fluxo de calor e sem qualquer fluxo de calor lateral significativo, ou seja, tem que se estar perante um fluxo de calor unidirecional. Tanto as temperaturas interiores como as exteriores deveriam ser mantidas constantes, de modo a evitar flutuações, gerando um fluxo estável e adequado através da amostra. Dito de outra forma, existe uma grande dificuldade em obter condições de regime permanente pois essa condição dificilmente é observada na prática.

Segundo (Albatici et al., 2010c), o fenómeno de transmissão de calor predominante neste método é a condução. A convecção e a radiação podem ser, de forma simplificada, consideradas em conjunto e tratadas como uma temperatura ambiente, que deve ser devidamente avaliada.

A determinação do valor de U poderá ser precedida de uma análise termográfica, que permitirá definir a localização mais adequada para os termofluxímetros de forma a representar toda a parede que se pretende analisar. Esta análise irá também ser útil para identificar irregularidades existentes que alterariam os resultados obtidos, como humidades, fissuras, pontes térmicas, entre outros. Esta metodologia foi baseada num trabalho efetuado no Reino Unido (Doran, 2000), embora com objetivos e metodologia diferentes, e também num estudo já realizado em Portugal, em Vila Real (Ribeiro, 2009a).

Os parâmetros medidos através deste método são as temperaturas superficiais internas e externas, as temperaturas ambientes interiores e exteriores, o fluxo de calor que atravessa o

elemento e a humidade relativa do ar. Através destes dados, obtém-se propriedades como a resistência térmica, R , e a condutibilidade térmica, λ , tal como a resistência térmica total, R_t , e o coeficiente de transmissão térmica, U .

3.2 Equipamentos

Os principais equipamentos utilizados para a realização dos ensaios *in situ* foram os termofluxímetros, os sensores de temperatura ou termopares, o datalogger, um computador e a câmara de termografia.

3.2.1 Termofluxímetro

O termofluxímetro, tal como o nome indica, serve para medir o fluxo de calor através de um objeto, sendo o fluxo que atravessa o equipamento equivalente ao que atravessa o elemento alvo de medição, considerando que não existem fugas laterais. Quando estimulado, o termofluxímetro emite um sinal elétrico captado essencialmente pelo seu núcleo. A área de medição destes equipamentos situa-se na sua zona central constituída por sensores de elevada sensibilidade (termopilha), capazes de captar toda a gama de fluxos que os atravessa. A maioria dos termofluxímetros são placas finas, compostas por um material cerâmico-plástico que permite baixar a sua resistência térmica, podendo captar todos os sinais provenientes do espaço onde se inserem (Hukseflux, 2000).

A área da secção de medição do termofluxímetro é muitas vezes menor do que a sua área total. Os termofluxímetros utilizados são da marca Hukseflux, denominados HFP01, como mostra a Figura 3.1, com cerca de 80 mm de diâmetro e 5 mm de espessura, possuindo ainda um cabo com 5 m de extensão.



Figura 3.1 – Termofluxímetro (Hukseflux, 2000)

Por serem equipamentos de precisão que funcionam para várias gamas de impulsos, a qualidade dos resultados depende da calibração periódica dos equipamentos. Desta forma, a calibração dos equipamentos utilizados, foi realizada previamente a este trabalho pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Outro ponto importante a referir, é o facto de que foi necessário converter os valores obtidos em mV pelo equipamento de armazenamento de dados, para W/m^2 , as unidades de fluxo pretendidas.

3.2.2 Termopares

Os termopares transmitem um sinal elétrico que é uma função uniforme da sua temperatura, permitindo obter os valores das temperaturas superficiais, sendo que neste trabalho foram também usados para medir as temperaturas ambientes interiores e exteriores. Estes devem permitir obter valores de temperatura cujos erros de medição sejam pequenos quando comparados com a diferença de temperatura medida ao longo do elemento.

Cada termopar deve ser colocado na periferia do sensor de fluxo, permitindo verificar se existem perturbações nas temperaturas junto destes.

Existem diferentes tipos de termopares, em função do metal utilizado e do calibre dos fios, tendo-se utilizado neste trabalho termopares do tipo K (Figura 3.2) que são mais resistentes à oxidação em temperaturas altas e que tem uma sensibilidade de aproximadamente $41\mu V/^{\circ}C$. As características gerais dos termopares tipo K estão representadas no Quadro 3.1 (Thermometrics Corp., 2014).



Figura 3.2 – Termopar tipo K (Pico Technology, 2014)

Quadro 3.1 – Características dos termopares tipo K (Grupo ECIL, 2014)

Tipo	Elemento	Faixa de Temperatura	Limite de erro padrão	Limite de erro especial
K	(+) Chromel	0 a 1260 °C	$\pm 2,2$ °C ou $\pm 0,75\%$	$\pm 1,1$ °C ou $\pm 0,4\%$
	(-) Alumel	-200 a 0 °C	$\pm 2,2$ °C ou $\pm 2\%$	-

3.2.3 Datalogger

Para observar e adquirir os dados provenientes dos termofluxímetros e termopares, é necessário um equipamento de aquisição contínua com capacidade de descodificar os sinais enviados pelos equipamentos.

O datalogger usado pertence à marca *Pico Technology*, modelo TC-08, com 8 canais (Figura 3.3). O equipamento não possui memória interna, pelo que foi necessário mantê-lo ligado a um computador durante todo o ensaio, para que os dados ficassem gravados nesse dispositivo. O coletor de dados não necessita de fonte de alimentação e basta conectar a uma porta USB, onde através do *software PicoLog* é possível extrair todos os valores das medições para um ficheiro Excel.

Figura 3.3 – Datalogger (*Pico Technology*, 2014)

3.2.4 Câmara de termografia

Tal como já foi referido, a termografia é uma técnica que retrata um objeto usando a energia térmica que a sua superfície irradia. Essa radiação é captada pela câmara termográfica e convertida posteriormente para um sinal elétrico, exibindo o resultado como um termograma.

Dada a sua capacidade para identificar a temperatura superficial do objeto em análise, a termografia permite verificar a homogeneidade/heterogeneidade dos elementos construtivos através dos termogramas obtidos.

A câmara de termografia utilizada neste trabalho foi o modelo E40bx da FLIR, como mostra a Figura 3.4. O Quadro 3.2 apresenta algumas das especificações referentes a este tipo de equipamento.



Figura 3.4 – Câmara de termografia (FLIR, 2014)

Quadro 3.2 – Características da câmara FLIR E40bx (FLIR, 2014)

Imagem e dados óticos	
Campo de visão	25°x19°
Resolução	160x120 <i>pixels</i>
Sensibilidade térmica	<0,045°C
Faixa espectral	7,5 µm - 13 µm
Focagem	Manual
Medições	
Faixa de temperatura	-20°C a +120°C
Precisão	±2°C ou ±2% da leitura

3.3 Procedimento

Uma vez que se pretende avaliar o desempenho térmico de diversas soluções construtivas em paredes exteriores de edifícios, foi necessário desenvolver uma metodologia experimental.

Os procedimentos do trabalho experimental envolvem várias fases, apresentadas da seguinte forma e detalhadas posteriormente:

- Escolha das fachadas a analisar;
- Definição da localização e instalação dos equipamentos;
- Levantamento de dados relativos ao elemento analisado;
- Recolha de dados *in situ*;
- Análise de dados;
- Correção de dados devido ao efeito do armazenamento térmico;
- Interpretação de resultados;
- Cálculo de $U_{projeto}$;
- Comparação entre U , $U_{corrigido}$ e $U_{projeto}$.

3.3.1 Escolha das fachadas a analisar

Segundo a norma ISO 9869, os elementos analisados devem ser constituídos por camadas quase homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, desde que as dimensões de qualquer elemento não homogêneo próximo do termofluxímetro sejam inferiores às suas dimensões laterais, e não sejam pontes térmicas (detetadas por termografia).

Deste modo, os elementos construtivos analisados pertencem a paredes exteriores, constituídas por camadas opacas perpendiculares ao fluxo de calor, não existindo fluxos de calor laterais significativos. O fácil acesso ao local de ensaio foi um aspeto fundamental na escolha, pois foram necessárias visitas diárias para verificação do correto funcionamento dos aparelhos. Tentou-se ao máximo procurar uma fachada que apresentasse soluções construtivas distintas, para que assim se pudesse abranger uma maior variedade de casos.

De acordo com (Gori et al., 2014), para se conseguir resultados precisos, deve-se evitar uma superfície exposta diretamente à radiação solar, dando-se preferência a uma fachada voltada a norte, pelo que estas indicações foram cumpridas neste trabalho.

3.3.2 Definição da localização e instalação dos equipamentos

A localização apropriada dos sensores deve ser investigada por termografia, quando o elemento a analisar assim o exige (como uma parede de alvenaria), de modo a assegurar um resultado que é representativo de todo o elemento. O termofluxímetro não deve ser instalado nas proximidades de pontes térmicas, fissuras ou outras patologias, revelando-se a termografia mais uma vez útil para averiguar esses aspetos.

No interior, deve ainda ser evitada a colocação dos equipamentos sob a influência direta de qualquer dispositivo de aquecimento ou de arrefecimento. Já no exterior, a superfície do elemento deve estar protegida da chuva, da neve e da radiação solar direta.

Embora o contacto térmico entre os sensores e a superfície deva ser direto, poderá existir uma camada fina de massa térmica de contacto. Assim, relativamente à fixação do termofluxímetro e dos sensores de temperatura, é essencial optar-se por uma solução termicamente neutra para não influenciar os resultados experimentais. Essa solução não deve danificar nem o acabamento das superfícies sobre o qual é colocada, nem o próprio equipamento que se pretende fixar. Foi então utilizada para a fixação dos sensores de temperatura uma massa adesiva (para garantir o contacto direto da sua extremidade) em conjunto com fita adesiva (para fixar o cabo à superfície, no caso do sensor encarregue de medir a temperatura ambiente). Quanto ao termofluxímetro, foi usada uma camada fina de pasta dentífrica (por recomendação do fabricante para colagens de curta duração) juntamente com a fita adesiva, para fixar o seu cabo.

Foram utilizados um total de 6 sensores de temperatura (4 para medir a temperatura superficial e 2 para a temperatura ambiente) e 2 termofluxímetros. Depois de colocados os principais equipamentos, foram ligados ao datalogger nos diversos canais, sendo este conectado a um computador, como mostra a Figura 3.5.

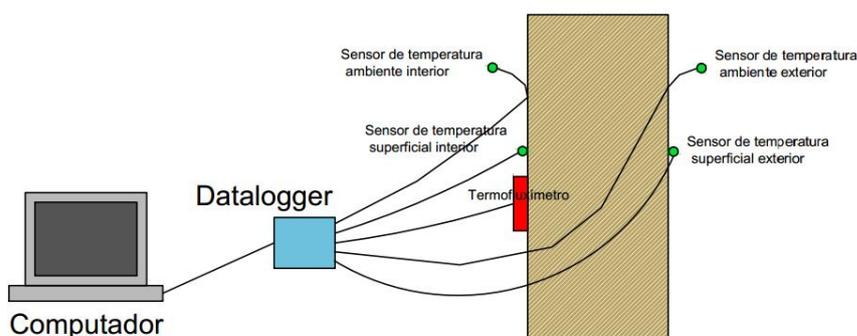


Figura 3.5 – Sistema de medição utilizado no trabalho experimental

3.3.3 Levantamento de dados relativos ao elemento analisado

A norma ISO 9869 recomenda a recolha de uma série de dados essenciais relativos ao elemento construtivo a ser estudado, sendo parte desses dados mais tarde aproveitados para os cálculos de $U_{projeto}$. Deve ser então registada a seguinte informação:

- Dados sobre o elemento a medir: localização do edifício onde o elemento se insere, localização do elemento no edifício, particularmente a sua orientação, tipo de elemento (parede, teto, piso, etc.), solução construtiva e a sua espessura;
- Dados sobre as medições: data e hora do início e do fim das medições, temperaturas medidas no início e fim das medições, o número total de medições e o número de medições por hora.

3.3.4 Recolha de dados *in situ*

Os dados recolhidos pelo termofluxímetro e pelos sensores de temperatura devem ser registados de forma contínua ou em intervalos fixos ao longo de um período de dias completos. O período de tempo máximo entre dois registos e a duração mínima do teste dependem da natureza do elemento (pesado, leve, posição do isolamento), das temperaturas interior e exterior (média e flutuações, antes e durante a medição) e do método usado na análise dos dados.

A duração mínima do teste é de 72 horas (3 dias) se a temperatura se mantiver estável em torno do termofluxímetro. Caso isso não se verifique, esta duração pode aumentar para mais de 7 dias. Apesar disso, a duração real do ensaio dependerá dos resultados obtidos ao longo das medições. Para diminuir o impacto de erros nos resultados, é fundamental que exista uma diferença mínima de 10°C entre o ambiente interior e o ambiente exterior, maximizando também o valor do fluxo obtido. Convém também que o ensaio seja realizado durante uma estação fria, como o inverno, para evitar que o sentido do fluxo se inverta.

Recomenda-se que as gravações sejam feitas em intervalos de tempo fixos, sem interrupções no processo de aquisição de dados, permitindo obter os valores médios das medições de várias amostras em intervalos de tempo mais curtos.

3.3.5 Análise de dados

A norma ISO 9869 propõe dois métodos distintos que podem ser utilizados para a análise dos dados: o método da média, que é simples, ou o método dinâmico, que é mais sofisticado, exigindo uma maior precisão nas medições, mas que pode encurtar a duração do teste em elementos de inércia térmica média ou forte.

Neste trabalho optou por se usar o método médio, pois embora leve a uma maior duração do ensaio, torna o processo de cálculos mais simples. De acordo com (Laurenti et al., 2004), o método dinâmico apresenta uma grande complexidade de cálculos, desde a falta de significado

físico para alguns dos parâmetros da regressão, bem como a necessidade de determinar simultaneamente algumas constantes de tempo desconhecidas no processo iterativo.

O método da média considera que o processo de transmissão de calor não atinge um regime estacionário (que é o que na realidade acontece), tendo em conta a variação ao longo do tempo do fluxo de calor bem como das temperaturas ambientes interiores e exteriores. Sendo que o índice j enumera as medições individuais e n o número total de medições registadas ao longo do ensaio, obtém-se uma estimativa do coeficiente de transmissão térmica, U ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$), através da aplicação da Equação (8).

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (8)$$

Sendo q_j o fluxo de calor no instante j (W/m^2), T_{ij} a temperatura ambiente interior no instante j ($^{\circ}\text{C}$), e T_{ej} a temperatura ambiente exterior no instante j ($^{\circ}\text{C}$). Após este cálculo, é observada uma convergência para um valor assintótico. Fica-se em condições de afirmar que esse valor é próximo do valor real se a temperatura se manteve aproximadamente constante ao longo do ensaio e se os sensores não foram expostos a radiação solar.

Para elementos construtivos de inércia térmica forte, como a maioria dos elementos usados nos edifícios portugueses, que tenham um calor específico por área de unidade superior a $20 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{°C})$, a análise deve ser feita durante um período de tempo que seja um número inteiro múltiplo de 24 horas. O ensaio só deve terminar e os seus valores considerados válidos quando estiverem reunidas as seguintes condições:

- A duração do teste deve ser superior a 72 horas (3 dias);
- O valor de U obtido no final do ensaio não difere mais do que $\pm 5\%$ em relação ao valor obtido 24 horas antes;
- O valor de U obtido através da análise de dados recolhidos durante o primeiro período de tempo INT ($2 \times \text{Dt}/3$) não desvia mais do que $\pm 5\%$ dos valores obtidos no último período de tempo com a mesma duração. Dt é a duração do teste em dias e INT é a parte inteira do número.

O intervalo entre registos depende também do método usado para a análise. Geralmente o intervalo entre registos varia entre 0,5 horas e 1 hora para o método médio, podendo ser menor para o método dinâmico. No entanto, o equipamento foi programado para fazer leituras de minuto a minuto no primeiro caso de estudo, e de 5 em 5 minutos para o segundo caso de estudo. Procedeu-se posteriormente aos cálculos das respetivas temperaturas médias e fluxos médios por hora.

3.3.6 Correção de dados devido ao efeito do armazenamento térmico

O método da média referido no ponto anterior, e usado para a análise de dados no presente trabalho, assume que todo o fluxo de calor medido passa da superfície interior à superfície exterior, no elemento testado. Na realidade, isso só irá acontecer caso o perfil de temperaturas ao longo do elemento seja o mesmo no início e no final do ensaio. Dito por outras palavras, o método da média não tem em conta os efeitos do armazenamento térmico, que está diretamente relacionado com a inércia térmica. Esta propriedade avalia a capacidade dos diferentes materiais constituintes de um elemento construtivo armazenarem o calor que lhes é transmitido. É necessário corrigir o valor do fluxo medido, para que possa ter em conta o calor retido pela parede, resultando num valor de U mais real. Esse procedimento envolve:

- O cálculo dos fatores de massa térmica interna e externa (F_i e F_e , respetivamente) para a estrutura em causa;
- Um ajustamento, envolvendo estes fatores de correção, ao fluxo medido em cada instante.

Os fatores devem ser obtidos considerando uma estrutura com N camadas verticais e paralelas, numeradas de 1 a N , onde a camada 1 corresponde à superfície interior quando o fluxo de calor é medido pelo interior. Para cada camada deve ser estimado o valor da sua resistência térmica, R_k , conforme a equação enunciada no capítulo anterior (espessura dividida pela condutividade térmica) e o valor da sua capacidade térmica, de acordo com a seguinte equação:

$$Ck = Cp * \rho * e \quad (9)$$

Onde Ck representa a capacidade térmica ($J/m^2\text{°C}$), Cp representa o calor específico do material ($J/kg\text{°C}$), ρ representa a densidade (kg/m^3) e e representa a espessura da camada (m). Os valores do calor específico de alguns dos materiais mais comuns na construção são indicados na Quadro 3.3:

Quadro 3.3 – Calor específico dos principais materiais de construção (adaptado de Çengel, 2008)

Material	Calor específico ($J/kg\text{°C}$)
Aço	502
Alumínio	896
Argamassa	1046
Betão	840
Cerâmica	920

Cortiça	1800
Madeira	1260
Pedras calcárias	920
Poliestireno	1200
PVC	1040
Tijolo	840

O valor R será a resistência térmica total do elemento construtivo, ou seja, a soma de todos os valores de R_k . Posto isto, para cada camada k calcula-se a resistência térmica interior (R_{ik}) e exterior (R_{ek}), sabendo que para a camada interior ($j=k=1$) $R_{ik}=0$, e para a camada exterior ($j=k=N$) $R_{ek}=0$:

$$R_{ik} = \sum_{j=1}^{k-1} R_j \quad (10)$$

$$R_{ek} = \sum_{j=k+1}^N R_j \quad (11)$$

As resistências térmicas superficiais devem ser incluídas nos valores de R_{si} , R_{se} e R , da seguinte forma:

- Deve adicionar-se R_{si} a cada valor de R_{ik} ;
- Deve adicionar-se R_{se} a cada valor de R_{ek} ;
- Deve adicionar-se $R_{si}+R_{se}$ a R .

Estamos agora em condições de avançar para o cálculo dos fatores de massa térmica de cada camada, através de:

$$F_{ek} = Ck \left[\frac{R_k}{R} \left(\frac{1}{6} + \frac{R_{ik}+R_{ek}}{3R} \right) + \frac{R_{ik} \cdot R_{ek}}{R^2} \right] \quad (12)$$

$$F_{ik} = Ck \left[\frac{R_{ek}}{R} + \frac{R_k^2}{3R^2} - \frac{R_{ik} \cdot R_{ek}}{R^2} \right] \quad (13)$$

Em que F_i e F_e são os fatores de massa térmica interiores e exteriores da camada k ($J/m^2 \cdot ^\circ C$). Os fatores de massa térmica para um elemento construtivo podem então ser quantificados através das equações:

$$F_i = \sum_{k=1}^N F_{ik} \quad (14)$$

$$F_e = \sum_{k=1}^N F_{ek} \quad (15)$$

Após estarem reunidos todos estes parâmetros, prossegue-se para a correção do fluxo de calor medido no termofluxímetro. Respeitando a norma, nenhuma correção é aplicada aos dados durante as primeiras 24 horas de medições. Após esse período, o somatório $\sum q_j$ da Equação (8) é substituído por:

$$\sum q_j - \frac{(F_i * \delta T_i + F_e * \delta T_e)}{\Delta t} \quad (16)$$

Onde δT_i e δT_e correspondem à diferença entre as temperaturas médias interiores e exteriores verificadas durante as 24 horas anteriores à leitura j e as temperaturas médias interiores e exteriores registadas durante as primeiras 24 horas do período em análise ($^{\circ}\text{C}$) e Δt diz respeito ao tempo entre leituras (s). Feita esta correção nos valores do fluxo, o procedimento descrito no ponto anterior repete-se, obtendo-se um novo valor do coeficiente de transmissão térmica, denominado de $U_{\text{corrigido}}$.

3.3.7 Interpretação de resultados

O valor final do coeficiente de transmissão térmica de um elemento construtivo deve ser obtido através da curva de U e da curva de $U_{\text{corrigido}}$, desde que se verifiquem todas as condições seguintes:

- O período de medição não deve ser inferior a 96 horas (4 dias);
- O período de medição é um número inteiro múltiplo de 24 horas;
- Os valores de U e $U_{\text{corrigido}}$ são da mesma ordem de grandeza do valor de U_{projeto} usado para determinar os fatores de correção, com uma margem de erro de 5%;
- Os valores de U e $U_{\text{corrigido}}$ podem ter uma margem de erro máxima de 5% no fim do ensaio, 24 horas e 48 horas antes do fim do mesmo;
- Os valores de U e $U_{\text{corrigido}}$ devem ter uma diferença menor ou igual a 5%, desde que não se considerem as primeiras 12 horas do ensaio.

Se as condições não forem cumpridas, o resultado do ensaio está sujeito a uma grande incerteza, devendo aplicar-se uma correção do erro operacional.

3.3.8 Cálculo do valor de U de projeto

Os valores de U_{projeto} para posterior comparação com os valores de U medidos, foram calculados segundo a norma ISO 9646, cujas equações foram apresentadas no capítulo anterior.

Os valores de condutibilidade térmica, λ , e de algumas resistências térmicas, R , adotados no cálculo, foram retirados do ITE 50, do LNEC. Os valores das resistências térmicas superficiais

estão apresentados na Quadro 3.4, tendo sido retirados do Despacho n.º 15793-K/2013, do REH.

Quadro 3.4 – Valores das resistências térmicas superficiais

Sentido do fluxo de calor	Rse (m ² °C/W)	Rsi (m ² °C/W)
Horizontal	0,04	0,13

3.3.9 Comparação entre os diversos valores de U

É expectável que no final do estudo se obtenham diferenças entre os diversos valores de U. Segundo a norma ISO 9869, essa diferença é considerada pouco significativa desde que não ultrapasse os 20%. Já (Ribeiro, 2009b), afirma que a diferença entre o valor de U medido e o valor de U calculado (ou seja, de projeto) pode atingir os 30%.

A ocorrência de uma diferença significativa entre estes valores poderá ter como causa a combinação dos seguintes aspetos:

- Os valores assumidos para os coeficientes de condutibilidade térmicas dos diferentes materiais não correspondem aos valores reais. Isto pode ocorrer devido à incorreta identificação dos materiais, particularmente no isolamento, ou ainda devido a efeitos de humidade;
- Os valores assumidos para as resistências superficiais não são os valores reais. Esta fonte de erro é geralmente associada a elementos mal isolados;
- As espessuras das diferentes camadas, especialmente nos materiais isolantes, não foram corretamente medidas;
- As medições de U não foram corretamente realizadas ou foram feitas sobre condições climatéricas adversas;
- As medições de U não foram realizadas no mesmo material de um elemento heterogéneo;
- As linhas de fluxo de calor durante a medição não foram lineares e perpendiculares ao elemento;
- A existência de fluxos de ar convectivos no elemento influenciaram as medições de U, mas não foram tidos em consideração no cálculo do seu valor de projeto;
- A ocorrência de mudanças de fase, como o gelo-degelo, condensação ou evaporação de água ou humidade;
- As temperaturas ambientes utilizadas para o cálculo do valor de U não correspondem às temperaturas medidas.

Todas estas fontes de erro devem ser tidas em conta na fase de interpretação e de comparação dos resultados dos valores medidos com os valores calculados.

3.4 Erros Operacionais e Precisão das Leituras

Para além de todos os aspetos citados anteriormente, relativos à fase de medições e aos elementos construtivos, é necessário ter também em conta que o próprio equipamento pode gerar erros operacionais. Deste modo, o grau de precisão das leituras depende dos seguintes fatores:

- A precisão de calibração do termofluxímetro e dos sensores de temperatura. Esse erro pode atingir os 5% caso os instrumentos estejam corretamente calibrados;
- A precisão do sistema de aquisição de dados;
- As variações térmicas aleatórias causadas por um deficiente contacto entre os sensores e a superfície do elemento. Esta variação será de cerca de 5% do seu valor médio se os sensores estiverem corretamente instalados. Poderão ser usados vários sensores de forma a corrigir esse erro;
- Do erro operacional do termofluxímetro, devido à modificação das isotérmicas causadas pela sua presença na superfície;
- Os erros provocados pelas variações ao longo do tempo das temperaturas e dos fluxos de calor. Esses erros podem ser reduzidos através do aumento do período de realização do ensaio, da redução das variações da temperatura interior ocorridas durante o ensaio, ou ainda com a aplicação do método dinâmico;
- Quando se pretende calcular o valor de U , as variações da temperatura ambiente e as diferenças entre a temperatura ambiente e a temperatura superficial assumem especial importância.

Tal como a norma indica, se os pontos acima referidos forem tidos em conta no processo, pode-se afirmar que a incerteza relativa ao cálculo do valor de U estará compreendida entre a soma da quadratura e a soma aritmética dos diversos erros ocorridos, ou seja, entre 14% e 18%.

4 CASOS DE ESTUDO

4.1 Caso de estudo 1

O primeiro caso de estudo está localizado no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, tratando-se de um edifício construído há cerca de 15 anos. A estrutura do edifício é em betão armado, bem como as paredes exteriores que também são resistentes. A envolvente exterior do edifício é revestida com o sistema de ETICs (*External Thermal Insulation Composite Systems*), ou seja, um revestimento delgado armado com fibra de vidro sobre o isolante térmico. A zona inferior das fachadas é protegida por um revestimento de pedra, que nalgumas zonas, reveste a totalidade da superfície da parede. Existem também paredes com betão à vista, sem tratamento especial.

4.1.1 Fachada a analisar

Os elementos construtivos analisados fazem parte de uma parede exterior do piso 3 situada a norte, de modo a obter na mesma fachada duas soluções construtivas distintas: uma parte inferior de betão, com pedra colada pelo exterior; um envidraçado que separa as duas faixas, e uma parte superior também de betão, mas com o sistema ETICs.

4.1.2 Descrição do ensaio

O ensaio foi dividido em duas partes distintas: uma primeira parte sem recurso a qualquer dispositivo de aquecimento, e uma segunda parte com o espaço aquecido usando um aquecedor.

A primeira parte do ensaio (sem aquecimento) teve início dia 10 de novembro de 2014 pelas 15h55m, com precipitação moderada, no período de outono, tendo-se registado no momento em que se iniciou o ensaio uma temperatura interior de 21,0°C e uma temperatura exterior de 12,9°C. Teve a duração de 7 dias e um total de 168 horas e 10080 dados registados, tendo terminado no dia 17 de novembro pelas 12h59m, com uma temperatura interior de 20,7°C e uma temperatura exterior de 16,9°C. A segunda parte do ensaio (com aquecimento) foi iniciada no dia 27 de novembro pelas 10h20m, tendo-se registado uma temperatura interior de 23,2°C e uma temperatura exterior de 14,3°C. Teve a duração de 10 dias e um total de 240 horas e 14400 dados registados, tendo terminado no dia 7 de dezembro pelas 8h06m, com uma temperatura interior de 22,5°C e uma temperatura exterior de 4°C.

A posição e colocação dos equipamentos estão descritas na Figura 4.1. Verificou-se também que houve por diversas vezes a abertura de janelas e portas por parte dos trabalhadores da referida oficina, facto esse que se tornou impossível controlar.

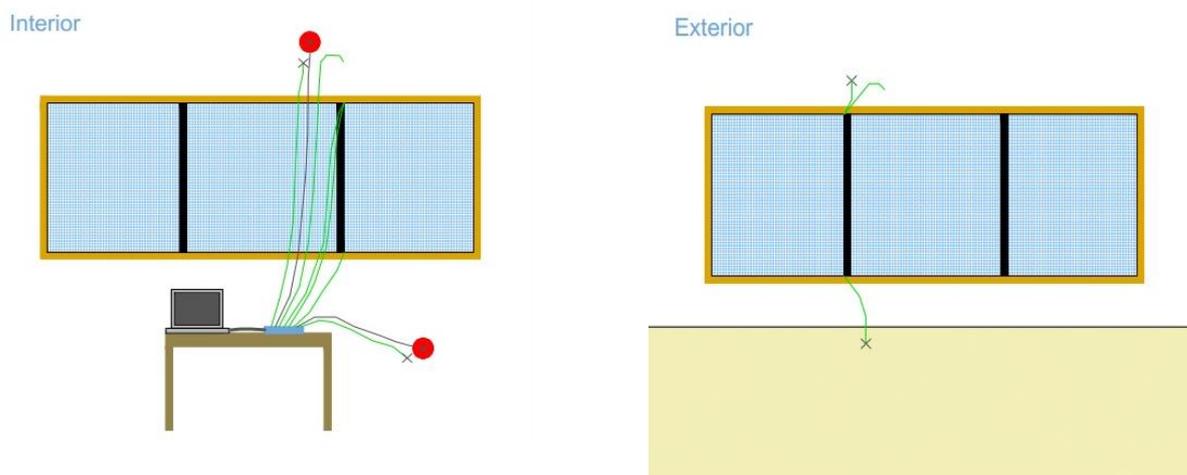


Figura 4.1 – Esquema da instalação dos equipamentos

Foram ainda efetuados registos de termografia das diferentes soluções da parede em estudo, para verificar a homogeneidade da superfície e as diversas distribuições da temperatura, registadas nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. Salienta-se desde já que as distribuições de temperaturas superficiais apresentadas através das imagens podem variar e dependem de muitos fatores, como a presença de vento, de chuva, e da altura do dia em que são tiradas.



Figura 4.2 – Termograma interior da faixa constituída por uma parede de betão revestida com pedra calcária (junto a um radiador que se encontrava desligado)

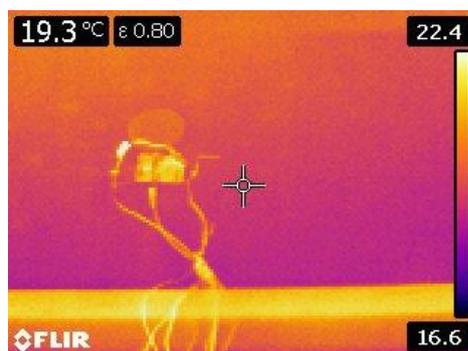


Figura 4.3 – Termograma interior da faixa constituída por uma parede de betão revestida com o sistema ETICs

Tal como expectável, o elemento com ETICs é o que apresenta temperaturas superficiais interiores mais elevadas. Isto deve-se à existência do isolamento térmico nesta zona. Já o elemento com pedra colada indica temperaturas superficiais interiores mais reduzidas, em virtude da inexistência de qualquer tipo de isolamento, provocando assim uma maior dissipação de calor através do elemento.

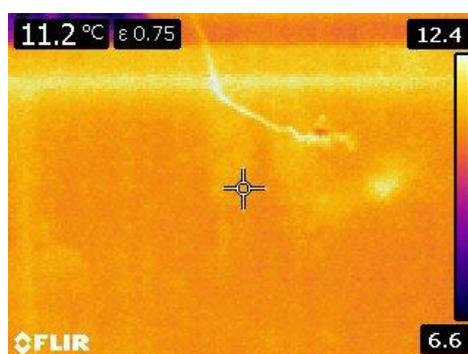


Figura 4.4 – Termograma exterior da faixa constituída por uma parede de betão revestida com pedra calcária

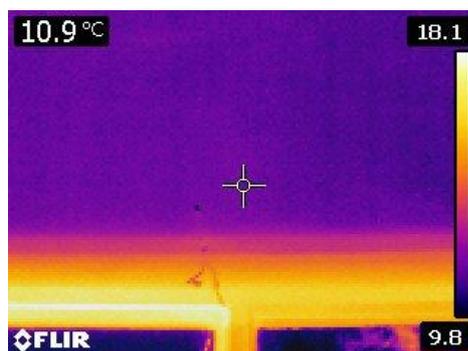


Figura 4.5 – Termograma exterior da faixa constituída por uma parede de betão revestida com o sistema ETICs

Relativamente às temperaturas superficiais exteriores, o elemento revestido com pedra mostra-se mais quente que o elemento revestido com o sistema ETICs pela razão já referida, ou seja, a não existência de isolamento térmico.

4.1.3 Resultados obtidos na faixa constituída por uma parede de betão revestida com pedra calcária

Como referido anteriormente, esta faixa da fachada com 28 centímetros de espessura é constituída por uma parede de betão revestida pelo exterior com pedra calcária, sem a aplicação de qualquer isolamento térmico. A Figura 4.6 mostra um corte do elemento construtivo, que para simplificar, irá ser denominado de solução 1.

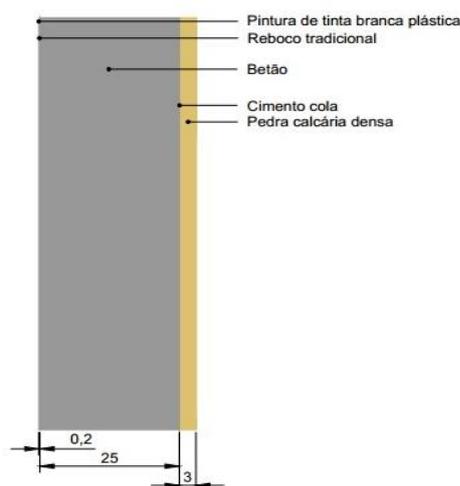


Figura 4.6 – Corte do pormenor construtivo da solução 1

A Figura 4.7 mostra em pormenor a localização do termofluxímetro e do sensor de temperatura superficial no interior, tal como a localização do sensor de temperatura superficial exterior.

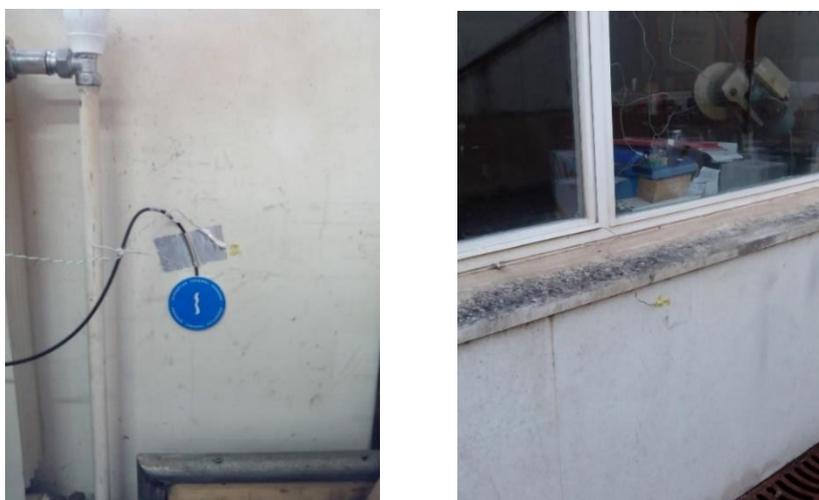


Figura 4.7 – Termofluxímetro e sensores de temperatura na solução 1

São agora apresentados os resultados das temperaturas superficiais medidas, das temperaturas ambientes e também os fluxos de calor registados. Os valores utilizados nos cálculos constituem médias diárias de leituras realizadas de 1 em 1 minuto, para cada um dos parâmetros referidos. Os resultados obtidos estão representados nos gráficos das Figuras 4.8 e 4.9, pois estão divididos numa análise sem aquecimento e outra com aquecimento.

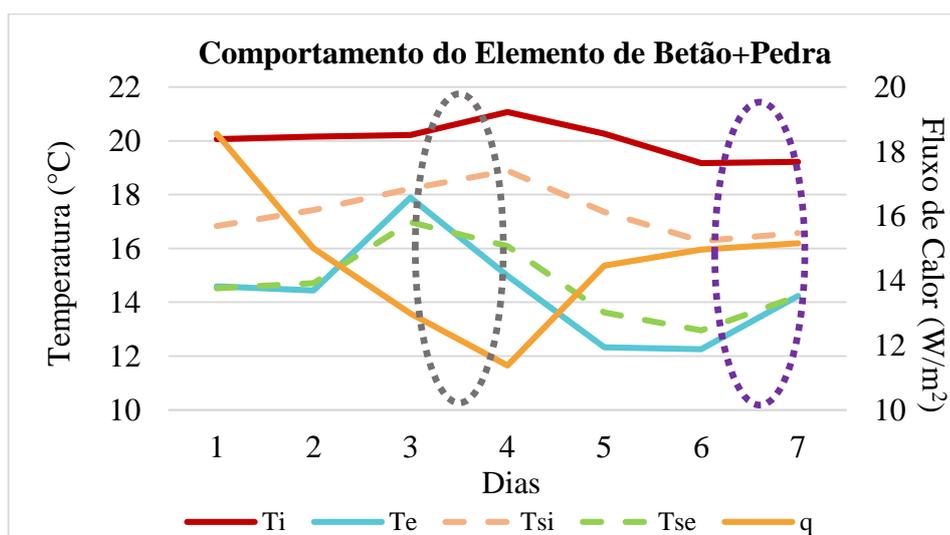


Figura 4.8 – Temperaturas e fluxo da solução 1 sem aquecimento

De acordo com os dados do primeiro gráfico, onde as temperaturas estão ainda em regime livre, as temperaturas médias do ambiente exterior são inferiores às do ambiente interior cerca de 6 °C. Esta reduzida diferença de temperaturas não proporciona a transferência de calor na parede do interior para o exterior de forma contínua, devido à capacidade do elemento de absorver parte desse calor. Para além disso, as temperaturas ambientes exteriores mantêm-se muito inconstantes ao longo destes primeiros 7 dias de ensaio.

Como seria de esperar, a temperatura superficial interior manteve-se sempre inferior à temperatura ambiente interior. Seria expectável que a temperatura superficial exterior fosse sempre superior à temperatura ambiente exterior, mas isso nem sempre se verificou. No dia 3, as temperaturas ambientes encontravam-se muito próximas, pelo que poderá ter existido um erro de leitura levando assim a que a temperatura ambiente exterior se encontre mais elevada que a temperatura da superfície exterior. Relativamente aos fluxos de calor, situaram-se no intervalo de 11,4 W/m² a 18,6 W/m², podendo constatar que nunca ocorreu uma inversão no sentido do fluxo, mantendo-se sempre do interior para o exterior. É também visível o efeito do armazenamento térmico, num primeiro caso em que a diferença entre a temperatura interior e a exterior aumenta e o fluxo diminui (assinalado com o círculo cinzento na Figura 4.8), e num segundo caso onde as temperaturas interior e exterior se aproximam e o fluxo aumenta (assinalado com o círculo roxo na Figura 4.8).

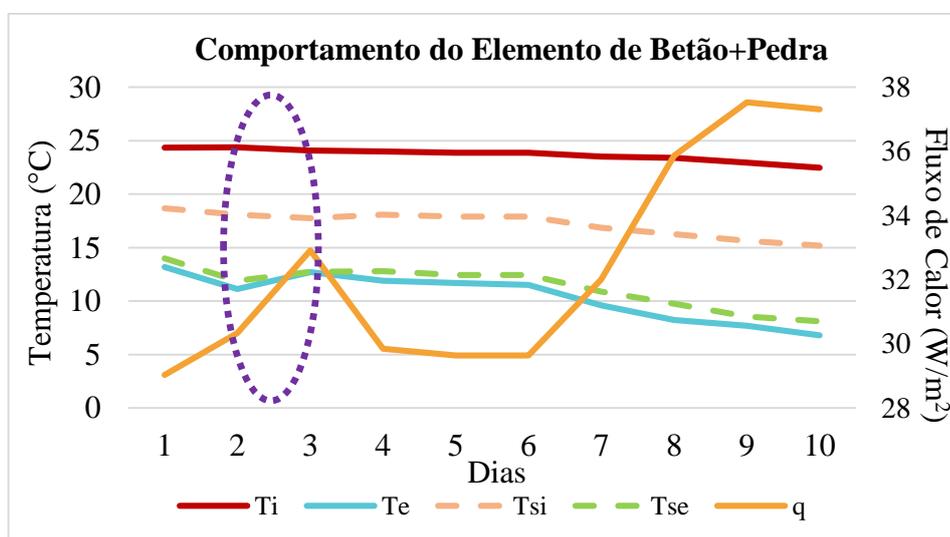


Figura 4.9 – Temperaturas e fluxo da solução 1 com aquecimento

No segundo gráfico, onde as temperaturas interiores estão já controladas, as temperaturas médias do ambiente exterior são muito inferiores às do ambiente interior, cerca de 13 °C. Ao longo destes 10 dias, as temperaturas mantiveram-se praticamente constantes.

A temperatura superficial interior manteve-se sempre inferior à temperatura ambiente interior, devido à resistência térmica superficial que é exercida pela parede. A temperatura superficial exterior foi sempre superior à temperatura ambiente exterior, mais uma vez devido à transferência de calor realizada do interior para o exterior. Os fluxos de calor variaram entre $29,0 \text{ W/m}^2$ e $37,5 \text{ W/m}^2$, ou seja, é evidente a alteração do fluxo que em termos médios, aumenta para o dobro. Mais uma vez, não houve inversão no sentido do fluxo de calor. É novamente visível o efeito do armazenamento térmico, quando as temperaturas interiores e exteriores se aproximam e o fluxo aumenta (assinalado com o círculo roxo na Figura 4.9).

Tendo então todos os dados necessários, o cálculo do valor de U deve ser realizado de acordo com a Equação (8), onde são utilizadas as temperaturas ambientes interiores e exteriores e o fluxo de calor que atravessa a parede. As variáveis de que depende o cálculo constituem valores médios diários. Estes resultados serão apresentados mais à frente, em conjunto com os valores de U já corrigidos devido ao efeito do armazenamento térmico.

A correção do fluxo devido ao efeito de armazenamento térmico da parede foi realizada de acordo com a explicação dada no capítulo anterior. Atendendo às suas características, a solução 1 possui inércia térmica elevada devido à sua espessura e ao seu peso, e conseqüentemente possui maior potencial de armazenamento de calor ao longo das diferentes camadas. Antes de se iniciar qualquer cálculo, foi necessário indicar os valores da resistência térmica, da densidade e do calor específico de cada camada, indicados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Características das camadas da solução 1

Materiais e descrição	e (m)	Rk ($\text{m}^2\text{C/W}$)	ρ (kg/m^3)	Cp ($\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$)
Rsi	-	0,13	-	-
Reboco tradicional	0,002	0,002	1900	1046
Parede de betão	0,25	0,13	2350	840
Pedra calcária densa	0,03	0,02	2095	920
Rse	-	0,04	-	-
Total	0,28	0,32	-	-

Para efeitos de cálculo, é necessário determinar alguns parâmetros como a capacidade térmica dos diferentes materiais que constituem as camadas e as respetivas resistências térmicas. Ficam assim reunidas as condições para o cálculo dos fatores de massa térmica, usando as Equações (12) e (13). O Quadro 4.2 mostra todos os valores obtidos:

Quadro 4.2 – Cálculo dos fatores de massa térmica da solução 1

Materiais e descrição	Ck (J/m ² .°C)	Rik (m ² °C/W)	Rek (m ² °C/W)	Fik (J/m ² °C)	Fek (J/m ² °C)
Rsi	-	0	0,19	-	-
Reboco tradicional	3974,8	0,13	0,19	1377,7	956,7
Parede de betão	493500	0,13	0,06	81321,9	75743,1
Pedra calcária densa	57822	0,26	0,04	1492,8	6640,6
Rse	-	0,28	0	-	-
Total	555296,8	-	-	84192,4	83340,3

A partir desta determinação, pode ser determinado o fluxo corrigido com a aplicação da Equação (16) para cada um dos dias de ensaio. Desta forma, conclui-se o cálculo do valor de $U_{\text{corrigido}}$. O valor de U_{projeto} foi calculado de acordo com as diferentes espessuras e condutibilidades térmicas das várias camadas da parede e é apresentado no Quadro 4.3, tendo-se obtido um valor de 3,14 W/m²°C.

Quadro 4.3 – Cálculo de U_{projeto} da solução 1

Camada	Materiais e descrição	e (m)	λ (W/m°C)	R (m ² °C/W)	U (W/m ² °C)
-	Rsi	-	-	0,13	3,14
1	Reboco tradicional	0,002	1,3	0,002	
2	Parede de betão	0,25	2	0,13	
3	Pedra calcária densa	0,03	1,4	0,02	
-	Rse	-	-	0,04	
Total				0,32	

As Figuras 4.10 e 4.11 mostram os valores de U e de $U_{\text{corrigido}}$ obtidos ao longo dos ensaios com e sem aquecimento.

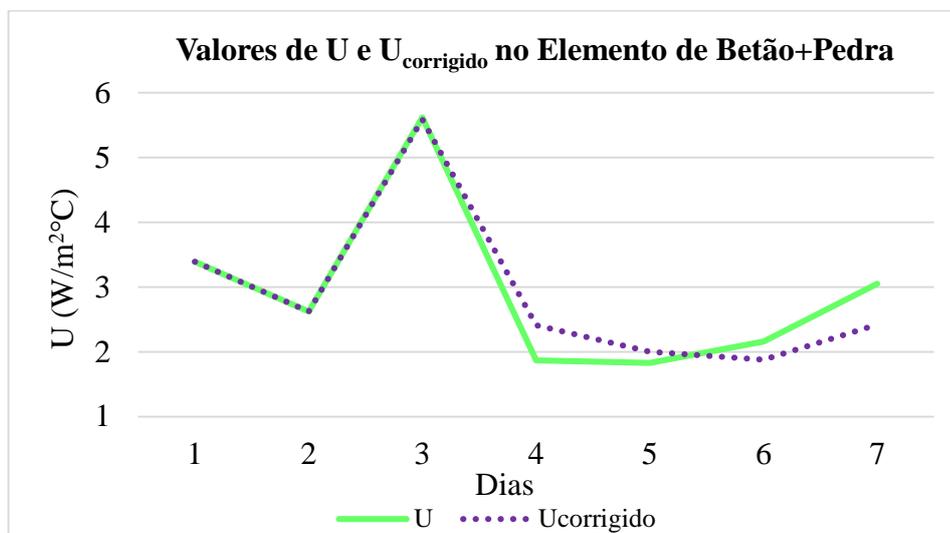


Figura 4.10 – Valores de U obtidos para a solução 1 sem aquecimento

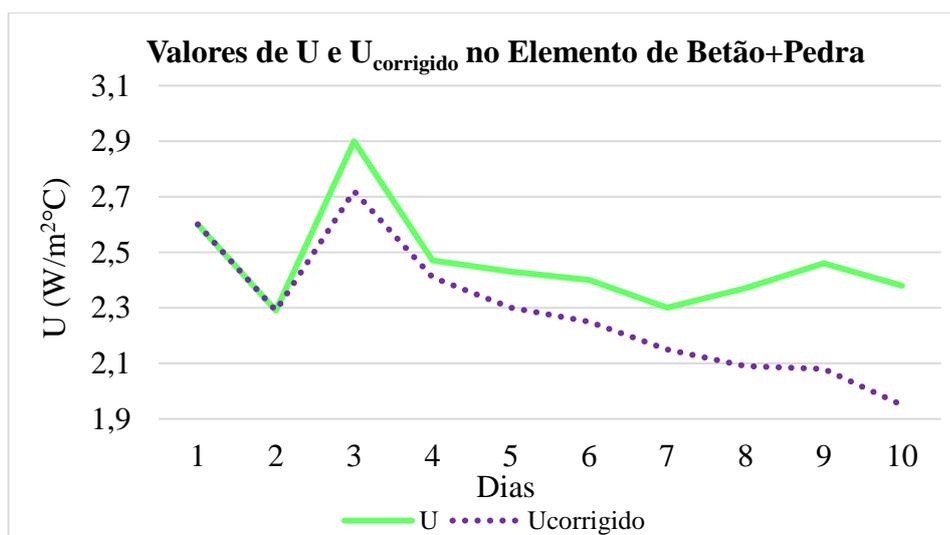


Figura 4.11 – Valores de U obtidos para a solução 1 com aquecimento

Durante o primeiro ensaio, o valor do coeficiente de transmissão térmica U possui grandes variações, chegando mesmo a atingir uma amplitude de $4 \text{ W/m}^2\text{°C}$. No entanto, a partir do 4º dia os valores tornam-se um pouco menos variáveis. É importante referir que estes valores exprimem a necessidade de impor um gradiente térmico suficiente e estável, capaz de estabilizar os valores de U, tornando a análise representativa do real comportamento da parede. Desta forma, o valor de U variou entre $3,05 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $1,83 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e o valor de $U_{\text{corrigido}}$ variou entre $2,42 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $1,88 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

No segundo período do ensaio, notou-se um período de maior estabilização dos resultados, principalmente a partir do 4º dia. A partir deste dia, o valor de U varia entre $2,47 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $2,30 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Já o valor de $U_{\text{corrigido}}$ varia entre $2,41 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $1,95 \text{ W/m}^2\text{°C}$. No Quadro 4.4 apresentam-se os valores de U , $U_{\text{corrigido}}$ e U_{projeto} calculados tal como a variação obtida entre esses valores.

Quadro 4.4 – Variação entre os valores de U medidos, corrigidos e de projeto para a solução 1

Análise	U ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	$U_{\text{corrigido}}$ ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	U_{projeto} ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	Desvio (%) U/U_{projeto}	Desvio (%) $U_{\text{corrigido}}/U_{\text{projeto}}$
Sem aquecimento (dia 4 a dia 7)	2,23	2,18	3,14	-29%	-31%
Com aquecimento (dia 4 a dia 10)	2,40	2,18	3,14	-24%	-31%

Pode observar-se pelos resultados obtidos que o valor de U converge para um valor compreendido entre $2,18 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $2,40 \text{ W/m}^2\text{°C}$, para a análise feita com recurso a aquecimento do espaço. Estes valores são cerca de 30% inferiores ao valor de projeto. Tendo em consideração, tal como foi referido no capítulo anterior, a correção devido a erros operacionais e/ou a erros de projeto, de execução e de envelhecimento dos materiais, obtêm-se valores de U próximos de $3,14 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Estes valores obtidos podem também traduzir uma majoração por parte dos valores convencionais ao real comportamento da parede, indicando que a solução construtiva existente tem melhor comportamento térmico do que a solução considerada.

Refazendo o cálculo de U_{projeto} com uma condutibilidade térmica de $1,65 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para o betão (valor utilizado com alguma frequência), obtém-se um valor de $2,90 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Para o período de análise com aquecimento, obtém-se um desvio de -17% do valor de U em relação ao valor de U_{projeto} e um desvio de -25% do valor de $U_{\text{corrigido}}$ em relação ao valor de projeto.

4.1.4 Resultados obtidos na faixa constituída por uma parede de betão revestida com o sistema ETICs

Este elemento construtivo com 29 centímetros de espessura, denominado de solução 2, é constituído por uma parede de betão revestida pelo exterior com o sistema ETICs. O isolamento existente pelo exterior é um poliestireno expandido. A Figura 4.12 mostra um corte do elemento construtivo.

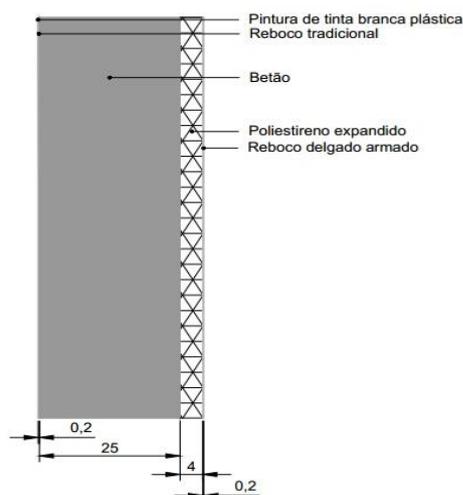


Figura 4.12 – Corte do pormenor construtivo da solução 2

A Figura 4.13 mostra em pormenor a localização do termofluxímetro e dos sensores de temperatura superficial e ambiente no interior, tal como a localização dos sensores de temperatura superficial e ambiente no exterior.



Figura 4.13 – Termofluxímetro e sensores de temperatura na solução 2

São de seguida apresentados nos gráficos das Figuras 4.14 e 4.15 os resultados das temperaturas superficiais medidas, das temperaturas ambientes e também os fluxos de calor registados.

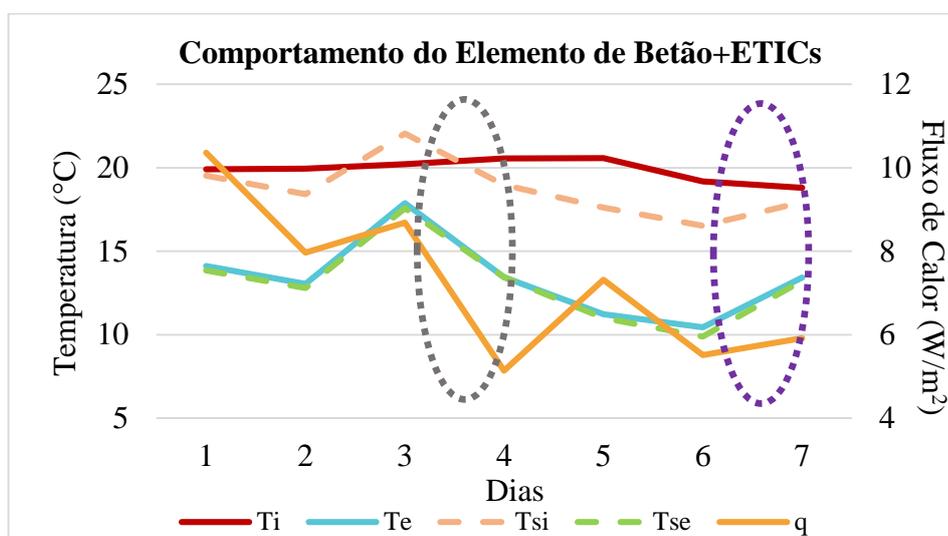


Figura 4.14 - Temperaturas e fluxo da solução 2 sem aquecimento

De acordo com os dados do primeiro gráfico, as temperaturas médias do ambiente exterior são inferiores às do ambiente interior cerca de 6 °C, não proporcionando a transferência de calor na parede do interior para o exterior de forma contínua. Para além disso, as temperaturas ambientes exteriores mantêm-se muito inconstantes ao longo destes primeiros 7 dias de ensaio.

A temperatura superficial exterior manteve-se sempre inferior á temperatura ambiente exterior, resultado da presença do isolamento térmico, pois o calor conduzido pela parede fica armazenado nas camadas interiores a este. A temperatura superficial interior manteve-se inferior à temperatura ambiente interior, expeto no dia 3. Neste dia, as temperaturas ambientes encontravam-se muito próximas, pelo que poderá ter existido um erro de leitura, pois nunca houve inversão no sentido do fluxo. Relativamente aos fluxos de calor, situaram-se no intervalo de 5,1 W/m² a 10,4 W/m², podendo constatar que nunca ocorreu uma inversão no sentido do fluxo, mantendo-se sempre do interior para o exterior. É também visível o efeito do armazenamento térmico, num primeiro caso em que a diferença entre a temperatura interior e a exterior aumenta e o fluxo diminui (assinalado com o círculo cinzento na Figura 4.14), e num segundo caso onde as temperaturas interior e exterior se aproximam e o fluxo aumenta (assinalado com o círculo roxo na Figura 4.14).

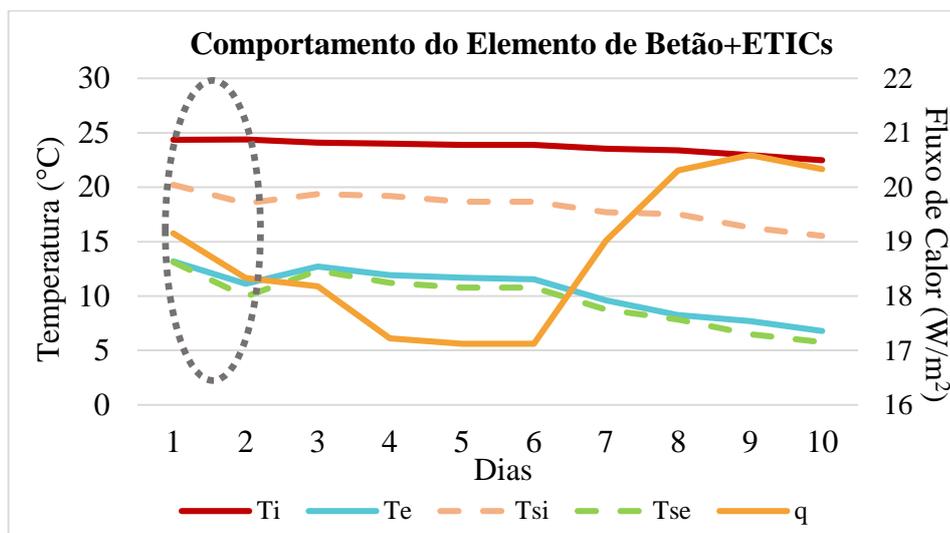


Figura 4.15 - Temperaturas e fluxo da solução 2 com aquecimento

No segundo gráfico, com as temperaturas já praticamente constantes, as temperaturas médias do ambiente exterior são muito inferiores às do ambiente interior, cerca de 13 °C. A temperatura superficial interior manteve-se sempre inferior à temperatura ambiente interior, devido à resistência térmica superficial que é exercida pela parede. A temperatura superficial exterior voltou a ser sempre inferior à temperatura ambiente exterior, mais uma vez devido à presença do isolamento pelo exterior. Os fluxos de calor variaram entre 17,1 W/m² e 20,6 W/m², ou seja, é evidente a alteração do fluxo que em termos médios, aumenta para o dobro. Mais uma vez, não houve inversão no sentido do fluxo de calor. É novamente visível o efeito do armazenamento térmico, quando a diferença entre a temperatura interior e a exterior aumenta e o fluxo diminui (assinalado com o círculo cinzento na Figura 4.15).

Devido à sua espessura e ao seu peso, a solução construtiva em análise apresenta um elevado potencial de armazenamento de calor ao longo das diferentes camadas. No Quadro 4.5 indicam-se os valores da resistência térmica, da densidade e do calor específico de cada camada.

Quadro 4.5 - Características das camadas da solução 2

Materiais e descrição	e (m)	R (m ² °C/W)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kg.°C)
Rsi	-	0,13	-	-
Reboco tradicional	0,002	0,002	1900	1046
Parede de betão	0,25	0,13	2350	840
Poliestireno expandido	0,04	1	17,5	1200

Reboco delgado armado	0,002	0,002	1250	1046
Rse	-	0,04	-	-
Total	0,29	1,29	-	-

Para efeitos de cálculo, é necessário determinar alguns parâmetros como a capacidade térmica dos diferentes materiais que constituem as camadas e as respetivas resistências térmicas. Ficam assim reunidas as condições para o cálculo dos fatores de massa térmica, com os valores indicados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Cálculo dos fatores de massa térmica da solução 2

Materiais e descrição	Ck (J/m ² .°C)	Rik (m ² °C/W)	Rek (m ² °C/W)	Fik (J/m ² °C)	Fek (J/m ² °C)
Rsi	-	0	1,17	-	-
Reboco tradicional	3974,8	0,13	1,17	3214,3	361,2
Parede de betão	493500	0,13	1,04	357370,3	72166,7
Poliestireno expandido	840	0,26	0,04	187,7	196,6
Reboco delgado armado	2615	1,26	0,04	2,6	80,3
Rse	-	1,26	0	-	-
Total	500929,8	-	-	360774,9	72804,7

A partir desta determinação, pode ser determinado o fluxo corrigido para cada um dos dias de ensaio, ficando assim concluído este cálculo. O valor de $U_{projeto}$ é apresentado no Quadro 4.7, tendo-se obtido um valor de 0,77 W/m²°C.

Quadro 4.7 – Cálculo de $U_{projeto}$ da solução 2

Camada	Materiais e descrição	e (m)	λ (W/m°°C)	R (m ² °C/W)	U (W/m ² °C)
-	Rsi	-	-	0,13	0,77
1	Reboco tradicional	0,002	1,3	0,002	
2	Parede de betão	0,25	2	0,13	
3	Poliestireno expandido	0,04	0,04	1	
4	Reboco delgado armado	0,002	1,3	0,002	
-	Rse	-	-	0,04	
Total				1,29	

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram os valores de U e de $U_{\text{corrigido}}$ obtidos ao longo dos ensaios com e sem aquecimento.

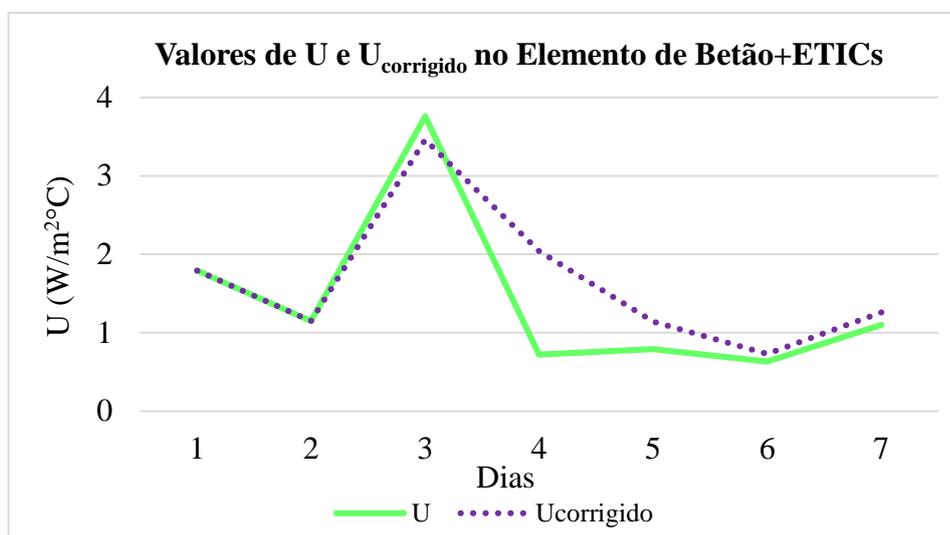


Figura 4.16 - Valores de U obtidos para a solução 2 sem aquecimento

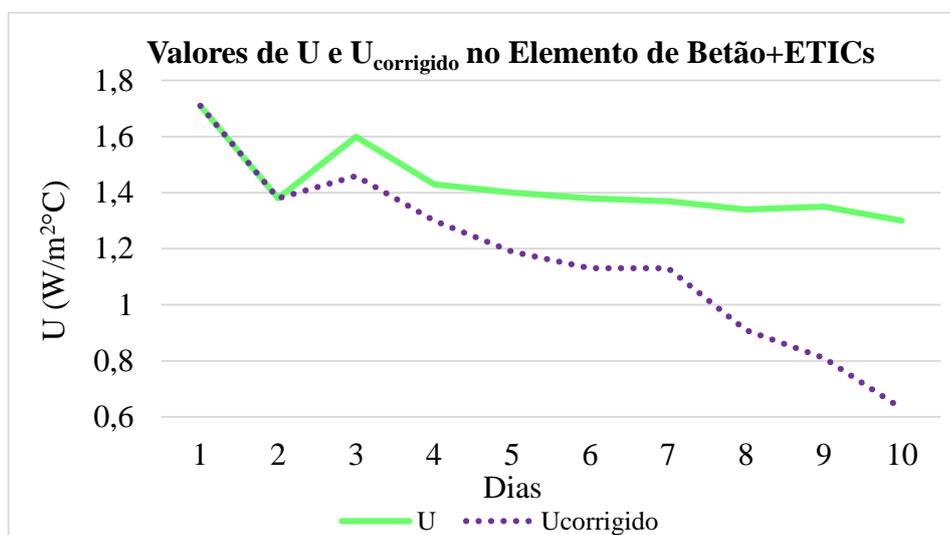


Figura 4.17 - Valores de U obtidos para a solução 2 com aquecimento

Durante o primeiro ensaio, o valor do coeficiente de transmissão térmica U possui grandes variações, chegando mesmo a atingir uma amplitude de $3 \text{ W/m}^2\text{C}$. No entanto, a partir do 4º dia os valores tornam-se um pouco menos variáveis. Desta forma, o valor de U variou entre $1,10 \text{ W/m}^2\text{C}$ e $0,63 \text{ W/m}^2\text{C}$ e o valor de $U_{\text{corrigido}}$ variou entre $2,04 \text{ W/m}^2\text{C}$ e $0,73 \text{ W/m}^2\text{C}$.

No segundo período do ensaio, notou-se um período de maior estabilização dos resultados, principalmente a partir do 4º dia. A partir deste dia, o valor de U varia entre $1,43 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $1,30 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Já o valor de $U_{\text{corrigido}}$ varia entre $1,30 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $0,63 \text{ W/m}^2\text{°C}$. O Quadro 4.8 apresentam-se os valores de U , $U_{\text{corrigido}}$ e U_{projeto} calculados tal como a variação obtida entre esses valores.

Quadro 4.8 - Variação entre os valores de U medidos, corrigidos e de projeto para a solução 2

Análise	U ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	$U_{\text{corrigido}}$ ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	U_{projeto} ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	Desvio (%) U/U_{projeto}	Desvio (%) $U_{\text{corrigido}}/U_{\text{projeto}}$
Sem aquecimento (dia 4 a dia 7)	0,81	1,29	0,77	5%	68%
Com aquecimento (dia 4 a dia 10)	1,35	0,92	0,77	75%	20%

Pode observar-se pelos resultados obtidos que o valor de U converge para um valor compreendido entre $0,92 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $1,35 \text{ W/m}^2\text{°C}$, para a análise feita com recurso a aquecimento do espaço. O valor de U medido ultrapassa em cerca de 75% o valor de projeto, pelo que não pode ser considerado válido. Isso pode ocorrer devido a uma elevada degradação/humidade do isolamento presente nesta solução, o poliestireno expandido.

Apesar disso, o valor corrigido é 20% superior ao valor de projeto. Tendo em consideração a correção devido a erros operacionais e/ou a erros de projeto, de execução e de envelhecimento dos materiais, obtém-se um valor de U próximo de $0,77 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Refazendo os cálculos com uma condutibilidade térmica de $1,65 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para o betão, obtém-se um valor de $0,75 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para o U_{projeto} e um desvio de 80% do valor de U em relação ao valor de U_{projeto} e um desvio de 21% do valor de $U_{\text{corrigido}}$ em relação ao valor de projeto, para o período com aquecimento.

4.2 Caso de estudo 2

O segundo caso de estudo está localizado numa moradia em Sepins, no concelho da Mealhada. As paredes exteriores são duplas de tijolo furado 15+11, com a aplicação de um granulado de cortiça, que preenche totalmente a caixa-de-ar. A estrutura da habitação é em betão armado.

4.2.1 Fachada a analisar

Os elementos construtivos analisados fazem parte de uma parede exterior, de modo a obter na mesma fachada duas soluções construtivas distintas: uma zona da parede dupla em tijolo com o isolamento na caixa-de-ar, e outra zona em betão correspondente a um pilar. Uma vez que o pilar tem uma largura considerável, não existem fluxos de calor laterais significativos.

A zona da parede dupla em tijolo está localizada a norte, mas a zona da ponte térmica plana (pilar) encontra-se no quadrante nordeste, uma vez que a fachada em análise é curva.

4.2.2 Descrição do ensaio

O ensaio teve início dia 21 de dezembro de 2014 pelas 18h30m, no período de inverno, tendo-se registado no momento em que se iniciou o ensaio uma temperatura interior de 21,6°C e uma temperatura exterior de 10,3°C. Foi usado um ar condicionado para manter a temperatura relativamente constante, por volta dos 20°C. Teve a duração de 7 dias e um total de 168 horas e 2023 dados registados, tendo terminado no dia 28 de dezembro pelas 17h03m, com uma temperatura interior de 21,3°C e uma temperatura exterior de 11,8°C.

Foram ainda efetuados registos de termografia das diferentes soluções da parede em estudo, para verificar a homogeneidade da superfície e as diversas distribuições da temperatura, registadas nas Figuras 4.18 e 4.19. Os termogramas foram recolhidos durante a tarde e não se verificaram quaisquer tipos de anomalias superficiais.

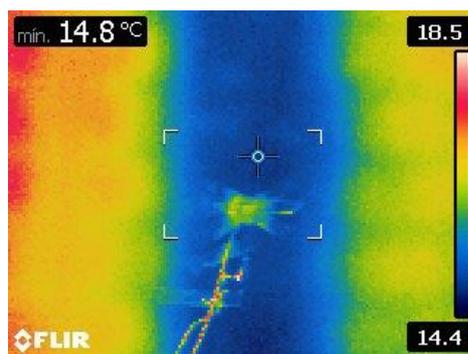


Figura 4.18 – Termograma interior da zona do pilar

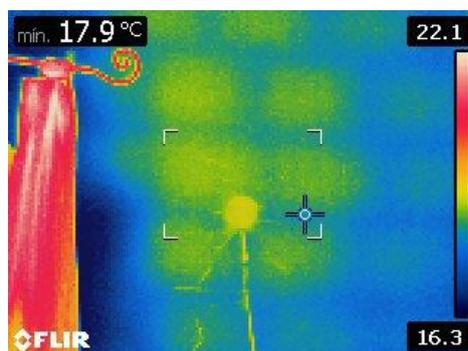


Figura 4.19 – Termograma interior da zona da parede de alvenaria dupla

Tal como seria de prever, o elemento de alvenaria dupla com isolamento na caixa-de-ar é o que apresenta temperaturas superficiais interiores mais elevadas. Isto deve-se tanto à presença de isolamento, como a uma condutibilidade térmica mais reduzida quando comparada com a do betão. Já o elemento de betão indica temperaturas superficiais interiores mais reduzidas, em virtude da inexistência de qualquer tipo de isolamento, provocando assim uma maior dissipação de calor através do elemento.

Após a colocação dos equipamentos na fachada, verificou-se através das imagens termográficas que o fluxímetro na parede ficou colado na zona da junta de argamassa, podendo ter influência nos resultados obtidos.

4.2.3 Resultados obtidos no pilar

Como referido anteriormente, esta zona da fachada com 34 centímetros de espessura é constituída por um pilar de betão armado, sem a aplicação de qualquer isolamento térmico. A Figura 4.20 mostra um corte do elemento construtivo:

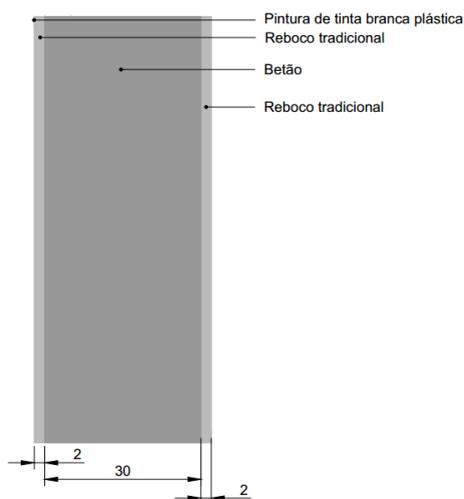


Figura 4.20 – Corte do pormenor construtivo no pilar

A Figura 4.21 mostra em pormenor a localização do termofluxímetro e do sensor de temperatura superficial no interior.



Figura 4.21 – Termofluxímetro e sensor de temperatura no pilar

Neste caso de estudo, os valores utilizados nos cálculos constituem médias diárias de leituras realizadas de 5 em 5 minutos, para cada um dos parâmetros referidos. Os resultados obtidos para as temperaturas superficiais medidas, tal como para as temperaturas ambientes e os fluxos de calor registados, estão representados no gráfico da Figura 4.22.

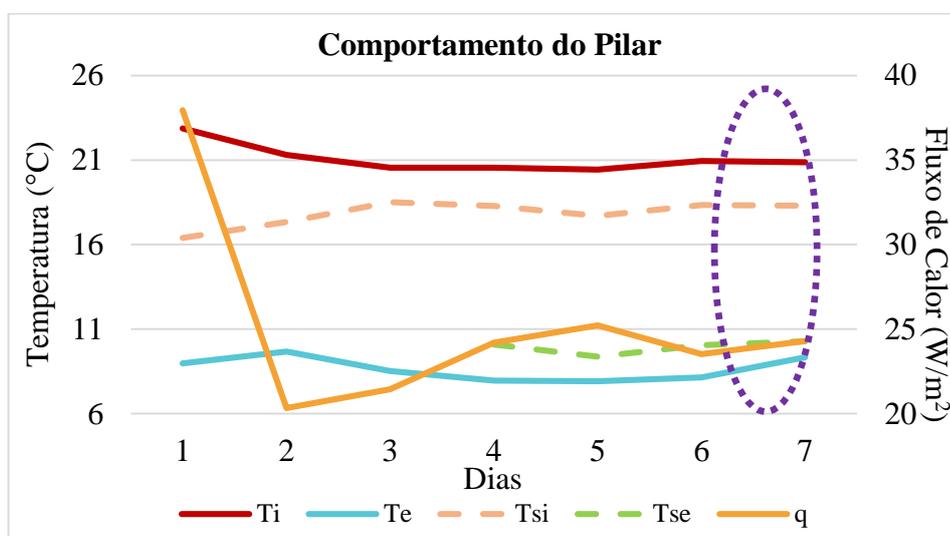


Figura 4.22 - Temperaturas e fluxo do pilar

Verifica-se que as temperaturas ao longo dos 7 dias de ensaio se mantiveram praticamente constantes e que as temperaturas médias do ambiente exterior são muito inferiores às do ambiente interior, cerca de 13 °C. A temperatura superficial interior manteve-se sempre inferior à temperatura ambiente interior, devido à resistência térmica superficial que é exercida pela parede. Só foi possível utilizar os dados relativos à temperatura superficial exterior do pilar a partir do 5º dia de ensaio, pois foi necessário proceder-se à troca desse sensor. No entanto, a partir desse dia esta temperatura manteve-se sempre superior à temperatura ambiente exterior, mais uma vez devido à transferência de calor realizada do interior para o exterior. Os fluxos de calor variaram entre 20,3 W/m² e 37,9 W/m². É também visível o efeito do armazenamento térmico, quando as temperaturas interiores e exteriores se aproximam e o fluxo aumenta (assinalado com o círculo roxo na Figura 4.22).

Devido à sua espessura e ao seu peso, o pilar em análise apresenta um elevado potencial de armazenamento de calor ao longo das diferentes camadas. No Quadro 4.9 indicam-se os valores da resistência térmica, da densidade e do calor específico de cada camada.

Quadro 4.9 – Características das camadas do pilar

Materiais e descrição	e (m)	Rk (m ² °C/W)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kg.°C)
Rsi	-	0,13	-	-
Reboco tradicional	0,02	0,02	1900	1046

Parede de betão	0,30	0,15	2350	840
Reboco tradicional	0,02	0,02	1900	1046
Rse	-	0,04	-	-
Total	0,34	0,35	-	-

Para efeitos de cálculo, é necessário determinar alguns parâmetros como a capacidade térmica dos diferentes materiais que constituem as camadas e as respetivas resistências térmicas. Ficam assim reunidas as condições para o cálculo dos fatores de massa térmica, com os valores indicados no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 – Cálculo dos fatores de massa térmica do pilar

Materiais e descrição	Ck (J/m ² .°C)	Rik (m ² °C/W)	Rek (m ² °C/W)	Fik (J/m ² °C)	Fek (J/m ² °C)
Rsi	-	0	0,22	-	-
Reboco tradicional	39748	0,13	0,21	14673,5	8984,4
Parede de betão	592200	0,15	0,06	90848,1	86907,5
Reboco tradicional	39748	0,29	0,04	741,2	4175,9
Rse	-	0,31	0	-	-
Total	671696	-	-	106262,8	100067,8

A partir desta determinação, pode ser determinado o fluxo corrigido para cada um dos dias de ensaio, ficando assim concluído este cálculo. O valor de $U_{projeto}$ é apresentado no Quadro 4.11, tendo-se obtido um valor de 2,85 W/m²°C.

Quadro 4.11 – Cálculo de $U_{projeto}$ do pilar

Camada	Materiais e descrição	e (m)	λ (W/m°C)	R (m ² °C/W)	U (W/m ² °C)
-	Rsi	-	-	0,13	2,85
1	Reboco tradicional	0,02	1,3	0,02	
2	Parede de betão	0,30	2	0,15	
3	Reboco tradicional	0,02	1,3	0,02	
-	Rse	-	-	0,04	
Total				0,35	

A Figura 4.23 mostra os valores de U e de $U_{corrigido}$ obtidos ao longo do ensaio.

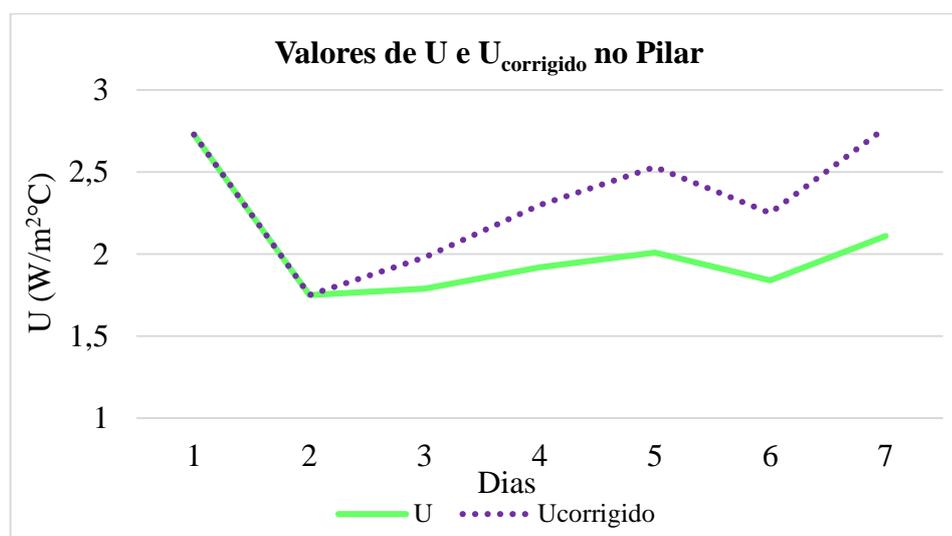


Figura 4.23 – Valores de U obtidos para o pilar

É possível observar que o valor do coeficiente de transmissão térmica U atinge no máximo uma amplitude de $1 \text{ W/m}^2\text{°C}$, sendo também notável que a partir do 3º dia os valores tornam-se um pouco menos variáveis. A partir deste dia, o valor de U varia entre $2,11 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $1,79 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Já o valor de $U_{\text{corrigido}}$ varia entre $2,77 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $1,98 \text{ W/m}^2\text{°C}$. No Quadro 4.12 apresentam-se os valores de U, $U_{\text{corrigido}}$ e U_{projeto} calculados tal como a variação obtida entre esses valores.

Quadro 4.12 – Variação entre o valor de U medido, corrigido e de projeto do pilar

Análise	U (W/m ² °C)	U _{corrigido} (W/m ² °C)	U _{projeto} (W/m ² °C)	Desvio (%) U/U _{projeto}	Desvio (%) U _{corrigido} / U _{projeto}
Com aquecimento (dia 3 a dia 7)	1,93	2,37	2,85	-32%	-17%

Pode observar-se pelos resultados obtidos que o valor de U converge para um valor compreendido entre $2,37 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $1,93 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Estes valores são cerca de 30% inferiores ao valor de projeto. Tendo em consideração a correção devido a erros operacionais e/ou a erros de projeto, de execução e de envelhecimento dos materiais, obtêm-se valores de U próximos de $2,85 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Mais uma vez, os valores obtidos traduzem uma majoração por parte dos valores convencionais ao real comportamento da parede, indicando que a solução construtiva existente tem melhor comportamento térmico do que a solução considerada.

Refazendo os cálculos com uma condutibilidade térmica de $1,65 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ para o betão, obtém-se um valor de $2,61 \text{ W/m}^2\text{C}$ para o U_{projeto} e um desvio de -26% do valor de U em relação ao valor de U_{projeto} e um desvio de -8% do valor de $U_{\text{corrigido}}$ em relação ao valor de projeto.

4.2.4 Resultados obtidos na parede

Esta zona da fachada também com 34 centímetros de espessura é constituída por uma parede dupla de alvenaria de tijolo 15+11, com a aplicação de granulado de cortiça na caixa-de-ar. A Figura 4.24 mostra um corte do elemento construtivo.

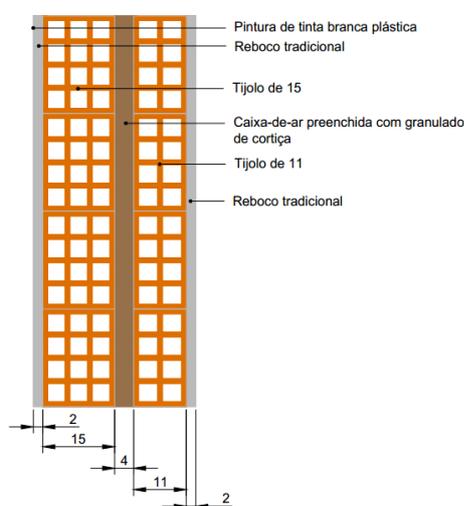


Figura 4.24 – Corte do pormenor construtivo na parede

A Figura 4.25 mostra em pormenor a localização do termofluxímetro e do sensor de temperatura superficial no interior.

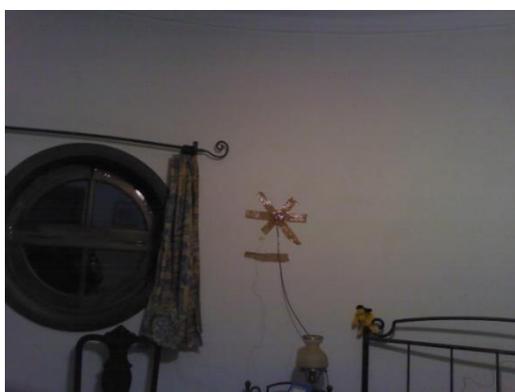


Figura 4.25 – Termofluxímetro e sensor de temperatura na parede

Os resultados obtidos para as temperaturas superficiais medidas, tal como para as temperaturas ambientes e os fluxos de calor registados, estão representados no gráfico da Figura 4.26.

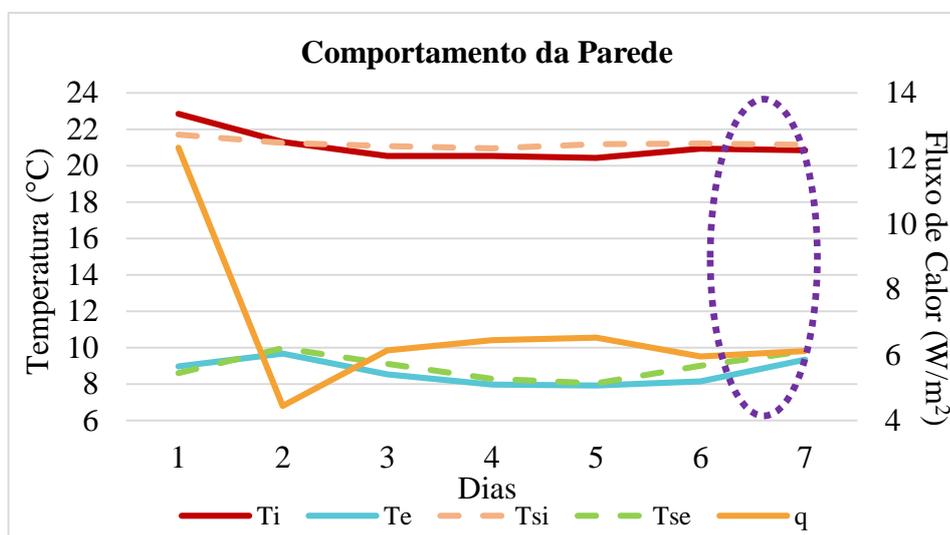


Figura 4.26 – Temperaturas e fluxo da parede

Verifica-se novamente que as temperaturas ao longo dos 7 dias de ensaio se mantiveram praticamente constantes e que as temperaturas médias do ambiente exterior são muito inferiores às do ambiente interior, cerca de 12 °C. A temperatura superficial exterior manteve-se quase sempre superior à temperatura ambiente exterior, mais uma vez devido ao sentido do fluxo, ou seja, do interior para o exterior. A temperatura superficial interior foi quase sempre superior à temperatura ambiente interior, uma vez que se verificaram inversões no sentido do fluxo de calor em determinados momentos, a partir do 2º dia de ensaio. Os fluxos de calor variaram entre 4,4 W/m² e 12,3 W/m². É também visível o efeito do armazenamento térmico, quando as temperaturas interiores e exteriores se aproximam e o fluxo aumenta (assinalado com o círculo roxo na Figura 4.26).

Devido á sua espessura e ao seu peso, a parede em análise apresenta um elevado potencial de armazenamento de calor ao longo das diferentes camadas. No Quadro 4.13 indicam-se os valores da resistência térmica, da densidade e do calor específico de cada camada.

Quadro 4.13 – Características das camadas da parede

Materiais e descrição	e (m)	R (m ² °C/W)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kg.°C)
Rsi	-	0,13	-	-

Reboco tradicional	0,02	0,02	1900	1046
Parede de tijolo	0,15	0,39	1200	840
Caixa-de-ar preenchida com granulado de cortiça	0,04	0,80	125	1800
Parede de tijolo	0,11	0,27	1200	840
Reboco tradicional	0,02	0,02	1900	1046
Rse	-	0,04	-	-
Total	0,34	1,66	-	-

Para efeitos de cálculo, é necessário determinar alguns parâmetros como a capacidade térmica dos diferentes materiais que constituem as camadas e as respetivas resistências térmicas. Ficam assim reunidas as condições para o cálculo dos fatores de massa térmica, com os valores indicados no Quadro 4.14.

Quadro 4.14 – Cálculo dos fatores de massa térmica da parede

Materiais e descrição	Ck (J/m ² .°C)	Rik (m ² °C/W)	Rek (m ² °C/W)	Fik (J/m ² °C)	Fek (J/m ² °C)
Rsi	-	0	1,53	-	-
Reboco tradicional	39748	0,13	1,52	33430,6	3235,7
Parede de tijolo	151200	0,15	1,13	96267,6	39865,2
Caixa-de-ar preenchida com granulado de cortiça	9000	0,54	0,33	1890,9	3356,9
Parede de tijolo	110880	1,34	0,06	1701,4	19856,4
Reboco tradicional	39748	1,61	0,04	33,1	1322,2
Rse	-	1,62	0	-	-
Total	350576	-	-	133323,6	67636,3

A partir desta determinação, pode ser determinado o fluxo corrigido para cada um dos dias de ensaio, ficando assim concluído este cálculo. O valor de $U_{projeto}$ é apresentado no Quadro 4.15, tendo-se obtido um valor de 0,60 W/m²°C.

Quadro 4.15 – Cálculo de $U_{projeto}$ da parede

Camada	Materiais e descrição	e (m)	λ (W/m°C)	R (m ² °C/W)	U (W/m ² °C)
-	Rsi	-	-	0,13	0,60
1	Reboco tradicional	0,02	1,3	0,02	
2	Parede de tijolo	0,15	-	0,39	
3	Caixa-de-ar preenchida com granulado de cortiça	0,04	0,05	0,80	
4	Parede de tijolo	0,11	-	0,27	
5	Reboco tradicional	0,02	1,3	0,02	
-	Rse	-	-	0,04	
Total				1,66	

A Figura 4.27 mostra os valores de U e de $U_{corrigido}$ obtidos ao longo do ensaio.

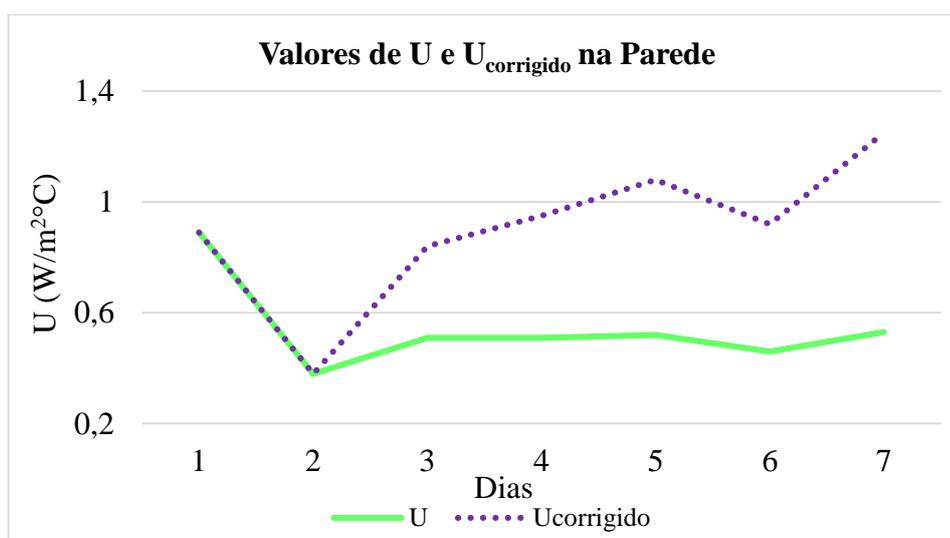


Figura 4.27 - Valores de U obtidos para a parede

É possível observar que o valor do coeficiente de transmissão térmica U atinge no máximo uma amplitude de 0,5 W/m²°C, sendo novamente notável que a partir do 3º dia os valores tornam-se mais constantes. A partir deste dia, o valor de U varia entre 0,53 W/m²°C e 0,46 W/m²°C. Já o valor de $U_{corrigido}$ varia entre 1,25 W/m²°C e 0,84 W/m²°C. No Quadro 4.16 apresentam-se os valores de U, $U_{corrigido}$ e $U_{projeto}$ calculados tal como a variação obtida entre esses valores.

Quadro 4.16 – Variação entre o valor de U medido, corrigido e de projeto da parede

Análise	U (W/m ² °C)	U _{corrigido} (W/m ² °C)	U _{projeto} (W/m ² °C)	Desvio (%) U/U _{projeto}	Desvio (%) U _{corrigido} / U _{projeto}
Com aquecimento (dia 3 a dia 7)	0,51	0,95	0,60	-16%	58%

Pode observar-se pelos resultados obtidos que o valor de U converge para um valor compreendido entre 0,51 W/m²°C e 0,95 W/m²°C. O valor de U_{corrigido} ultrapassa em cerca de 58% o valor de projeto, pelo que não pode ser considerado válido. Isso pode ocorrer devido a uma majoração da capacidade dos diferentes materiais constituintes da parede armazenarem o calor. Dessa forma, o efeito do armazenamento térmico estaria também majorado, resultando em valores corrigidos superiores aos reais.

Apesar disso, o valor de U medido é 16% inferior ao valor de projeto. Tendo em consideração a correção devido a erros operacionais e/ou a erros de projeto, de execução e de envelhecimento dos materiais, obtém-se um valor de U próximo de 0,60 W/m²°C.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

No presente trabalho pretendeu-se avaliar o desempenho térmico de diversas soluções construtivas *in situ* e comparar os resultados obtidos com os valores calculados através do procedimento habitual em projeto. Deste modo, foram determinados experimentalmente os valores do coeficiente de transmissão térmica em paredes exteriores de edifícios. Nessa medição foi aplicado o método da medição do fluxo de calor, baseado na norma ISO 9869, complementado com o uso da termografia, e posterior tratamento de dados usando o método médio e tendo em conta o efeito do armazenamento térmico.

Um aspeto que se revelou importante e a ter em conta nos ensaios esteve relacionado com o período do ano em que se realiza o ensaio, uma vez que deve ser mantido um diferencial de temperatura significativo entre o interior e o exterior do edifício. Em dias típicos de primavera e outono também é possível utilizar este método, mas implica um aquecimento no interior muito elevado para garantir uma diferença de temperatura também elevada. No início do 1º caso de estudo isso revelou-se um problema, pois as temperaturas ambientes exteriores apresentaram-se mais elevadas do que o suposto para a época do ano, existindo também oscilações acentuadas das temperaturas. Nesses períodos em que as temperaturas interiores se encontram próximas das temperaturas exteriores e quando existem oscilações das temperaturas, o efeito do armazenamento térmico torna-se mais claro e traduz-se em perturbações nos valores dos coeficientes de transmissão térmica.

Para outro lado, a temperatura interior deve ser mantida o mais estável possível. Concluiu-se que o uso de um sistema de aquecimento no interior do compartimento a analisar é conveniente, traduzindo-se em resultados mais fiáveis, pois garante as condições de ensaio referidas anteriormente.

Conclui-se também que a utilização dos compartimentos não inviabiliza a realização dos ensaios. No entanto, é necessário alertar os utilizadores para a necessidade de não realizar atividades que alterem as condições climáticas no seu interior, como a abertura de janelas que ocorreu no início do 1º caso de estudo.

Verificou-se que o método constitui um processo algo moroso, chegando a atingir os 14 dias de duração em trabalhos anteriormente realizados. Apesar disso, neste trabalho concluiu-se que é possível observar uma estabilização por parte dos valores de U por volta dos 4 dias de ensaio.

Relativamente ao efeito do armazenamento térmico, a norma refere que nenhuma correção é aplicada aos dados durante as primeiras 24 horas de medições. Contudo, isso só faz sentido quando as condições de temperatura são alteradas a partir do momento em que se inicia o ensaio. Se nos dias anteriores, tanto a temperatura ambiente interior como a temperatura ambiente exterior forem semelhantes às verificadas no começo das medições *in situ*, o efeito da inércia térmica estará sempre presente na parede em análise, pelo que a correção referida na norma deveria ser aplicada desde o primeiro dia de medições.

Nos ensaios realizados, verifica-se que para soluções construtivas constituídas por paredes de betão sem a presença de qualquer isolamento os valores dos coeficientes de transmissão térmica calculados convergem para os valores de projeto, com desvios obtidos da ordem dos 20% a 30%, como era esperado. No 2º caso de estudo, o desvio do valor de U pode ser justificado pela ocorrência de alguma influência da radiação solar sobre a sonda de temperatura exterior. Em ambos os casos, os valores obtidos foram inferiores aos valores de projeto, uma vez que os valores típicos apontados no ITE 50 são valores tendencialmente conservadores e podem justificar esta tendência.

Para soluções construtivas constituídas por paredes duplas de alvenaria de tijolo com caixa-de-ar preenchida com isolante e por paredes de betão com isolamento pelo exterior, os valores dos coeficientes de transmissão térmica calculados apresentam alguma divergência em relação aos valores de projeto. No 1º caso de estudo, o valor de U medido apresenta um desvio de 75% e no 2º caso de estudo, o valor de $U_{\text{corrigido}}$ apresenta um desvio de 58%. Nestes casos de zonas correntes com isolamento térmico, os valores considerados no ITE 50 também são conservadores mas como estão a ser avaliadas soluções em edifícios já com alguma idade, poderá existir alguma degradação do isolamento térmico e eventualmente um grau de humidade elevado que justifique as diferenças verificadas.

Desta forma, o método proposto e analisado pode ser usado na avaliação energética de edifícios.

5.2 Trabalhos Futuros

Na perspetiva de dar continuidade ao presente trabalho e com as ferramentas que aqui foram apresentadas, seria matéria de análise a determinação *in situ* do coeficiente de transmissão

térmica em soluções construtivas diferentes, bem como em elementos construtivos diferentes como pavimentos ou coberturas.

Pode também ser interessante realizar a medição em estações do ano em que não se verifiquem diferenças entre as temperaturas interiores e exteriores tão acentuadas, como o caso da primavera ou do verão. Esse estudo iria permitir verificar se o método apresentado neste trabalho continuaria a ser válido nessas estações.

Uma vez que se verificou que o efeito de armazenamento térmico pode traduzir uma incerteza nos dados obtidos, seria útil estudar esse efeito através de parâmetros de correção, contribuindo assim de forma positiva para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Moret Rodrigues, A. C. da P. (1998). *Térmica de Edifícios*.

ADENE. (2014a). ADENE - Outros Documentos. Retrieved from <http://www.adene.pt/sce/outros-documentos>

ADENE. (2014b). ADENE - PNAEE 2016. Retrieved from <http://www.adene.pt/programa/pnaee-2016-plano-nacional-de-acao-para-eficiencia-energetica-2016>

Águas, M. P. N. (2000). *Conforto térmico*.

Aipex. (2011). Valores da Condutibilidade Térmica. Retrieved from http://www.aipex.es/faq_po.php?idioma=po&s=9#

Albatici, R., & Tonelli, A. M. (2010). Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy and Buildings*, 42(11), 2177–2183. doi:10.1016/j.enbuild.2010.07.010

Asdrubali, F., D'Alessandro, F., Baldinelli, G., & Bianchi, F. (2014). Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries—A case study. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 53–59. doi:10.1016/j.cscm.2014.04.004

Berke, M. (1990). *Nondestructive Material Testing with Ultrasonics*.

BRE. (2006). *Post-construction testing – a professional's guide to testing housing for energy efficiency - Energy Saving Trust*.

Carlos A. Pina dos Santos, L. M. (2006). *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. Lisboa.

Çengel, Y. A. (2008). *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer* (Second Edi.). The McGraw–Hill Companies.

- Corp., T. (2014). TYPE K THERMOCOUPLE. Retrieved from <http://www.thermometricscorp.com/thertypk.html>
- d'Ambrosio Alfano, F. R., Olesen, B. W., Palella, B. I., & Riccio, G. (2014). Thermal comfort: Design and assessment for energy saving. *Energy and Buildings*, 81, 326–336. doi:10.1016/j.enbuild.2014.06.033
- Desogus, G., Mura, S., & Ricciu, R. (2011). Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy and Buildings*, 43(10), 2613–2620. doi:10.1016/j.enbuild.2011.05.025
- DGEG. (2014). DGEG - ENERGIA EM PORTUGAL Principais Números.
- Doran, S. (2000). *DETR Framework Project Report: Field investigations of the thermal performance of construction elements as built*.
- ECIL, G. (n.d.). Termopar Tipo K. Retrieved February 10, 2014, from <http://www.ecil.com.br/temperatura-industrial/pirometria/termopares/termopar-tipo-k/>
- EDP. (2006). *Eficiência Energética. Guia Prático da Eficiência Energética - EDP*.
- EDP. (2014). EcoEDP - Eficiência Energética. Retrieved from <http://www.eco.edp.pt/pt/particulares/eficiencia-energetica>
- EPBD. (2013). *Implementing the Energy Performance of Buildings Directiva - EPBD*.
- FLIR. (2014). FLIR Ebx-Series Specifications. Retrieved from <http://www.flir.com/cs/emea/en/view/?id=41958>
- FLIR. (2014). Thermal imaging cameras with uncooled microbolometer detector for Science/R&D.
- Gómez-Calvet, R., Conesa, D., Gómez-Calvet, A. R., & Tortosa-Ausina, E. (2014). Energy efficiency in the European Union: What can be learned from the joint application of directional distance functions and slacks-based measures? *Applied Energy*, 132, 137–154. doi:10.1016/j.apenergy.2014.06.053
- gSKIN. (2014). gSKIN® Application Note : U-Value Measurement Case Study.
- Hukseflux. (2000). HFP01 Product brochure.

-
- Incropera, DeWitt, Bergman, L. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. (S. Edition, Ed.).
- ISO. EN ISO 9869: Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance (1994).
- ISO. EN ISO 6946: Building Components and Building Elements - Thermal Resistance and thermal Transmittance - Calculation Method (1996).
- Keefe, D. (2010). Blower Door Testing.
- Lamberts, R. (2005). *Desempenho térmico de edificações*, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil
- Laurenti, L., Marcotullio, F., & de Monte, F. (2004). Determination of the thermal resistance of walls through a dynamic analysis of in-situ data. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(3), 297–306. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2003.08.007
- Prof. Ademar Michels, Aluno Msc. Maruí Samuel F. dos Santos, A. G. A. F. P. (2011). *Transmissão de Calor*. Santa Maria, RS, Brasil.
- República, D. da. (2013). *REH - Despacho n.º 15793-K/2013. D.R. n.º 234, 3.º Suplemento, Série II de 2013-12-03* (p. 2013).
- República, D. da. (2006). *Decreto-Lei 80/2006 – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)*.
- República, D. da. (2013). *REH - Decreto-Lei 118/2013* (pp. 4988–5005).
- Ribeiro, P. (2009). *Avaliação do Comportamento Térmico de Edifícios de Habitação com Recurso a um Termofluxímetro*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Santos, M. (2014). *Uso da Termografia para Caracterizar Qualitativamente Fachadas de Edifícios*. Universidade de Coimbra.
- Sato, M., Liu, H., Koyama, C., Takahashi, K., & Study, F. (2014). Fundamental Study on NDT of Building Wall Structure by Radar.
- Technology, P. (2014). Data Logger / Data Acquisition Products. Retrieved from <http://www.picotech.com/data.html>
-

Valério, J. (2007). *Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e Energético de Edifícios Residenciais Correntes*. Universidade de Lisboa.

Virginia Gori, Phillip Biddulph, Clifford A. Elwell, Cameron Scott, Caroline Rye, Robert Lowe, T. O. (2014). Seasonal factors influencing the estimation of the U-value of a wall. *BSO14*.

Yunus A. Çengel, A. J. G. (2011). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications* (Fourth Edi.).