



Bruno Lopes Gomes

AVALIAÇÃO DAS PONTES TÉRMICAS LINEARES EM EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO — RESULTADOS NUMÉRICOS VERSUS EXPERIMENTAIS

EVALUATION OF LINEAR THERMAL BRIDGES ON RESIDENTIAL
BUILDINGS — NUMERICAL VERSUS EXPERIMENTAL RESULTS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus e pela Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira.

Fevereiro, 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

Bruno Lopes Gomes

Avaliação das pontes térmicas lineares em edifícios de habitação – Resultados Numéricos versus Experimentais

Evaluation of linear thermal bridges on residential buildings – Numerical versus Experimental results

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus e pela Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões
que possam surgir

Coimbra, 07 de Fevereiro de 2017

AGRADECIMENTOS

Após um percurso longo e com alguns sobressaltos, não poderia estar mais contente por ver um fim nesta jornada. Queria agradecer o apoio e incentivo de quem sempre esteve cá para mim e sempre me ajudou, o meu obrigado.

Um grande agradecimento aos meus orientadores, Professor Diogo Manuel Rosa Mateus e Professora Andreia Sofia Carvalho Pereira, pela disponibilidade e orientação e colaboração na realização desta dissertação ao longo destes meses.

À Family que se criou devido a esta cidade, um grupo de amigos magníficos que ficam para a vida, um especial obrigado por me aturarem. A todas as amizades que se proporcionaram um obrigado.

Um especial agradecimento aos meus pais e irmão, que nunca me deixaram ir abaixo e sempre me empurraram para fazer mais e melhor, são os melhores.

Obrigado.

RESUMO

À luz do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), aprovado pelo Decreto-Lei nº 118/2013 de 20 de Agosto, com as últimas alterações impostas pelo Decreto-Lei nº 28/2016 de 23 de Junho, entre outras, as perdas térmicas consideradas na estação de aquecimento, deverão incluir as perdas através de Pontes Térmicas Lineares, que têm geralmente um peso muito significativo no desempenho energético da fração ou edifício. Neste contexto, pretende-se com o presente trabalho investigar e avaliar a influência de pontes térmicas lineares no desempenho térmico dos edifícios de habitação. Para o efeito serão utilizadas diferentes formas de abordagem, nomeadamente através de modelação numérica, ensaios experimentais e valores tabelados.

A avaliação numérica das perdas térmicas lineares é baseada na norma ISO 10211:2007, onde é identificado o modelo geométrico e o método de cálculo usado para determinar os valores dos coeficientes de transmissão térmica linear. Recorrendo-se a um programa de cálculo, THERM, baseado no método dos elementos finitos, faz-se simulação para casos de pontes térmicas lineares.

A avaliação experimental é efetuada utilizando um modelo reduzido de uma hot-box, onde são testadas algumas configurações em T e em cruz, correspondentes a uma ligação fachada com pavimento intermédio e fachada com varanda.

Posteriormente, é feita a comparação de valores por defeito do REH, com os valores obtidos no programa de cálculo (THERM) e valores experimentais.

ABSTRACT

According to the Energy Performance Regulation of Residential Buildings, approved by Decree-Law n° 118/2013 of 20 August, with the latest changes imposed by Decree-Law n° 28/1016 of June, among others, thermal losses considered in the heating season should include losses through Linear thermal bridges, which usually have significant weight in the energy performance of the building or fraction. In this context, it is intended with this work to investigate and evaluate the influence of linear thermal bridges in the thermal performance of residential buildings. For this purpose, will be used different ways of approach, including through numerical modeling, experimental tests and default values.

The numerical evaluation of linear thermal losses is based on ISO 10211:2007, where the geometric model and the calculation method used to determine the reference values of linear thermal transmission coefficient is identified. Using software based on the finite element method (THERM) simulation are made for cases of linear thermal bridges.

The experimental evaluation is carried out using a reduced model of a hot-box, where some T and cross configurations are tested, corresponding to a facade connected with intermediate pavement and balcony facade.

Subsequently comparing default values of REH with the values obtained in the calculation software (THERM) and experimental values.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	viii
ABREVIATURAS	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos do trabalho.....	2
1.3 Estrutura do trabalho	3
2. CONCEITOS GERAIS	4
2.1 Enquadramento.....	4
2.2 Coeficiente de Transmissão Térmica	5
2.3 Pontes Térmicas.....	7
2.4 Legislação.....	9
2.4.1 Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)	9
2.4.1.1 Necessidades Nominais Anuais de Energia Útil para Aquecimento	10
2.4.1.2 Necessidades Nominais anuais de energia útil para arrefecimento.....	13
3. METODOLOGIA DE CÁLCULO	15
3.1 REH	15
3.2 Norma EN ISO 10211	16
3.2.1 Modelo Geométrico.....	17
3.2.2 Método de Cálculo	20
3.2.2.1 Cálculo do Fluxo de Calor	20
3.2.2.2 Cálculo do Coeficiente de Transmissão Térmica Linear.....	22
3.3 Descrição das configurações modeladas	23
Casos de Estudo.....	24
3.3.1.1 Caso 1	24
3.3.1.2 Caso 2	28
3.3.1.3 Caso 3	30
3.3.1.4 Caso 4	32
3.3.1.5 Caso 5	34
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	41
4.1 Equipamentos	41
4.2 Metodologia Experimental	43

4.2.1 Provetes	44
4.2.2 Instalação de equipamentos	44
4.2.3 Levantamento de dados	46
4.2.4 Análise de Resultados.....	47
4.2.5 Precisão dos resultados.....	49
4.3 Casos de Estudo.....	49
4.3.1 XPS e Madeira.....	49
4.3.1.1 XPS.....	49
4.3.1.2 Madeira	51
4.3.1.3 XPS com Madeira	53
4.3.1 Caso 1	55
4.3.2 Caso 2	58
4.3.3 Caso 3	60
4.3.4 Caso 4	62
4.3.5 Caso 5	64
5. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	67
6. CONCLUSÕES.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos de transmissão de calor (Simões, 2015).....	5
Figura 2.2 – Parâmetros de caracterização térmica (Simões, 2015).....	5
Figura 2.3 – Transferência de calor unidirecional – regime permanente (Simões, 2015).....	6
Figura 2.4 – Ponte térmica devido à transição entre diferentes materiais e alteração de espessura (Valério, 2007)	8
Figura 2.5 – Fluxos bidirecionais de calor (Castro, 2010)	8
Figura 3.1 – Elementos dos modelos 2D (Castro, 2010).....	17
Figura 3.2 – Posicionamento dos planos de corte: à distância d_{min} da ponte térmica e em planos de simetria (Castro, 2010)	18
Figura 3.3 – Planos de corte para planos de corte no solo (Castro, 2010)	19
Figura 3.4 – Modelo de três ambientes distintos (Castro, 2010).....	21
Figura 3.5 – Modelo para cálculo de ligação entre duas paredes exteriores (Castro, 2010)	22
Figura 3.6 – Barra de ferramentas do programa THERM.....	24
Figura 3.7 – Representação das condições de fronteira para o Caso 1	25
Figura 3.8 – Interface para definição do material e das condições de fronteira do programa THERM	25
Figura 3.9 – Definição do coeficiente de transmissão térmica.....	26
Figura 3.10 – Interface de opções de visualização de resultados no THERM.	26
Figura 3.11 – Representação das linhas isotérmicas e gradiente de temperatura para o Caso 1	27
Figura 3.12 – Interface do cálculo do coeficiente de transmissão térmica para o Caso 1	27
Figura 3.13 – Condições de fronteira para o Caso 2	28
Figura 3.14 – Representação das linhas Isotérmicas e gradiente de temperatura para o Caso 2	29
Figura 3.15 - Interface do cálculo do coeficiente de transmissão térmica para o Caso 2	29
Figura 3.16 - Representação das condições de fronteira do Caso 3	30
Figura 3.17 - Representação das linhas isotérmicas e gradiente de temperatura para o Caso 3	31
Figura 3.18 - Interface do cálculo do coeficiente de transmissão térmica para o Caso 3	31
Figura 3.19 – Representação das condições de fronteira do Caso 4.....	32
Figura 3.20 – Representação das linhas isotérmicas do Caso 4	32
Figura 3.21 – Representação do gradiente de temperatura do Caso 4.....	33
Figura 3.22 – Interface do cálculo do coeficiente de transmissão térmica para o Caso 4.....	33
Figura 3.23 – Representação das condições de fronteira para o caso 5.....	34
Figura 3.24 – Representação das linhas isotérmicas do Caso 5	35
Figura 3.25 – Representação do gradiente de temperatura.....	35
Figura 3.26 – Interface do cálculo do coeficiente de transmissão térmica para o Caso 5.....	36
Figura 4.1 – Representação dos equipamentos usados: Termofluxímetro de modelo HFP01 da marca Hukseflux; Termopar do tipo K; Datalogger; medidos de energia.....	42

Figura 4.2 – Interior da câmara quente e interior da câmara fria	43
Figura 4.3 – Pontos de colocação dos equipamentos de medição e pontos de colocação dos equipamentos de medição para pontes térmicas.....	45
Figura 4.4 – Isolante que garante a estanquidade na ligação entre as câmaras	46
Figura 4.5 – Representação gráfica da variação das temperaturas para XPS.....	50
Figura 4.6 – Representação gráfica da variação do fluxo para XPS	50
Figura 4.7 - Representação gráfica da variação das temperaturas para Madeira de 35 mm	52
Figura 4.8 - Representação gráfica da variação do fluxo para Madeira de 35 mm.....	52
Figura 4.9 - Representação gráfica da variação das temperaturas para Madeira, 35 mm, com XPS.....	54
Figura 4.10 - Representação gráfica da variação do fluxo para Madeira, 35 mm, com XPS...	54
Figura 4.11 – Ligação caso 1	56
Figura 4.12 – Representação gráfica dos valores de temperatura dos diferentes termopares para o Caso 1	56
Figura 4.13 – Representação gráfica do valor do fluxo de calor para o Caso 1	57
Figura 4.14 – Ligação caso 2.....	58
Figura 4.15 – Representação gráfica dos valores de temperatura dos diferentes termopares para o caso 2	59
Figura 4.16 – Representação gráfica do valor do fluxo de calor para o Caso 2.....	59
Figura 4.17 – Ligação referente ao caso 3.....	60
Figura 4.18 - Representação gráfica dos valores de temperatura dos diferentes termopares para o Caso 3	61
Figura 4.19 - Representação gráfica do valor do fluxo de calor para o Caso 3.....	61
Figura 4.20 – Ligação ilustrativa do caso 4.....	62
Figura 4.21 - Representação gráfica dos valores de temperatura dos diferentes termopares para o Caso 4.....	63
Figura 4.22 - Representação gráfica do valor do fluxo de calor para o Caso 4.....	63
Figura 4.23 – Ligação ilustrativa do caso 5.....	64
Figura 4.24 - Representação gráfica dos valores de temperatura dos diferentes termopares para o Caso 5.....	65
Figura 4.25 - Representação gráfica do valor do fluxo de calor para o Caso 5.....	65

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Mecanismo combinado: Radiação e Convecção (Simões, 2015)	7
Quadro 3.1 – Valores por defeito para o coeficiente de transmissão térmica linear.	16
Quadro 3.3 – Características a realçar	23
Quadro 4.1 – Valores das perdas de energia pelas faces da envolvente da câmara quente.....	48
Quadro 4.2 – Apresentação da leitura da energia para XPS.....	51
Quadro 4.3 – Apresentação da média de temperaturas para XPS	51
Quadro 4.4 – Apresentação de resultados para XPS	51
Quadro 4.5 - Apresentação da leitura da energia para Madeira de 35 mm	52
Quadro 4.6 - Apresentação da média de temperaturas para Madeira de 35 mm.....	53
Quadro 4.7 - Apresentação de resultados para Madeira de 35 mm.....	53
Quadro 4.8 – Resultados obtidos para Madeira de 50 mm.....	53
Quadro 4.9 - Apresentação da leitura da energia para Madeira, 35 mm, com XPS.....	54
Quadro 4.10 - Apresentação da média de temperaturas para Madeira, 35mm, com XPS	55
Quadro 4.11 - Apresentação de resultados para Madeira, 35mm, com XPS	55
Quadro 4.12 - Resultados obtidos para Madeira, 50mm, com XPS.....	55
Quadro 4.13 – Apresentação da média de temperaturas Caso 1	57
Quadro 4.14 – Apresentação da leitura da energia Caso 1	57
Quadro 4.15 – Valores finais obtidos Caso 1	57
Quadro 4.16 – Apresentação da média de temperaturas Caso 2	59
Quadro 4.17 – Apresentação da leitura da energia Caso 2.....	60
Quadro 4.18 – Valores finais obtidos Caso 2	60
Quadro 4.19 - Apresentação da média de temperaturas referentes ao Caso 3.....	61
Quadro 4.20 - Apresentação da leitura da energia referentes ao Caso 3	62
Quadro 4.21 - Valores finais obtidos Caso 3	62
Quadro 4.22 - Apresentação da média de temperaturas referentes ao Caso 4.....	63
Quadro 4.23 - Apresentação da leitura da energia referente ao Caso 4.....	64
Quadro 4.24 - Valores finais obtidos Caso 4.....	64
Quadro 4.25 - Apresentação da média de temperaturas referentes ao Caso 5.....	65
Quadro 4.26 - Apresentação da leitura da energia referente ao Caso 5.....	66
Quadro 4.27 - Valores finais obtidos referentes ao Caso 5	66
Quadro 5.1 – Apresentação do Fluxo para todos os casos de estudo	67
Quadro 5.2 – Apresentação dos valores de U para os casos de estudo	68
Quadro 5.3 - Valores para o Coeficiente de condutibilidade térmica	68
Quadro 5.4 – Valores de Resistências Superficiais	69
Quadro 5.5 – Apresentação de valores de ψ para os casos em Madeira e Betão	69
Quadro 5.6 – Comparação de valores do coeficiente de transmissão térmica linear	70

ABREVIATURAS

CE – Comissão Europeia

ENU – Espaço Não Útil

EU – União Europeia

IteCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção

ISO – International Organization for Standardization

PTL – Ponte Térmica Linear

PTP - Ponte Térmica Plana

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

SCE – Sistema de Certificação Energética dos Edifício

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Os edifícios são responsáveis por uma parcela significativa do consumo energético mundial. Segundo dados da União Europeia, o sector residencial e terciário (escritórios, edifícios públicos, etc.) representa cerca de um terço da energia consumida pelos países membros (Diretiva 2002/91/CE, 2002). Grande parte deste consumo é proveniente do aquecimento e arrefecimento do ambiente dos edifícios, devido ao acréscimo das exigências de conforto. Portanto o desenvolvimento sustentável tem sido um tema importante durante muitos anos. A redução de emissões de gases, antecipação do pico do petróleo e limitação do preço da energia, levou aos objetivos atuais de redução do consumo de energia (Viot et al, 2015).

Com a constante necessidade de minimizar o consumo de energia devido à carência de recursos, tornou-se primordial o estudo do comportamento térmico e eficiência energética em edifícios de habitação.

O desempenho energético dos edifícios é condicionado por diversos fatores, tais como, condições atmosféricas, condições climatéricas interiores, características térmicas da envolvente, ganhos solares ou ganhos internos e sistema de ventilação ou ar-condicionado (Tadeu et al, 2013).

A envolvente do edifício é um dos parâmetros a considerar, uma vez que afeta de forma significativa as condições interiores. Foi realizado um estudo por Tadeu (Tadeu et al, 2013) sobre as propriedades térmicas dos elementos de construção responsável pelo conforto interior, para uma melhor compreensão em como contribuem para o menor custo do ciclo de vida, desempenho térmico de casas ocupadas e casas naturalmente ventiladas. Realizando uma correlação entre a percentagem de horas e o desconforto térmico equivalente e a capacidade térmica, conclui-se que o número de horas de desconforto é inferior em edifícios com uma maior capacidade térmica da envolvente e que a propriedade térmica com melhor correlação com horas de desconforto é a capacidade térmica. Uma maior capacidade térmica permite um conforto térmico maior usando menos energia.

Outro parâmetro, com uma importância vital para se efetuar o estudo e avaliação do comportamento térmico, são as perdas energéticas para o exterior, que podem ocorrer através das pontes térmicas e zonas correntes das envolventes. Sendo que uma parte das perdas de calor para o exterior se pode dever às Pontes Térmicas Lineares.

As exigências regulamentares, em Portugal, foram inicialmente definidas pelo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei n° 40/90. Substituído pelo RCCTE aprovado pelo Decreto-Lei n° 80/2006. Sendo que o regulamento atualmente em vigor é o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) aprovado pelo Decreto-Lei n 118/2013, tendo sofrido a última alteração na data de 23 de Junho aprovado pelo Decreto-Lei n° 28/2016.

Aplicando o REH para cálculo das pontes térmicas lineares, estão previstos três tipos de abordagens: pelo cálculo numérico, pelos catálogos e pelos valores por defeito presentes no REH. Este último método, é o mais usado devido à simplicidade da sua aplicação. Para valores de catálogo podem, por exemplo, ser usados os que são disponibilizados pelo IteCons (IteCons@2017).

1.2 Objetivos do trabalho

Tendo em conta a importância da quantificação das perdas de calor por pontes térmicas, pretende-se neste trabalho avaliar os coeficientes de transmissão térmica lineares para tipos de ligações correntes em edifícios de habitação em Portugal.

A avaliação foi feita através de dois métodos distintos:

- Programa THERM (Simulation Manual, 2013) baseado no método dos elementos finitos;
- Ensaios experimentais.

Realizando, numa fase avançada, uma análise comparativa de ambos os métodos com valores por defeito.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos, organizados da forma que se previu ser a mais coerente.

No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento do tema e a justificação da necessidade de se abordar o tema, estabelecendo-se ainda os objetivos da dissertação.

No segundo capítulo é realizada uma abordagem teórica do estado da arte, onde é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema em estudo. Fazendo também um enquadramento legislativo e apresenta-se a metodologia de cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear pelo atual regulamento português (REH).

O terceiro capítulo diz respeito à metodologia de cálculo de pontes térmicas lineares, com o método de cálculo usado pela norma ISO 10211:2007.

No quarto capítulo é feita a aplicação experimental do modelo proposto aos exemplos anteriormente considerados para diferentes configurações de pontes térmicas lineares.

No quinto capítulo são comparados os valores entre as diferentes metodologias e são apresentadas conclusões decorrentes da análise desenvolvida e dos resultados obtidos ao longo dos capítulos anteriores.

2. CONCEITOS GERAIS

2.1 Enquadramento

O estudo do comportamento térmico e energético de edifícios revela um conceito de conforto térmico, que segundo a norma ISO 7730, é uma condição mental do indivíduo que manifesta o contentamento com ambiente térmico. O conforto térmico só é proporcionado através da proporcionalidade entre calor gerado e calor gasto pelo corpo, não havendo este equilíbrio existe um incómodo devido a excesso de frio ou excesso de calor, tratando-se neste caso de desconforto térmico.

O conforto térmico depende de fatores humanos (metabolismo e vestuário) e de fatores ambientais (temperatura do ar, radiação, humidade relativa e vento). Entre os fatores ambientais, a temperatura do ar é possível de controlar, de certa maneira, através do isolamento térmico. Usando isolamento, de forma a estabilizar a temperatura interior, melhora o conforto térmico interior. A temperatura de conforto de referência, segundo o REH, para o Inverno corresponde a 18°C com humidade relativa de 50% e de 25°C para o Verão.

A transmissão de calor entre dois elementos é verificada sempre que é estabelecida entre eles uma diferença de temperatura, ocorrendo uma transferência de energia de um para o outro. A transmissão de calor faz-se sempre no sentido do elemento com a temperatura mais elevada para o elemento com a temperatura mais baixa, complementada com a conservação da energia, ou seja, a quantidade de calor que o elemento com a temperatura mais elevada cede é igual à quantidade de calor que o elemento com a temperatura mais baixa recebe (Simões, 2015).

É corrente admitir a transmissão de calor por três processos distintos: condução, convecção e radiação, mostrados na Figura 2.1.

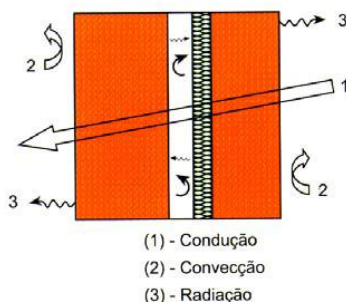


Figura 2.1 – Tipos de transmissão de calor (Simões, 2015)

A transmissão de calor por condução ocorre devido à diferença de temperatura estabelecida entre dois pontos do corpo, dependendo da área da superfície e do coeficiente de condutibilidade térmica (λ dado em $W/m^{\circ}C$). O fluxo de calor transmitido por convecção entre uma superfície e um fluido é proporcional à área considerada e à diferença de temperaturas estabelecidas. Transmissão de calor por radiação é diferente das anteriores devido à não necessidade de um meio material para a sua propagação, variando em relação as anteriores (Simões, 2015).

2.2 Coeficiente de Transmissão Térmica

Segundo o REH existe um conjunto de parâmetros de caracterização, como mostra a figura 2.2:

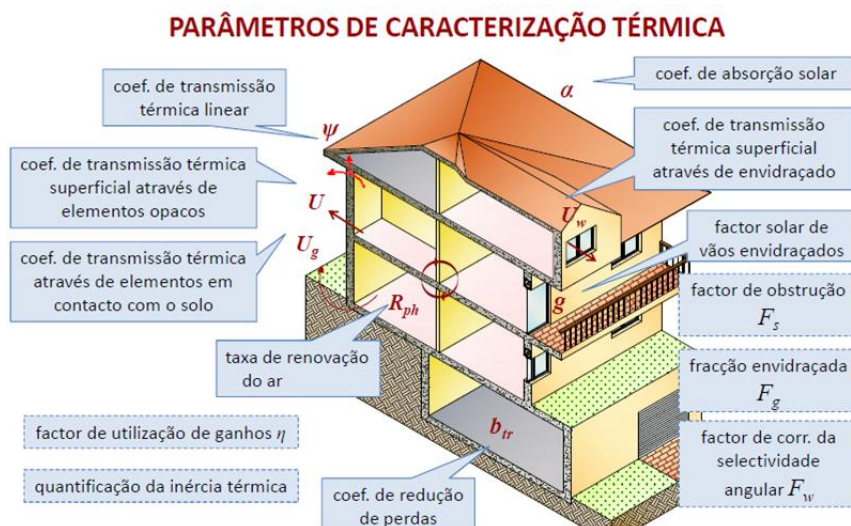


Figura 2.2 – Parâmetros de caracterização térmica (Simões, 2015)

Um dos parâmetros usados no REH é o coeficiente de transmissão térmica, U ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$), definido como “a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente um elemento por unidade de tempo e de superfície quando sujeito a uma diferença de temperatura unitária, em °C , entre os ambientes que os separa” (Simões, 2007).

Devido às paredes não serem, por norma, camadas homogêneas faz com que o fluxo de calor não seja unidirecional, como é o caso de uma parede de Alvenaria de Tijolo com furos incutidos como mostra a Figura 2.3. Mas, de uma forma simplificada, considera-se como se o mesmo fosse unidirecional.

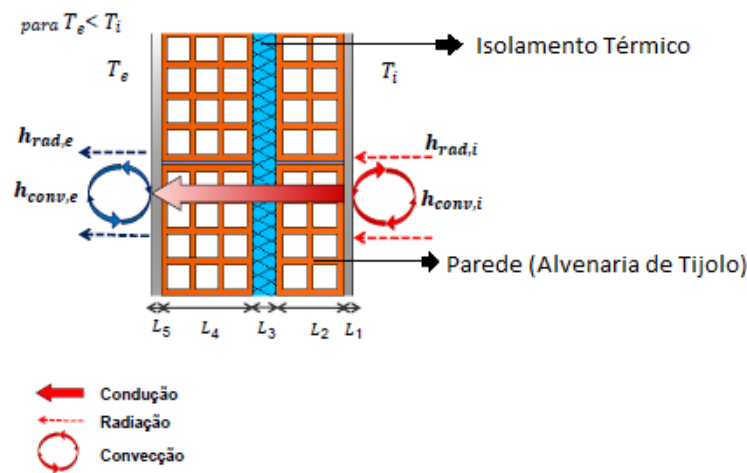


Figura 2.3 – Transferência de calor unidirecional – regime permanente (Simões, 2015)

O coeficiente de transmissão térmica tem como expressão:

$$U = \frac{1}{R_{se} + \sum R_i + R_{si}} \quad (1)$$

Sendo que:

- R_{se} - representa a resistência superficial exterior ($\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$);
- R_{si} - representa a resistência superficial interior ($\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$);
- R_i - representa a resistência térmica do elemento i ($\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$) (Simões, 2015).

As resistências superficiais têm valores tabelados no REH, podendo também serem calculadas pela seguinte equação:

$$R_s = \frac{1}{h} \quad (2)$$

Dado que:

- h' - corresponde ao coeficiente de transferência de calor por convecção e radiação ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$) (Simões, 2015).

A resistência térmica do elemento i é dada pela expressão:

$$R_i = \frac{e_i}{\lambda_i} = \frac{1}{K} \quad (3)$$

Onde K representa a condutância Térmica, em $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$.

Apresenta-se, de seguida, um quadro com valores para resistências superficiais, exterior e interior, e para o coeficiente combinado de transferência de calor por convecção e radiação.

Superfície	Fluxo horizontal		Fluxo ascendente		Fluxo descendente	
	h' ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)	R_s ($\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$)	h' ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)	R_s ($\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$)	h' ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)	R_s ($\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$)
Interior	7,70	0,13	10	0,10	5,88	0,17
Exterior	25	0,04	25	0,04	25	0,04

Quadro 2.1 - Mecanismo combinado: Radiação e Convecção (Simões, 2015)

2.3 Pontes Térmicas

Ponte térmica é definida como uma zona da envolvente do edifício em que não é possível considerar a transferência de calor como unidimensional, onde a resistência à passagem de calor é inferior e a concentração das linhas de fluxo é superior. Tais alterações podem ser provocadas pela:

- total ou parcial inclusão na envolvente de materiais com diferente condutividade térmica, como é mostrado na Figura 2.4;
- variação da geometria da envolvente, nomeadamente, pela variação da sua espessura, como é mostrado na Figura 2.4;
- desigualdade das suas áreas interna e externa, como acontece no caso das ligações entre paredes e pavimentos.

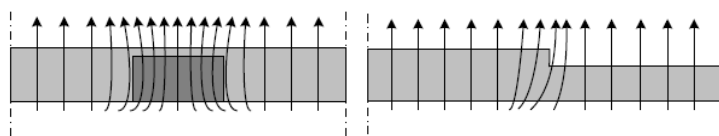


Figura 2.4 – Ponte térmica devido à transição entre diferentes materiais e alteração de espessura (Valério, 2007)

Transferências bidimensionais correspondem a pontes térmicas com grande desenvolvimento numa dada direção, como é o caso de pontes térmicas lineares, e transferências de calor tridimensionais corresponde a pontes térmicas pontuais (Castro, 2010).

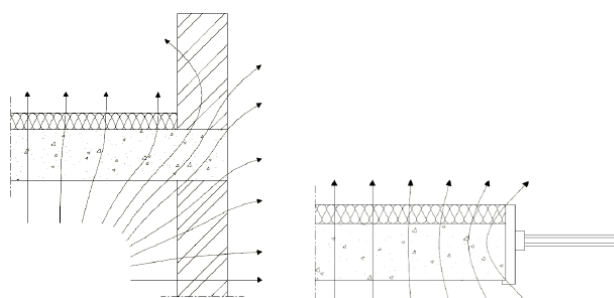


Figura 2.5 – Fluxos bidirecionais de calor (Castro, 2010)

As alterações relativamente à resistência térmica podem surgir com a variação das propriedades de ambas as superfícies da parede, variação de uma superfície (Viot et al, 2015). Eles podem ser classificados em duas categorias:

- Pontes térmicas planas caracterizada pela heterogeneidade inserida em zona corrente da envolvente, como pode ser o caso de certos pilares, caixas de estore e talões de viga (Simões, 2007). Se a transmissão de calor for tridimensional a ponte térmica é pontual.
- Pontes térmicas lineares resultam da ligação de dois elementos de diferentes planos, causadas ao longo de um comprimento, como é o caso de intersecção de duas paredes (Viot et al, 2015). Se ocorrer condução bidimensional é um caso de ponte térmica linear.

Em todos os casos, o fluxo de calor segue a trajetória com menor dispêndio de energia, ou seja, procura um caminho em que a resistência térmica é menor. Sendo esta em função da distância entre pontos e da condutibilidade térmica do material, tal que o que fluxo de calor percorre o “caminho mais rápido” que resulta da combinação dos dois parâmetros.

Como objetivo do presente trabalho é a determinação do coeficiente de transmissão linear (ψ), através da aplicação do método de cálculo presente na norma europeia ISO 10 211:2007. O coeficiente de transmissão térmica linear é o parâmetro que corresponde à quantificação das perdas de calor, obtido em $W/m^{\circ}C$.

2.4 Legislação

A legislação sobre desempenho energético dos Edifícios tem sofrido diversas alterações ao longo dos anos. A partir da Diretiva nº 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro de 2002, passou para o ordenamento jurídico nacional através do Decreto-Lei nº 78/2006, de 4 de Abril, aprovou o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios, do Decreto-Lei nº 79/2006, de 4 de Abril, que aprovou o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios e do Decreto-Lei nº 80/2006, de 4 de Abril, que por fim, aprovou o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (DL 118/2003,2013).

Em 2010 foi realizada uma reformulação na Diretiva 2002/91/CE, de 16 de Dezembro de 2002, substituindo pela Diretiva 2010/31/EU, de 19 de Maio de 2010, ter este vindo a acrescentar novas disposições para atingir os resultados estipulados para 2020. Sendo que os objetivos para 2020 são, o aumento da eficiência energética em 20%, a redução da emissão de CO_2 em 20% e aumento das energias renováveis em 20% (DL 118/2013,2013).

Para melhorar a organização e aplicação do sistema de certificação energética nacional que cumpra os requisitos presentes na Diretiva 2010/31/EU, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Maio de 2010, foi transposta através do Decreto-Lei nº 118/2013, de 20 de Agosto. Neste Decreto-Lei nº 118/2013 encontram-se diplomas de Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), de Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e de Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) (DL 118/2013,2013). De realçar que, apenas, será dada relevância ao Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), dado que esta dissertação tem bases de casos de estudo relacionados a edifícios de habitação.

2.4.1 Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)

O Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) que é aprovado pelo Decreto-Lei nº 118/2013 de 20 de Agosto, foi revogado pelo Decreto-Lei nº

28/2016 de 23 de Junho, com um conjunto de portarias e despachos, tendo com o fim proporcionar boas condições de conforto térmico necessárias para os edifícios de Habitação.

A determinação da eficiência energética é feita com base em comparações entre comportamento do edifício em estudo onde são impostos parâmetros de referência. Para a caracterização do comportamento térmico de edifícios é de vital importância realizar a caracterização de três distintos índices, necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}), necessidades nominais de energia útil para arrefecimento (N_{vc}) e necessidades globais anuais de energia primária (N_{tc}). São mostrados na Figura 2.6 os parâmetros de caracterização térmica para desempenho Energético dos Edifícios de Habitação. Tendo como parâmetros principais o coeficiente de transmissão térmica linear, coeficiente de transmissão térmica superficial através de elementos opacos, coeficiente de transmissão térmica através de elementos em contacto com o solo e coeficiente de transmissão térmica superficial através de vãos envidraçados (Despacho 15793–K/2013).

É estabelecido pelo REH os requisitos de desempenho energético em edifícios para o valor máximo das necessidades normais anuais de energia primária (N_t), traduzido por $N_{tc} \leq N_t$, valor máximo das necessidades anuais de energia útil para aquecimento (N_i), traduzido por $N_{ic} \leq N_i$ e valor máximo das necessidades anuais de energia útil para arrefecimento (N_v), traduzido por $N_{vc} \leq N_v$. Onde N_i, N_v e N_t representam parâmetros de referência aplicados em edifício de referência (Despacho 15793–K/2013).

2.4.1.1 Necessidades Nominais Anuais de Energia Útil para Aquecimento

Para o cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}) são necessários quatro parâmetros: transferência de calor por transmissão através da envolvente dos edifícios ($Q_{tr,i}$) em kWh, transferência de calor por ventilação ($Q_{ve,i}$) em kWh, ganhos de calor úteis ($Q_{gu,i}$) em kWh e área útil de pavimento, medida pelo interior (A_p) em m^2 (Despacho 15793–K/2013).

$$N_{ic} = \frac{Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - Q_{gu,i}}{A_p} \quad (4)$$

Para o caso de estudo do presente trabalho, a incógnita que mais importa caracterizar é a transferência de calor por transmissão ($Q_{tr,i}$), para se fazer o cálculo das perdas energéticas das pontes térmicas lineares.

Ao longo da estação de aquecimento e devido à diferença de temperatura entre o interior e o exterior do edifício que ocorre através da envolvente, calcula-se as perdas de calor através da seguinte expressão:

$$Q_{tr,i} = 0,024 \times GD \times H_{tr,i} \quad (5)$$

Dado em kWh. Em que:

- GD - Número de graus-dias de aquecimento especificados para cada concelho;
- $H_{tr,i}$ - Coeficiente global de transferência de calor por transmissão, em $W/^{\circ}C$.

O coeficiente global de transferência de calor por transmissão traduz a condutância através de toda a superfície dos elementos da envolvente, incluindo paredes, envidraçados, coberturas e pavimentos, para efeito de cálculo das necessidades na estação de aquecimento resulta da soma de quatro parcelas (Despacho 15793-K/2013).

$$H_{tr,i} = H_{ext} + H_{enu} + H_{adj} + H_{ecs} \quad (6)$$

Dado em $W/^{\circ}C$. Onde:

- H_{ext} - Coeficiente de transferência de calor através de elementos da envolvente em contacto com o exterior, incluindo paredes, envidraçados, coberturas, pavimento e pontes térmicas planas, em $W/^{\circ}C$;
- H_{enu} - Coeficiente de transferência de calor através de elementos da envolvente em contacto com espaços não úteis, em $W/^{\circ}C$;
- H_{adj} - Coeficiente de transferência de calor através de elementos da envolvente em contacto com edifícios adjacentes, em $W/^{\circ}C$;
- H_{ecs} - Coeficiente de transferência de calor através de elementos em contacto com o solo, em $W/^{\circ}C$.

A expressão para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por transmissão através da envolvente exterior (Despacho 15793-K/2013):

$$H_{ext} = \sum_i [U_i \times A_i] + \sum_j [\psi_j \times B_j] \quad (7)$$

Dado em $W/^{\circ}C$. Sendo que:

- U_i - Coeficiente de transmissão térmica superficial do elemento i da envolvente, em $W/(m^2^{\circ}C)$;
- A_i - Área do elemento i da envolvente, medida, pelo interior do edifício, em m^2 ;
- ψ_j - Coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear j, em $W/(m^2^{\circ}C)$;

- B_j – Desenvolvimento linear da ponte térmica linear k , medido pelo interior do edifício, em m.

Os coeficientes de transferência de calor por transmissão através da envolvente em contacto com espaços não-úteis, H_{enu} , e em contacto com edifícios adjacentes, H_{adj} , são ambos calculados de acordo com (Despacho 15793–K/2013):

$$H_{enu:adj} = b_{tr}(\sum_i[U_i \times A_i] + \sum_j[\psi_j \times B_j]) \quad (8)$$

Podendo ser traduzido por:

$$H_{enu:adj} = b_{tr} \times H_{ext} \quad (9)$$

Obtido em $W/^\circ C$, onde:

- b_{tr} – Coeficiente de redução de perdas de determinados espaços não úteis ou de um edifício adjacente.

É importante referir que um coeficiente de redução de perdas inferior ou igual a 1 ($b_{tr} \leq 1$) traduz a redução da transmissão de calor nas situações em que a temperatura exterior é diferente da temperatura de espaços não úteis ou edifícios adjacentes (Despacho 15793–K/2013).

O cálculo do coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos em contacto com o solo deve ser feito de acordo com a metodologia definida na norma EN ISO 13370, ou através da seguinte expressão (Despacho 15793–K/2013):

$$H_{ecs} = \sum_i[U_{bf,i} \times A_i] + \sum_j[z_j \times P_j \times U_{bw,j}] \quad (10)$$

Dado em $W/^\circ C$, em que:

- $U_{bf,i}$ – Coeficiente de transmissão térmica superficial do pavimento enterrado i , em $W/(m^2^\circ C)$;
- A_i – Área do pavimento em contacto com o solo i , medida pelo interior do edifício, em m^2 ;
- z_j – Profundidade média enterrada da parede em contacto com o solo j , em m;
- P_j – Desenvolvimento total da parede em contacto com o solo j , medido pelo interior, em m;
- $U_{bw,j}$ – Coeficiente de transmissão térmica da parede em contacto com solo j , em $W/(m^2^\circ C)$.

2.4.1.2 Necessidades Nominais anuais de energia útil para arrefecimento

As necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento são determinadas de acordo com a norma europeia EN ISO 13790, considerando (Despacho 15793–K/2013):

- O método sazonal de cálculo de necessidades de arrefecimento de edifícios e as adaptações permitidas pela Norma;
- Cada edifício e/ou fração autónoma do edifício como uma única zona, com as mesmas condições interiores de referência;
- A ocorrência dos fenómenos envolvidos em regime permanente, integrados ao longo da estação de arrefecimento.

O valor das necessidades nominais anuais de energia para arrefecimento do edifício, N_{vc} , é calculado segundo (Despacho 15793–K/2013):

$$N_{vc} = (1 - \eta_v) \frac{Q_{g,v}}{A_p} \quad (11)$$

Obtido em kWh/m².ano, onde:

- η_v – Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento;
- $Q_{g,v}$ - Ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento, em kWh;
- A_p – Área útil de pavimento do edifício, medida pelo interior, em m².

A metodologia de cálculo do fator de utilização de ganhos térmicos deve ser feita em função da transferência de calor ao longo da estação de arrefecimento que ocorre por transmissão, $Q_{tr,v}$, e devido à renovação de ar, $Q_{ve,v}$, bem como dos ganhos da estação de arrefecimento, $Q_{g,v}$.

Comparativamente ao que foi efetuado sobre a estação de aquecimento, também neste caso apenas se pretende estudar as perdas de calor por transmissão, sendo apresentados de seguida o procedimento.

A transferência de calor por transmissão através da envolvente é obtido por (Despacho 15793–K/2013):

$$Q_{tr,v} = \frac{H_{tr,v}(\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext})L_v}{1000} \quad (12)$$

Sendo expresso em kWh, onde:

- $H_{tr,v}$ – Coeficiente global de transferência de calor por transmissão, em $W/^\circ C$;
- $\theta_{v,ref}$ – Temperatura de referência para o cálculo das necessidades de energia na estação de arrefecimento, igual a $25^\circ C$;
- $\theta_{v,ext}$ – Temperatura média do ar exterior para a estação de arrefecimento.
- L_v – Duração da estação de arrefecimento igual a 2928 horas.

Para efeito de cálculo das necessidades na estação de arrefecimento, o coeficiente global de transferência de calor por transmissão resulta de (Despacho 15793–K/2013):

$$H_{tr,v} = H_{ext} + H_{enu} + H_{ecs} \quad (13)$$

Dado em kWh, em que:

- H_{ext} – Coeficiente de transferência de calor através de elementos da envolvente em contacto com o exterior (paredes, envidraçados, coberturas, pavimentos e pontes térmicas planas), em $W/^\circ C$;
- H_{enu} – Coeficiente de transferência de calor através de elementos da envolvente em contacto com espaços não úteis, em $W/^\circ C$;
- H_{ecs} – Coeficiente de transferência de calor através de elementos em contacto com o solo, em $W/^\circ C$.

O coeficiente de transferência de calor por transmissão através da envolvente exterior (H_{ext}), o coeficiente de transferência de calor por transmissão através da envolvente em contacto com espaço não útil (H_{enu}) e o coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos em contacto com o solo (H_{ecs}) são iguais às equações para a estação de aquecimento, explicitadas anteriormente pelas equações (7), (8) e (10).

3. METODOLOGIA DE CÁLCULO

A determinação do coeficiente de transmissão térmica linear pode ser efetuada através de quatro formas distintas:

- De acordo com as normas europeias em vigor, Norma EN ISO 10211;
- Com recurso a catálogos de pontes térmicas para várias geometrias e soluções construtivas típicas, desde que o cálculo tenha sido feito de acordo com as Normas em vigor;
- Com recurso a valores tabelados dados pelo REH;
- Com recurso a métodos experimentais.

Irá ser abordado neste capítulo a norma referida e os valores tabelados pelo REH. De referir que a abordagem pelo método experimental vai ser abordada no capítulo seguinte.

3.1 REH

Os valores por defeito do coeficiente de transmissão térmica linear, em $W/(m^{\circ}C)$, pelo REH são divididos por oito tipos de ligações e três tipos de sistema de isolamento das paredes (Isolamento interior, isolamento exterior e isolamento repartido ou na caixa de ar de parede dupla). De realçar que para o caso em estudo neste trabalho apenas os valores de ligação fachada com pavimento de nível intermédio e fachada com varanda serão relevantes. Como mostra o Quadro 3.1 os modelos de cálculo do REH são os seguintes:

- Ligação fachada com pavimentos térreos;
- Ligação fachada com pavimento sobre exterior ou local não aquecido;
- Ligação fachada com pavimento de nível intermédio;
- Ligação fachada com varanda;
- Ligação com cobertura;
- Ligação duas paredes verticais em ângulo saliente;
- Ligação fachada com caixilharia;
- Ligação zona da caixa de estores.

O quadro 3.1 é retirado do REH (Despacho 15793–K/2013):

Tipo de ligação		Sistema de isolamento das paredes		
		Isolamento interior	Isolamento exterior	Isolamento repartido ou na caixa de ar de parede dupla
Fachada com pavimentos térreos		0,80	0,70	0,80
Fachada com pavimento sobre o exterior ou local não aquecido	Isolamento sob o pavimento	0,75	0,55	0,75
	Isolamento sobre o pavimento	0,10	0,50	0,35
Fachada com pavimento de nível intermédio ⁽¹⁾		0,60	0,15 ⁽²⁾	0,50 ⁽³⁾
Fachada com varanda ⁽¹⁾		0,60	0,60	0,55
Fachada com cobertura	Isolamento sob a laje de cobertura	0,10 ⁽⁴⁾	0,70	0,60
	Isolamento sobre a laje de cobertura	1,0	0,80	1,0
Duas paredes verticais em ângulo saliente		0,10	0,40	0,50
Fachada com caixilharia	O isolante térmico da parede contacta com a caixilharia	0,10	0,10	0,10
	O isolante térmico da parede não contacta com a caixilharia	0,25	0,25	0,25
Zona da caixa de estores		0,30	0,30	0,30

Quadro 3.1 – Valores por defeito para o coeficiente de transmissão térmica linear.

É, ainda, referido no REH situações em que as pontes térmicas lineares não são contabilizadas:

- Paredes de compartimentação que intersectam paredes, coberturas e pavimento sem contacto com o exterior ou espaços não úteis;
- Paredes interiores separando um espaço interior útil de um espaço não útil ou de um edifício adjacente, desde que $b_{tr} \leq 0,7$.

3.2 Norma EN ISO 10211

É na Norma EN ISO 10211:2007 onde se podem encontrar definidas as especificações dos modelos geométricos bidimensionais e tridimensionais de pontes térmicas para cálculo

numérico de fluxos de calor, para avaliação da perda de calor de um edifício ou parte dele e de temperaturas superficiais mínimas, para avaliação do risco de condensação superficial. Através da norma é possível obter coeficientes de transmissão térmica lineares, pontuais e fatores de temperatura superficial. Sendo feito apenas uma abordagem para o coeficiente de transmissão térmica linear neste trabalho (Castro, 2010).

3.2.1 Modelo Geométrico

A norma referida permite um uso de três sistemas de dimensões:

- Dimensões internas, excluindo a espessura das divisórias internas;
- Dimensões internas totais, incluindo a espessura das divisórias internas;
- Dimensões externas.

Como referido é de interesse do presente tema desenvolvido apenas o estudo das pontes térmicas lineares, caracterizada por uma modelação bidimensional. Não irá ser apresentada nenhuma modelação tridimensional.

Na modelação bidimensional a norma define dois tipos de elementos, representados na Figura 3.1 (Castro, 2010):

- Elementos Marginais – são definidos como sendo partes do modelo que consistem em elementos compostos por diferentes camadas planas e paralelas de materiais, isto quando consideradas isoladamente, denominadas de zonas correntes da envolvente;
- Elementos Centrais – são definidos como sendo todas as partes do modelo que não estão incluídas no grupo dos elementos marginais, denominadas de zonas de ponte térmica linear.

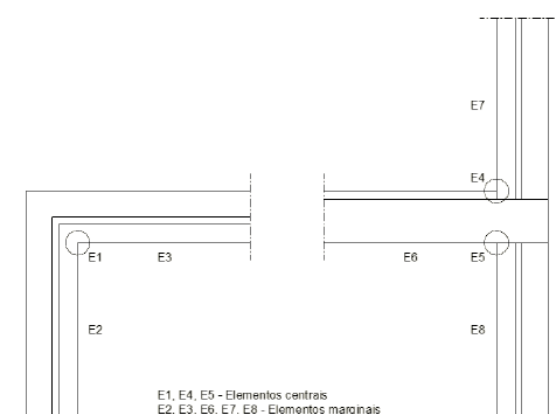


Figura 3.1 – Elementos dos modelos 2D (Castro, 2010)

Existem regras de planos de corte para simplificação dos modelos de cálculo (Castro, 2010):

- Planos de corte para modelos 2D;
- Planos de corte no solo.

Para o primeiro caso, o modelo é delimitado por planos de corte e inclui os elementos centrais, marginais e, em alguns casos necessários, o solo. Tendo presente onde posicionar os planos de corte (Castro, 2010):

- Em planos de simetria, se estes se encontrarem a menos de d_{\min} do elemento central;
- A pelo menos d_{\min} do elemento central, caso não exista um plano de simetria a menor distância.

O d_{\min} é definido como sendo o maior de dois valores: superior a um metro e a três vezes a espessura do elemento marginal. Poderão ocorrer planos em que possa incluir mais do que uma ponte térmica, para isso basta que os planos de corte estejam pelo menos afastados de d_{\min} , de cada uma das pontes térmicas, ou que coincidam com os planos de simetria. Os posicionamentos dos planos de corte estão apresentados na Figura 3.2:

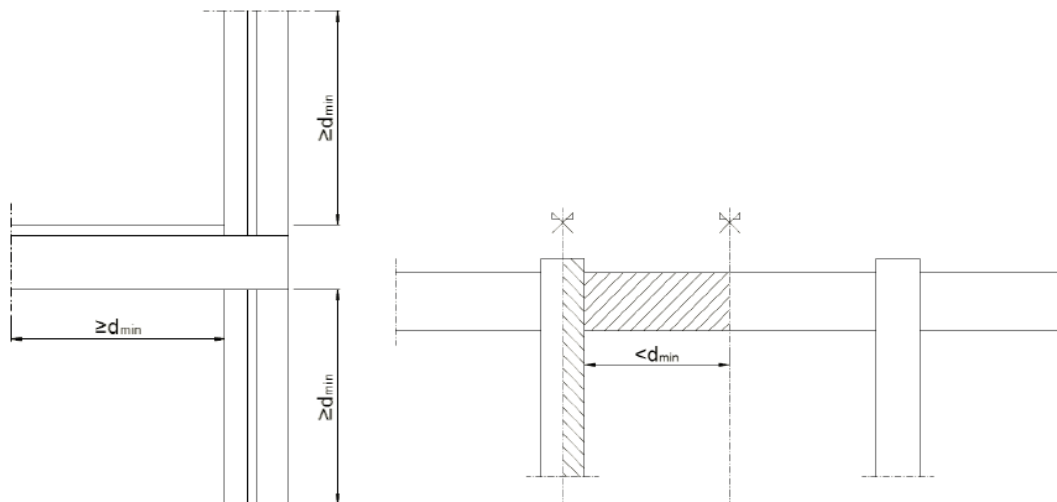


Figura 3.2 – Posicionamento dos planos de corte: à distância d_{\min} da ponte térmica e em planos de simetria (Castro, 2010)

É importante referir que em todos os planos de corte se garante o fluxo de calor nulo na direção do elemento marginal, ou seja, constituírem uma fronteira adiabática.

Para o segundo caso, Planos de corte no solo, o solo interpreta um papel na transferência de calor, para esta situação os planos de corte devem posicionar-se de acordo com (Castro, 2010):

- Distância na horizontal ao plano de corte vertical no interior do edifício: $0,5 \times b$;
- Distância na horizontal ao plano de corte vertical no exterior do edifício: mínimo entre $0,5 \times b$ e 20m. Para o caso em que algum plano de simetria seja conhecido, estes poderão ser utilizados como planos de corte;
- Distância na vertical ao plano de corte horizontal abaixo do nível do pavimento; mínimo entre $2,5 \times b$ ou 20m.

Apresenta-se na Figura 3.3 o que foi descrito nos três pontos anteriores. Onde b representa uma dimensão do pavimento.

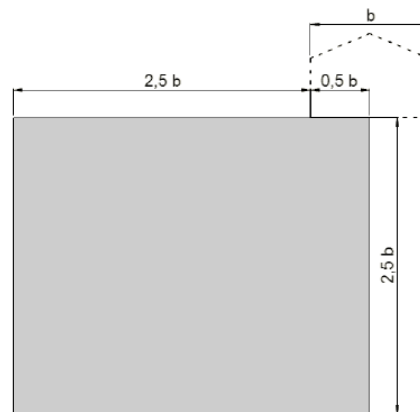


Figura 3.3 – Planos de corte para planos de corte no solo (Castro, 2010)

É de notar que para o cálculo do fluxo de calor que atravessa um edifício ou parte dele, este apenas poder ser realizado tendo conhecimento das condições de fronteira e dos detalhes de construção (Castro, 2010). Assim sendo depois da modelação estar completa é necessário proceder à definição das propriedades, tais como a condutividade térmica dos materiais (camada de ar e solo, caso estejam presentes), resistências superficiais e as temperaturas de fronteira dos ambientes considerados.

3.2.2 Método de Cálculo

3.2.2.1 Cálculo do Fluxo de Calor

O fluxo de calor, Q , que atravessa a particularidade construtiva estudada é calculado pelo processo que relaciona a transmissão de calor bidimensional que é resolvido por métodos numéricas (Castro, 2010) como por exemplo os métodos dos elementos finitos. A metodologia que será utilizada neste trabalho é o método dos elementos finitos, é utilizado pelo programa no cálculo do fluxo de calor, portanto, irá ser dada uma maior relevância ao mesmo. O método é numérico, assim sendo, o domínio é discretizado em partes não contínuas e quanto maior for o número de nós, por consequência, maior será o número de elementos, o que se traduz numa maior precisão dos resultados obtidos. É importante, por outro lado, não esquecer de outros fatores importantes, como é a escolha da malha, que se encontra dividida em camadas bidimensionais ou tridimensionais (Gesualdo, 2010).

Após apresentada a definição e discretização do modelo geométrico, procede-se à definição das condições de fronteira. Através da aplicação das leis da conservação da energia ($div q = 0$) e de Fourier ($q = -\lambda grad\theta$) e tendo em atenção às condições de fronteira, é obtido um sistema de equações em função da temperatura dos nós. A solução do sistema é traduzida numa ilustração da variação das temperaturas nos nós, obtido pela solução direta ou método iterativo (Castro, 2010).

Foi determinado o fluxo de calor, Q , de seguida calcula-se o coeficiente de transmissão térmica global (Amorim, 2016).

O coeficiente de transmissão térmica global é dividido em dois casos:

- Para o caso de existirem apenas duas temperaturas de fronteira, ou seja, apenas dois ambientes distintos;
- Para o caso de existirem mais do que duas temperaturas de fronteira, ou seja, mais do que dois ambientes distintos.

Começando pelo primeiro caso, em que existem apenas dois ambientes distintos, o fluxo de calor global de um ambiente i para um ambiente j , $\Phi_{i,j}$ é obtido por:

$$\Phi_{i,j} = L_{i,j}^{2D} \times (\theta_i - \theta_j) \quad (14)$$

Onde:

- $\Phi_{i,j}$ – é o fluxo de calor entre os dois ambientes, i e j, em W/m^2 ;
- θ_i – é a temperatura do ambiente i, em $^{\circ}C$;
- θ_j – é a temperatura do ambiente j, em $^{\circ}C$;
- $L_{i,j}^{2D}$ – é o coeficiente de transmissão térmica global entre cada par de ambientes, em $W/m^2^{\circ}C$.

A situação para o segundo caso, em que existem mais do que dois ambientes distintos, acontece no caso da ligação entre uma parede de fachada com pavimento sobre um espaço não útil (espaço não aquecido). Neste caso coexistem três temperaturas distintas, exterior, interior e do espaço não útil, tomando uma forma ligeiramente distinta da expressão para o primeiro caso:

$$\Phi_{i,j} = \sum_{i < j} (L_{i,j}^{2D} \times (\theta_i - \theta_j)) \quad (15)$$

É importante realçar que para este segundo caso, em que existe um somatório, o caso de $L_{i,j}^{2D}$, são coeficientes distintos para cada soma (Castro, 2010).

Na Figura 3.4, é apresentado uma explicação ilustrativa do exemplo de três ambientes distintos.

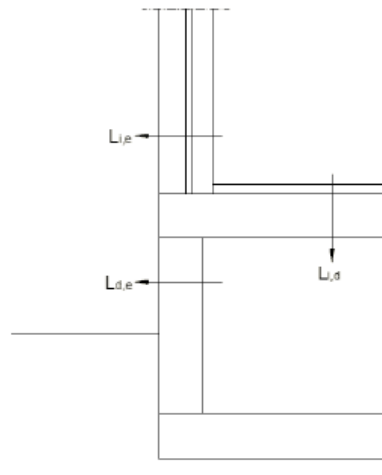


Figura 3.4 –Modelo de três ambientes distintos (Castro, 2010)

O coeficiente de transmissão térmica linear que separa o ambiente i do ambiente j, pode ser expresso por:

$$L_{i,j}^{2D} = \sum_{k=1}^{N_k} (U_k \times A_k) + \psi \times l \quad (16)$$

Fazendo uma consideração de que o comprimento é unitário, ou seja, $l = 1$ e para $A_k = l_k \times l$, surge a equação traduzida por:

$$L_{i,j}^{2D} = \sum_{k=1}^{N_k} (U_k \times l_k) + \psi \quad (17)$$

3.2.2.2 Cálculo do Coeficiente de Transmissão Térmica Linear

A fim de saber o valor do coeficiente de transmissão térmica linear, ψ , basta fazer uma transformação da equação anterior, em função da incógnita desejada, apresentado então por:

$$\Psi = L_{i,j}^{2D} - \sum_{k=1}^{N_k} (U_k \times l_k) \quad (18)$$

Onde:

- U_k - é a transmissão térmica dos componentes marginais do fluxo de calor unidirecional que separa o ambiente i do ambiente j, em $W/m^2\text{C}$. ;
- l_k - é o comprimento no modelo geométrico 2D da componente marginal k , em m;
- N_k - é o número total de componentes marginais.

A Figura 3.5 é a representação esquemática do modelo de cálculo:

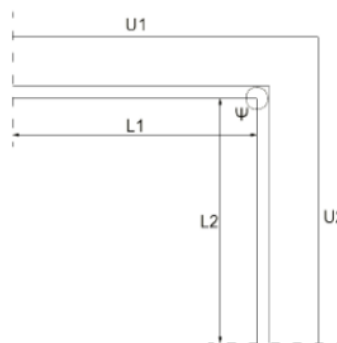


Figura 3.5 – Modelo para cálculo de ligação entre duas paredes exteriores (Castro, 2010)

É de realçar que o cálculo do valor do coeficiente de transmissão térmica linear depende do sistema de dimensões escolhido, portanto é vital referir que o sistema está a ser utilizado para os vários tipos de pontes térmicas lineares.

3.3 Descrição das configurações modeladas

Como foi referido anteriormente, o objetivo deste trabalho é fazer uma comparação de valores dos coeficientes de transmissão térmica linear obtidos pelo THERM, pela metodologia experimental e valores por defeito presentes no REH. Como pelo método experimental foram realizados apenas ensaios com madeira, também no THERM se realizou da mesma forma. As configurações geométricas estudadas são descritas seguidamente.

O estudo foi realizado com situações de isolamento diferentes:

- Isolamento pelo Exterior;
- Isolamento pelo Interior;

Para o isolamento usou-se poliestireno extrudido (XPS) para qualquer uma das diferentes situações de isolamento apresentadas, com uma espessura de 40 mm. Quanto à madeira foi utilizada uma espessura de 50 mm.

Para a realização das simulações é necessário definir as temperaturas interiores e exteriores. Para tal considerou-se um diferencial de temperatura de 10°C, sendo 20°C a temperatura interior e 10°C a temperatura exterior. Poderia ter sido feita a consideração de diferentes temperaturas para cada caso realizado consoante a diferença de temperatura do modelo laboratorial, no entanto como vai ser demonstrado mais à frente, a diferença de temperatura não tem influência nos cálculos realizados pelo THERM.

Os valores do coeficiente de condutibilidade térmica dos materiais usados foram retirados dos cálculos dos ensaios experimentais, para ser possível fazer uma comparação mais correta entre valores experimentais e numéricos. Os valores de condutibilidade térmica utilizados na modelação encontram-se no Quadro 3.3.

Componentes	Valor	Unidades
λ_{xps}	0,04	W/m°C
$\lambda_{Madeira}$	0,21	W/m°C
R _{si} +R _{se}	0,17	m ² °C/W
h' _{se}	25	W/m ² °C
h' _{si}	7,69	W/m ² °C

Quadro 3.3 – Valores de coeficiente de condutibilidade térmica e de resistência superficial interior e exterior utilizados

As componentes referidas como Exterior são admitidas como sendo referentes à câmara fria, e as componentes referidas como Interior são referentes à câmara quente.

Para uma melhor compreensão do funcionamento do programa THERM, é feita uma explicação do processo até à obtenção do resultado final. O programa tem integrado uma barra de ferramentas para várias opções, como representada pela Figura 3.6, ainda assim, segue-se por três etapas (Amorim, 2016):

- Geometria, onde há possibilidade de escolher a escala que se pretende trabalhar;
- Parâmetros do material, é necessário introduzir-se certas propriedades do material, a condutividade e emissividade;
- Condições de fronteira, é necessário a introdução de temperaturas ambientes (θ) e coeficiente combinado de transferência de calor por convecção e radiação (h').

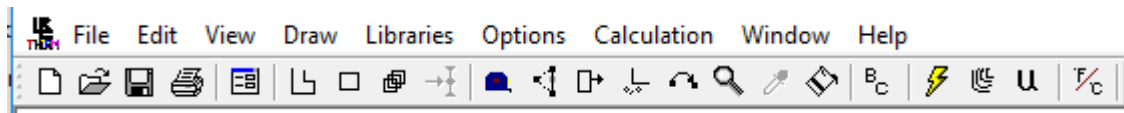


Figura 3.6 – Barra de ferramentas do programa THERM.

A barra apresenta-se dividida em diversos comandos e inclui opções de armazenamento de ficheiros, execução de desenhos, definição de fronteiras, cálculo da malha dos elementos finitos, definição de unidades.

Casos de Estudo

3.3.1.1 Caso 1

Neste primeiro caso proceder-se-à a uma explicação mais aprofundada do programa, nos restantes casos o processo irá decorrer de forma idêntica. Na Figura 3.7 apresenta-se a primeira geometria analisada correspondente a uma ligação de fachada com o pavimento intermédio apenas usando Madeira.

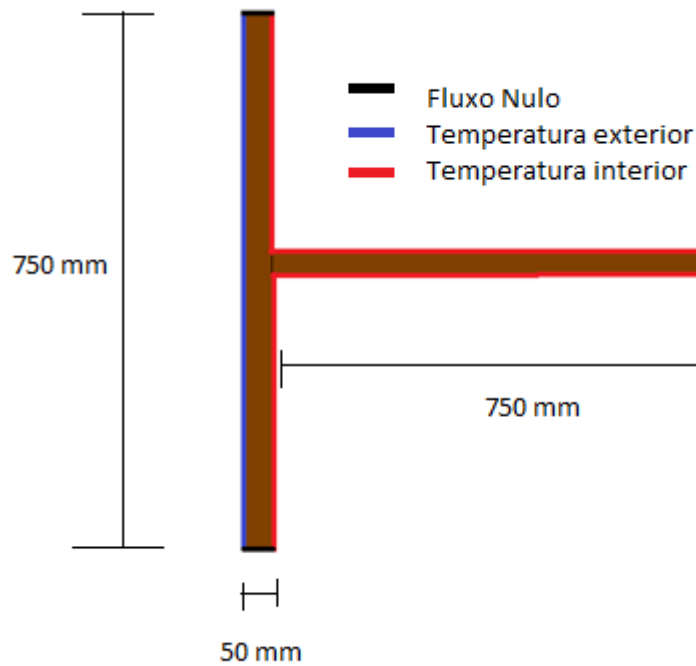


Figura 3.7 – Representação das condições de fronteira para o Caso 1

No software usado, temos de definir todas as condições e características referidas atrás, como é demonstrado na Figuras 3.8:

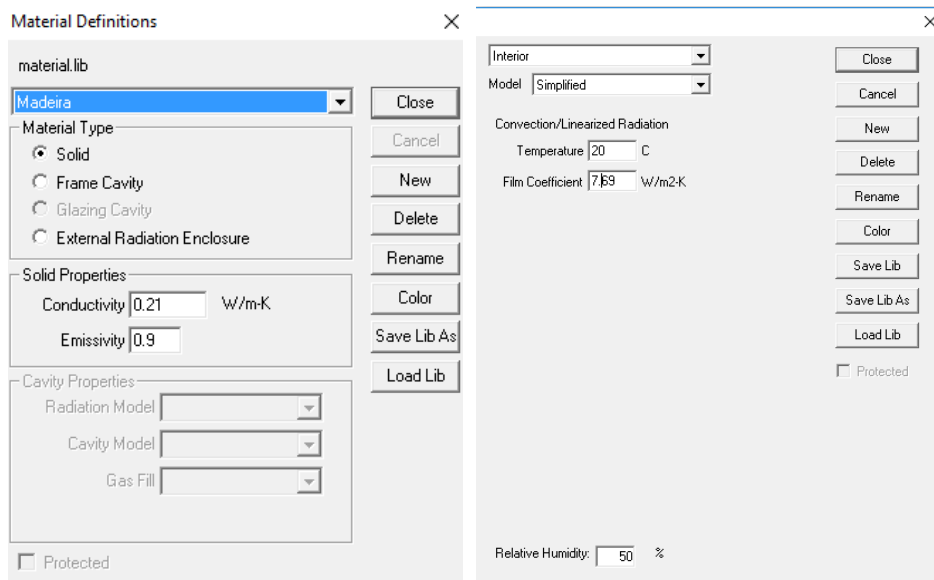


Figura 3.8 – Interface para definição do material e das condições de fronteira do programa THERM

Para se efetuar a simulação e obter os resultados, é necessário estabelecer as condições de fronteira do problema, como mostra a Figura 3.9, para a interface interior.

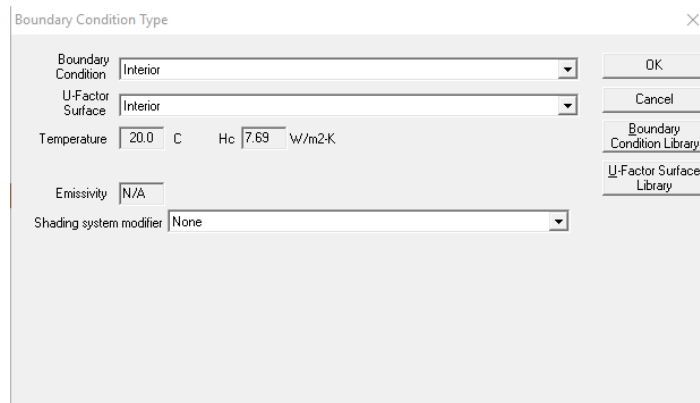


Figura 3.9 – Definição do coeficiente de transmissão térmica.

Após a realização dos passos anteriores chegou a altura de fazer o cálculo, mais propriamente dito. Na barra apresentada na Figura 3.6, encontra-se um comando para se proceder ao cálculo, de onde se podem extrair diversas informações, como mostra a Figura 3.10:

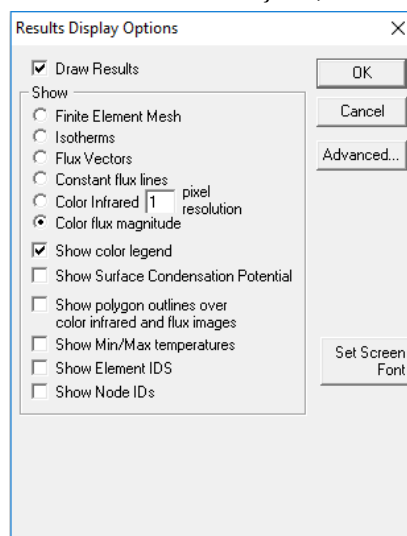


Figura 3.10 – Interface de opções de visualização de resultados no THERM.

Desta forma poderão ser obtidas informações, tais como as apresentadas na Figura 3.11:

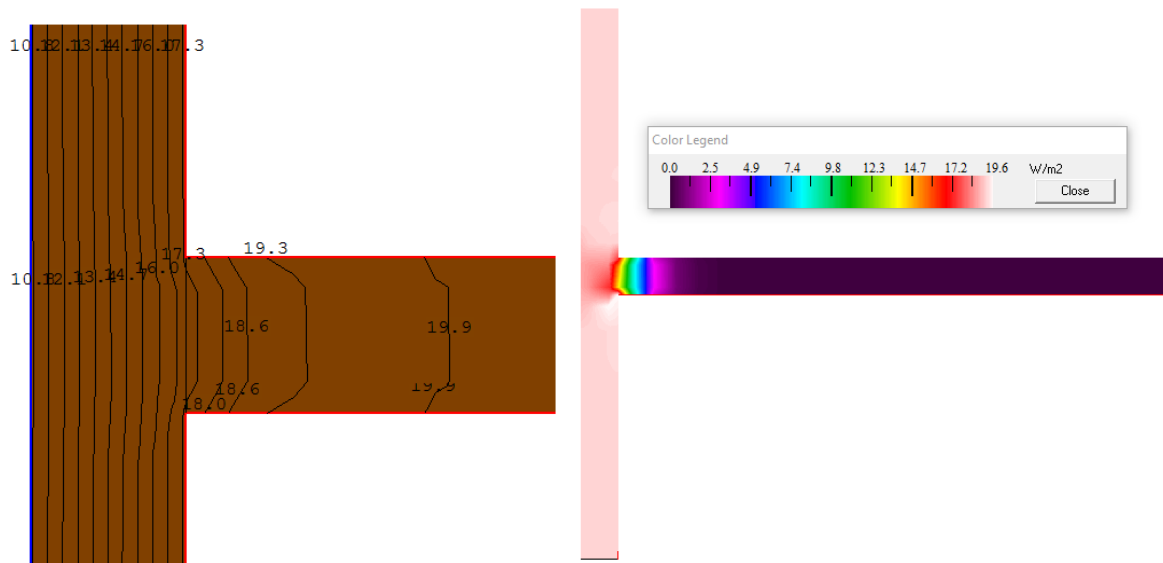


Figura 3.11 – Representação das linhas isotérmicas e gradiente de temperatura para o Caso 1

Do programa usado tiramos, por fim, o valor do coeficiente de transmissão térmica global, U, para interior e exterior, como apresentado na Figura 3.12:

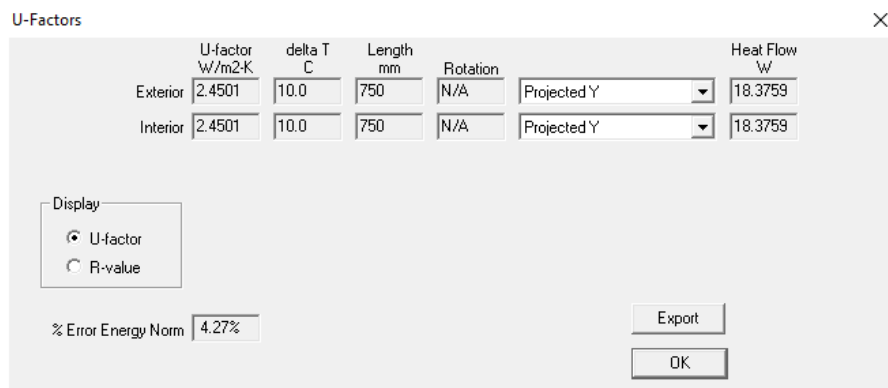


Figura 3.12 – Interface do cálculo do coeficiente de transmissão térmica para o Caso 1

Obtendo ainda um valor para o Fluxo de calor na última coluna da Interface. Depois do cálculo do U, através do software, é possível ser feita a determinação do valor do coeficiente de transmissão térmica linear, ψ . O cálculo pode ser feito através do $U_{interior}$ ou $U_{exterior}$, o valor obtido terá de ser igual. O cálculo efetua-se então da seguinte forma:

$$U_{interior} = 2,4501 \text{ W /m}^2\text{°C}$$

$$U_{exterior} = 2,4501 \text{ W /m}^2\text{°C}$$

Assim $\psi_{interior} = 2,4501 \times (0,75) = 1,838 \text{ W /m}^2\text{°C}$

$$\phi_{exterior} = 2,4501 \times (0,75) = 1,838 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

O coeficiente de transmissão térmica, na zona corrente, obtém-se:

$$\frac{1}{U_{parede}} = 0,17 + \frac{0,05}{0,21} \leftrightarrow U_{parede} = 2,450 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Então } \psi_{interior} = 1,838 - 2,450 \times (0,7) = 0,12 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\psi_{exterior} = 1,838 - 2,450 \times (0,7) = 0,12 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Pelos cálculos demonstrados acima, temos uma ideia dos parâmetros que influenciam diretamente o valor do coeficiente de transmissão térmica linear. É então de realçar que a diferença de temperatura não entra no cálculo do mesmo e que depende sim, dos elementos construtivos e sua geometria. Pelo facto de a diferença de temperaturas não interferir no cálculo, foi adotada a mesma diferença de temperatura para todos os casos de estudo. Para os casos seguintes apenas irão ser apresentados o cálculo para um dos valores de U retirado do THERM.

3.3.1.2 Caso 2

Adotando a sequência de passos do Caso 1, vai ser feita uma apresentação dos resultados obtidos.

Na Figura 3.13 apresenta-se a geometria correspondente a uma ligação fachada com pavimento intermédio, com isolamento pelo exterior.

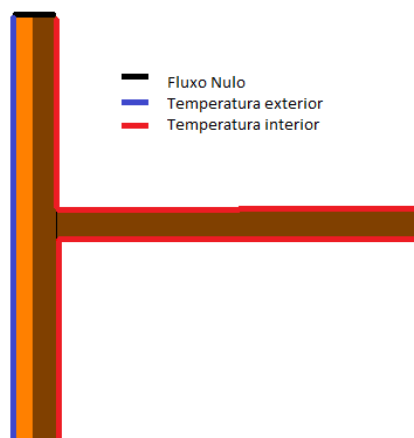


Figura 3.13 – Condições de fronteira para o Caso 2

Com a apresentação direta de resultado obtemos então a representação das linhas isotérmicas e do gradiente de temperatura para o segundo caso, como é demonstrado na Figura 3.14:

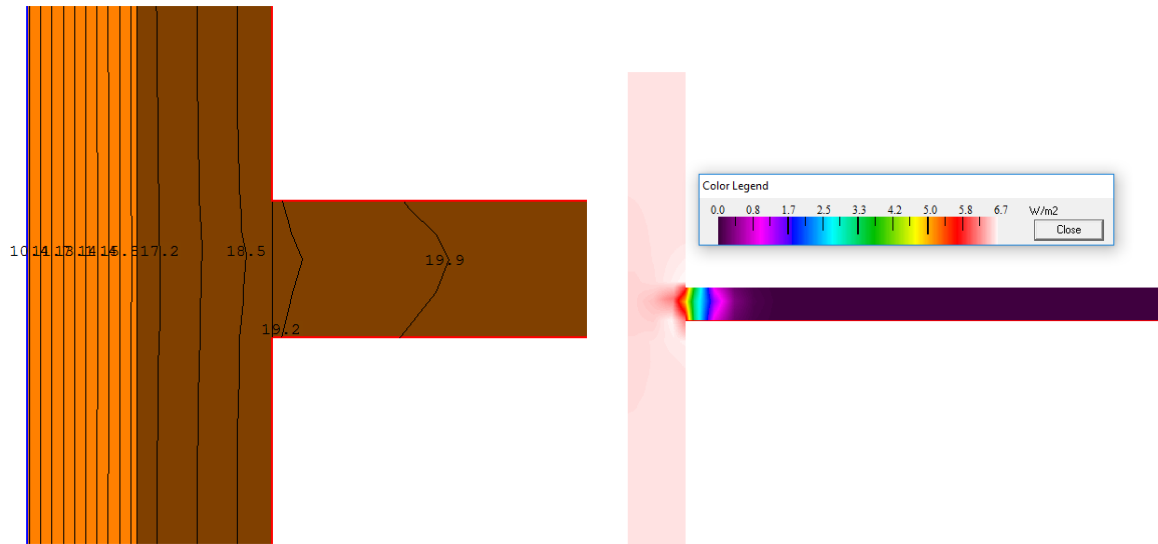


Figura 3.14 – Representação das linhas Isotérmicas e gradiente de temperatura para o Caso 2

Obtendo então o valor do coeficiente de transmissão térmica, U , temos apresentados os valores, para interior e exterior, na Figura 3.15.

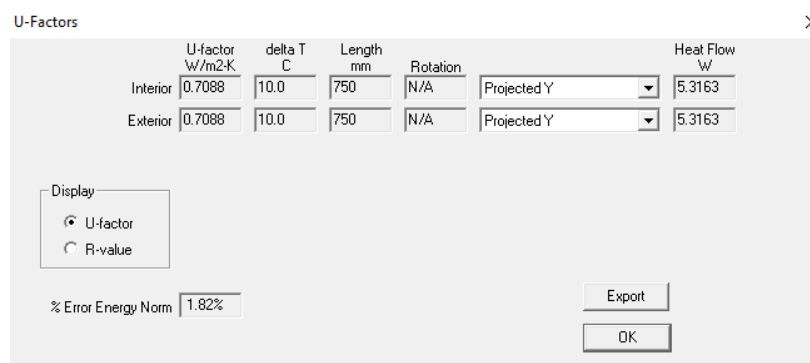


Figura 3.15 - Interface do cálculo do coeficiente de transmissão térmica para o Caso 2

Aplicando cálculos semelhantes aos usados para o Caso 1, obtemos:

$$U_{ext} = 0,7088 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Então

$$\phi_{ext} = 0,7088 \times (0,75) = 0,532 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

Com

$$\frac{1}{U_{parede}} = 0,17 + \frac{0,05}{0,21} + \frac{0,04}{0,040} \rightarrow U_{parede} = 0,710 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Assim

$$\psi_{ext} = \psi = 0,532 - 0,710 \times 0,70 = 0,034 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

3.3.1.3 Caso 3

Na Figura 3.16 é apresentada a geometria correspondente a uma ligação fachada com pavimento intermédio.

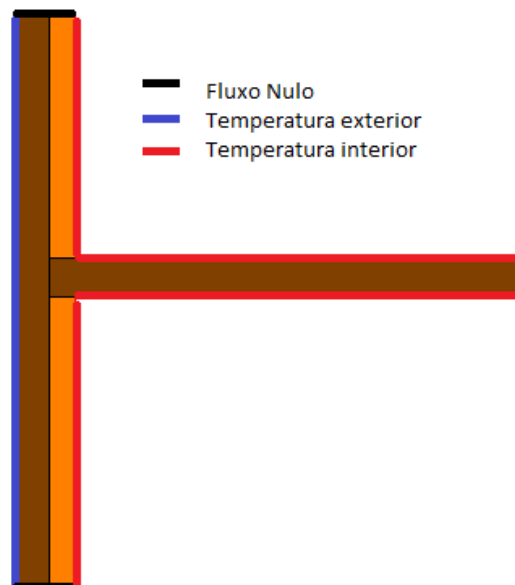


Figura 3.16 - Representação das condições de fronteira do Caso 3

Desta forma poderão ser obtidas informações como, representação das linhas isotérmicas e do gradiente de temperatura, apresentadas na Figura 3.17.

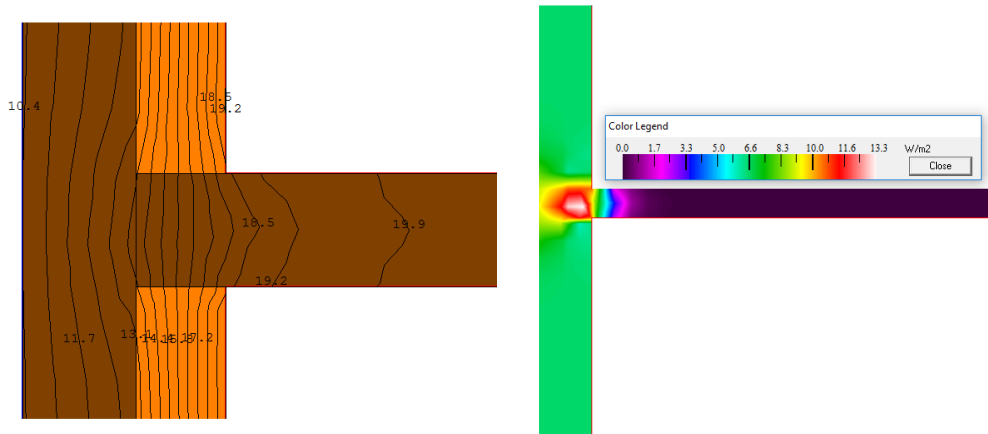


Figura 3.17 - Representação das linhas isotérmicas e gradiente de temperatura para o Caso 3

Obtendo então o valor do coeficiente de transmissão térmica global apresentado na Figura 3.18.

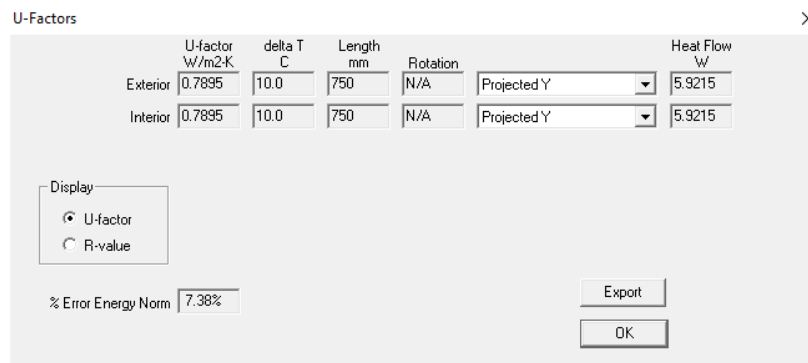


Figura 3.18 - Interface do cálculo do coeficiente de transmissão térmica para o Caso 3

Irão agora sem apresentados os cálculos e os valores usado para se chegar ao valor do coeficiente de transmissão térmica linear, ψ .

$$U_{ext} = 0,7895 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Então

$$\phi_{ext} = 0,7895 \times (0,75) = 0,592 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

Com

$$\frac{1}{U_{parede}} = 0,17 + \frac{0,05}{0,21} + \frac{0,04}{0,040} \rightarrow U_{parede} = 0,710 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Assim

$$\psi_{ext} = \psi = 0,592 - 0,710 \times 0,70 = 0,095 \text{ W/m}^2\text{C}$$

3.3.1.4 Caso 4

Na Figura 3.19 apresenta-se uma geometria correspondente à ligação fachada com varanda, apenas constituída por Madeira.

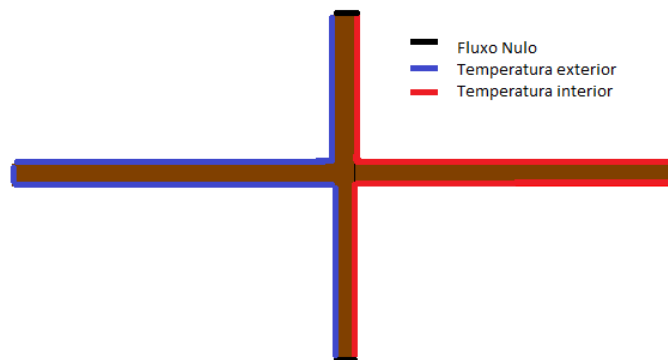


Figura 3.19 – Representação das condições de fronteira do Caso 4

Desta forma poderão ser obtidas informações como, representação das linhas isotérmicas e do gradiente de temperatura, apresentadas na Figura 3.20 e Figura 3.21.

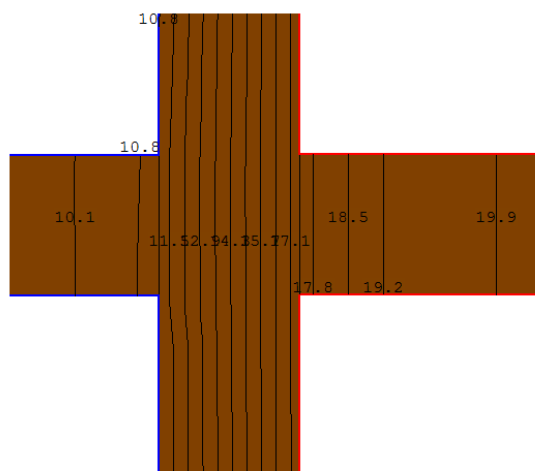


Figura 3.20 – Representação das linhas isotérmicas do Caso 4

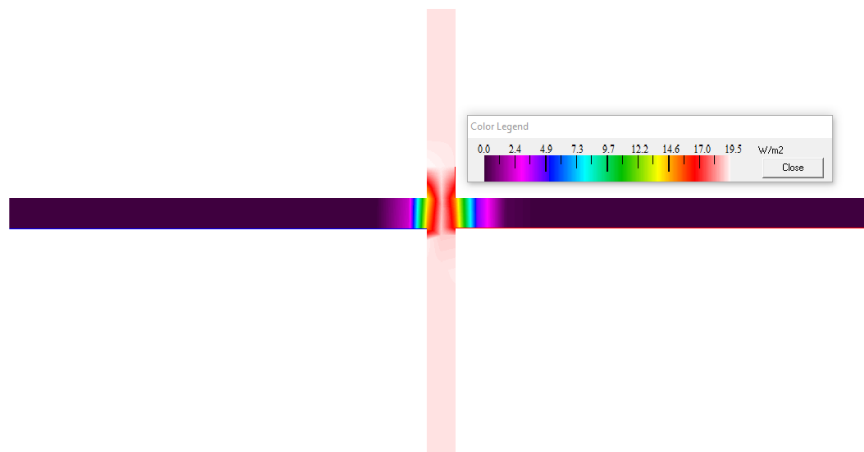


Figura 3.21 – Representação do gradiente de temperatura do Caso 4

Obtendo então o valor do coeficiente de transmissão térmica global apresentado na Figura 3.22.

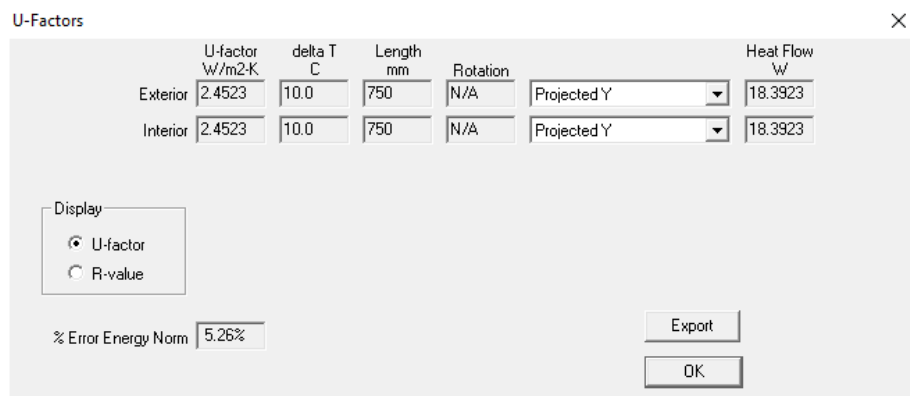


Figura 3.22 – Interface do cálculo do coeficiente de transmissão térmica para o Caso 4

Após a apresentação dos resultados obtidos pelo programa THERM, vão ser realizados os cálculos para a obtenção do valor do coeficiente de transmissão térmica linear, ψ .

Do THERM sai que

$$U_{ext} = 2,4523 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Então

$$\phi_{ext} = 2,4523 \times (0,75) = 1,839 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

Com

$$\frac{1}{U_{parede}} = 0,17 + \frac{0,05}{0,21} \rightarrow U_{parede} = 2,450 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Assim

$$\psi_{ext} = \psi = 1,839 - 2,450 \times 0,70 = 0,12 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

3.3.1.5 Caso 5

Na Figura 3.23 é representada a configuração para uma ligação fachada com varanda com isolamento pelo exterior.

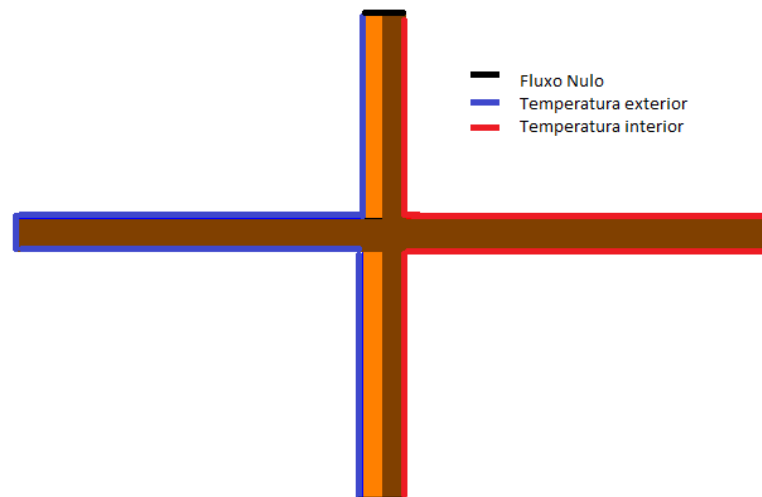


Figura 3.23 – Representação das condições de fronteira para o caso 5

Desta forma poderão ser obtidas informações como, representação das linhas isotérmicas e do gradiente de temperatura, apresentadas na Figura 3.24 e Figura 3.25.

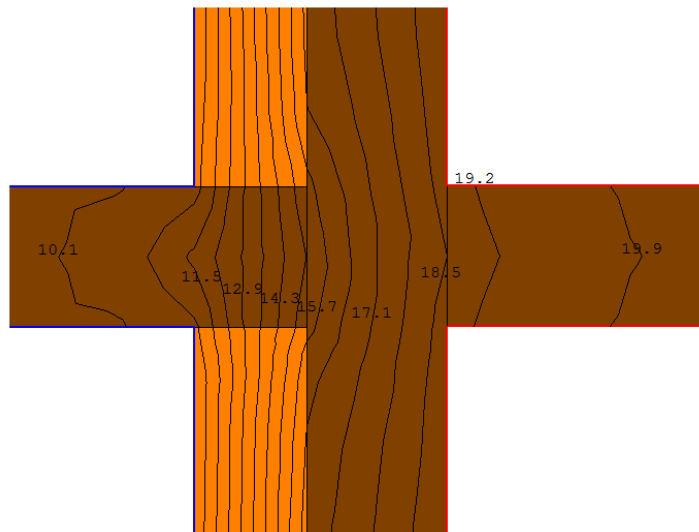


Figura 3.24 – Representação das linhas isotérmicas do Caso 5

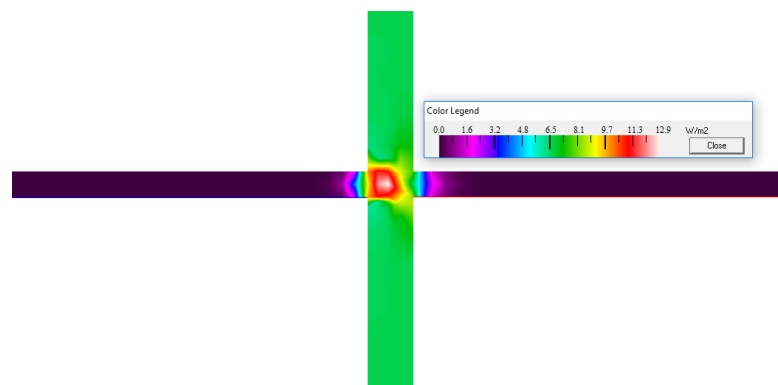


Figura 3.25 – Representação do gradiente de temperatura

Obtendo valores para o coeficiente de transmissão térmica global, mostrado na Figura 3.26.

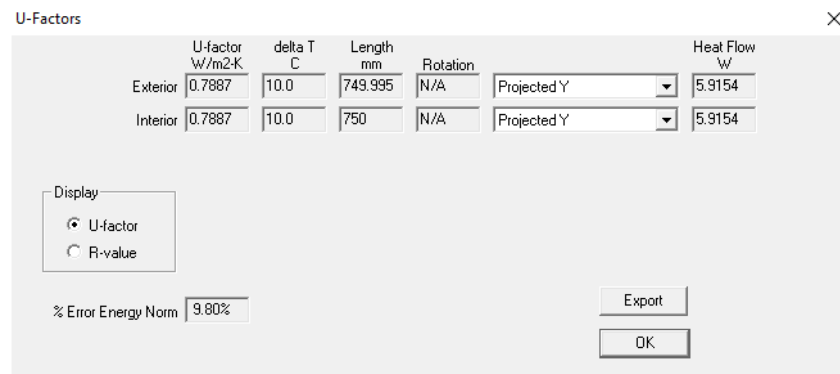


Figura 3.26 – Interface do cálculo do coeficiente de transmissão térmica para o Caso 5

Irão agora sem apresentados os cálculos e os valores usado para se chegar ao valor do coeficiente de transmissão térmica linear, ψ .

$$U_{ext} = 0,7887 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Então

$$\phi_{ext} = 0,7887 \times (0,75) = 0,592 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

Com

$$\frac{1}{U_{parede}} = 0,17 + \frac{0,05}{0,21} + \frac{0,04}{0,040} \rightarrow U_{parede} = 0,710 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Assim

$$\psi_{ext} = \psi = 0,592 - 0,710 \times 0,70 = 0,094 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

Para a abordagem experimental, foi usada um protótipo de *hot-box* de dimensões reduzidas sendo o método definido pela norma ASTM 1363-11 – “*Standard test method for thermal performance of building materials and envelope assemblies by means of a hot box apparatus*”. A *hot-box* utilizada foi construída no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, que não corresponde a um modelo de mercado. Este método é usado para amostras de elementos de construção que seja possível construir um exemplar que encaixe no aparelho usado. É importante referir que os ensaios feitos e as medições feitas, são sempre em regime permanente.

Os parâmetros medidos em laboratório são a temperatura ambiente (tanto na câmara fria como na câmara quente), temperaturas superficiais medidas em diversos pontos da solução em estudo, novamente nas duas câmaras usadas, os fluxos de calor que atravessam o elemento da câmara com a temperatura mais alta para a câmara da temperatura mais baixa e faz-se, ainda, a contabilização do consumo de energia. Através destes dados são obtidas informações tais como, resistência térmica, condutibilidade térmica e o coeficiente de transmissão térmica. Este último é obtido usando dois métodos possíveis, para configurações homogêneas é possível fazer como indicado na norma, usando dados dos fluxímetros ou por uma equação do método baseado no consumo de energia para soluções heterogêneas.

4.2 Equipamentos

Os equipamentos usados para determinação dos parâmetros necessários para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear são:

- Termofluxímetros, servem para fazer a medição do fluxo de calor que atravessa parte do modelo onde se encontra fixado na amostra da câmara da temperatura mais alta para a câmara da temperatura mais baixa. Os termofluxímetros que foram utilizados no trabalho experimental estão representados na Figura 4.1. De referir ainda que o equipamento é sensível a temperaturas entre os -30°C e os $+70^{\circ}\text{C}$, tendo uma

sensibilidade aproximada de $50\mu V/Wm^2$. Foi necessário o reajustar das unidades dos valores do fluxo, inicialmente registadas em mV , sendo que as unidades pretendidas são em W/m^2 ;

- Termopares ou sensores de temperatura, servem para fazer a medição de temperaturas ambientes (na *box* quente e fria) e temperaturas superficiais (na *box* quente e fria) em diferentes pontos, recorrendo-se posteriormente a uma média aritmética. Os termopares disponíveis no mercado têm os mais diversos formatos, sendo distinguíveis pelo tipo de metal e o calibre de seus fios. No trabalho foram usados do tipo K representados na Figura 4.1. Tendo uma gama de temperaturas entre os $-200^{\circ}C$ e os $+1260^{\circ}C$, com uma sensibilidade aproximada de $41\mu V/^{\circ}C$;
- Datalogger torna possível o registo dos dados dos fluxímetros e dos termopares. O dispositivo disponível para a realização do trabalho é um modelo TC-08, da marca Pico Technology apresentado na Figura 4.1, preparado para registar uma vasta gama de temperaturas utilizando qualquer termopar. O modelo tem oito canais para receber informação dos termopares ou fluxímetros. Como o aparelho não tem memória interna é necessário a conectividade a uma porta USB de um Computado para o registo dos dados.
- Medidor de energia, para se fazer a quantificação da energia consumida pelos diversos aparelhos elétricos na câmara quente. O dispositivo utilizado era digital do modelo EM6000 da marca Bachmann como mostra a Figura 4.1. É possível com o medidor de energia obter valores de consumo, previsões de custo, valores das emissões de CO_2 , período de medição, voltagem, tensão e energia efetiva;
- Computador para registo dos dados é realizado com a ajuda de software de dados PicoLog, onde recebe diretamente dados do Datalogger.



Figura 4.1 – Representação dos equipamentos usados: Termofluxímetro de modelo HFP01 da marca Hukseflux; Termopar do tipo K; Datalogger; Medidor de energia

Todos os equipamentos referidos acima são necessários no estudo laboratorial de *hot-box*. Na *hot-box*, representada na Figura 4.2 é colocada uma amostra entre as duas câmaras termicamente isoladas. A ligação das duas câmaras é feita por perfis de borracha que se traduz numa estanquidade do ar e num adequado isolamento térmico. Como referido anteriormente,

as temperaturas são mantidas constantes em regime permanente. A amostra onde se pretende fazer os ensaios é de 0,73x0,71 m, sendo esta a dimensão da câmara quente, sendo a câmara fria de dimensão 0,81x0,81 m.

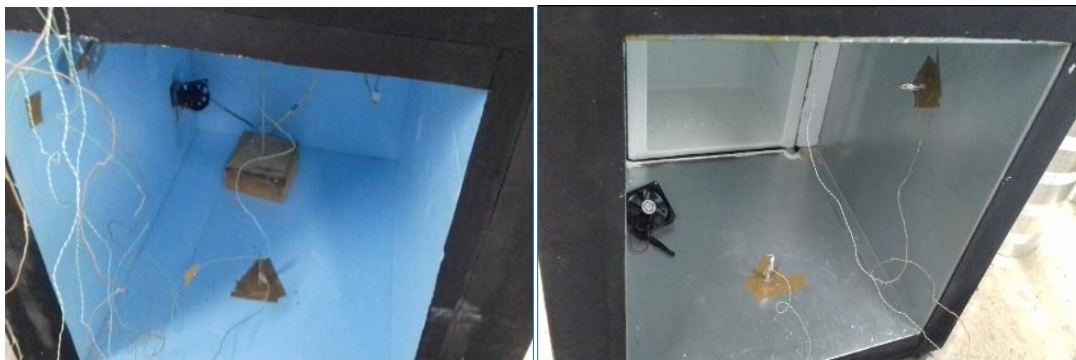


Figura 4.2 – Interior da câmara quente e interior da câmara fria

A câmara quente tem por base uma resistência regulável com corrente contínua que permite obter valores de temperatura até aproximadamente +42°C, sendo a envolvente constituída de uma camada de 100 mm de espessura de espuma rígida de poliuretano expandido, revestida com 40 mm de poliestireno extrudido. A câmara fria usa um sistema de refrigeração contínua tendo por base uma máquina frigorífica, que permite temperaturas com valor próximo dos 5°C, sendo a envolvente constituída por uma camada de 100 mm de espuma rígida de poliuretano expandido (Abreu, 2015).

4.3 Metodologia Experimental

De forma a se conseguir obter resultados através do ensaio laboratorial é necessário proceder a diversas fases de preparação e de recolha de dados. Para tal o primeiro passo é destinado à montagem dos provetes na abertura da câmara. Tendo o primeiro passo sido realizado, procede-se à colocação dos equipamentos de medição nas superfícies do provete em estudo, como termofluxímetros e termopares. Para além dos equipamentos de medição na superfície do provete é necessário a colocação de termopares dentro das câmaras para se fazer a medição das temperaturas ambientes dentro das mesmas, tanto para a câmara quente como para a câmara fria. Sendo todos os aparelhos de medição conectados a um datalogger, que por sua vez é ligado a um computador. É registado o consumo de energia na câmara quente, por um medidor de energia colocado na ligação da câmara quente com a corrente elétrica. Procedendo-se então ao início do ensaio, servindo este início do ensaio para se fazer uma estabilização das temperaturas de ambas as câmaras, porque como dito anteriormente, as

medições são feitas em regime permanente de temperatura. Após a estabilização das temperaturas ambientes e superficiais do conjunto *hot-box* começa a recolha de dados, que irão posteriormente ser estudados e analisados. Por fim, após a recolha dos dados, é a altura de se fazer o cálculo e análise dos resultados experimentais e teóricos, finalizando com uma comparação entre os resultados.

4.3.1 Provetes

Os ensaios foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, começando pela calibração ou confirmação da calibração da *hot-box*. Usando uma solução com características já conhecidas, como é o caso de uma solução de poliestireno extrudido (XPS), em que o valor do coeficiente de condutibilidade térmica (λ) toma o valor de 0,037 W/m°C, tendo confirmado o mesmo valor. Os ensaios realizados foram feitos essencialmente com 2 materiais distintos:

- Madeira Mogno com 50 mm de espessura;
- Poliestireno extrudido com 40 mm de espessura.

Combinando estes dois tipos de materiais criaram-se diferentes situações de cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear. As soluções ensaiadas têm dimensão de 0,72x0,71 m colocadas na abertura da câmara quente. De referir que para os casos de ponte térmica linear e para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear a área adotada foi de 0,68x0,68 m. Isto devido a um acréscimo de isolante (Figura 4.4) para garantir a estanquidade do mesmo, fazendo com que diminuísse a área de estudo.

4.3.2 Instalação de equipamentos

Os equipamentos usados são referidos na seção 4.1, é apenas de realçar a colocação e a quantidade de cada equipamento em uso.

Para os ensaios iniciais onde o principal objetivo era a obtenção das características dos materiais usados, nomeadamente o valor do coeficiente de condutibilidade térmica da madeira e do XPS, foi apenas usado um termofluxímetro no centro geométrico do provete em estudo. Visto ser, em alguns casos, apenas um elemento homogéneo ou dois elementos sobrepostos, provou-se suficiente. Para ensaios posteriores, em que já estava envolvido um elemento transversal que provocasse uma ponte térmica, foram usados dois termofluxímetros, um no centro do provete (onde se encontrava a ponte térmica) e outro desviado da ponte térmica, numa situação de superfície homogénea chamada zona corrente.

Em todos os ensaios foram usados três sensores de temperatura no interior da câmara quente e três sensores no interior da câmara fria para se obter valores de temperatura superficiais. Os três sensores em cada câmara estavam distribuídos na face interior, superior e lateral.

Com um total de quatorze termopares usados, sendo que seis deles são para medição de temperaturas ambientes das câmaras, os restantes oito foram usados para medição de temperaturas superficiais. Sendo que a medição de temperaturas superficiais tem de ser feita, tanto na câmara quente como também na câmara fria, dividiu-se igualmente pelas superficiais do provete, quatro termopares para a câmara fria e outros tantos para a câmara quente. A distribuição usada para os ensaios foi distinta para ensaios com ponte térmica e ensaios em que o objetivo era fazer o reconhecimento de características dos materiais.

Assim sendo para se fazer o reconhecimento das características dos dois materiais foi usada uma configuração idêntica à da Figura 4.3.

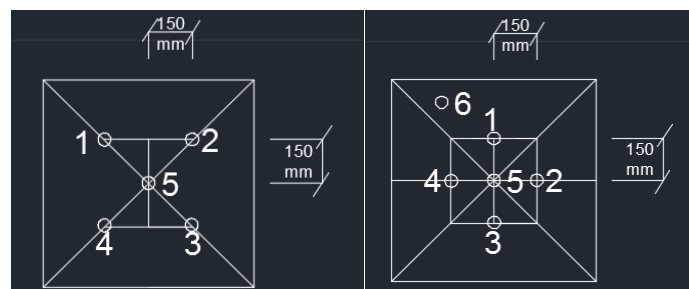


Figura 4.3 – Pontos de colocação dos equipamentos de medição e pontos de colocação dos equipamentos de medição para pontes térmicas

Os pontos 1,2,3 e 4 são os pontos de colocação dos termopares e ponto 5 é para o termofluxímetro, na superfície que fica na câmara fria. Para a câmara quente apenas se trata de fazer o estudo dos pontos 1,2,3 e 4.

Para os casos de estudo em que envolve ponte térmica fez-se um reajustamento de alguns pontos de medição, como é mostrado na Figura 4.3. Sendo que a ponte térmica linear se encontra na linha que liga os pontos 2,5 e 4, mas de uma extremidade à outra do provete. Assim sendo, como no ensaio anterior, os pontos numerados de 1 a 4 são termopares, o ponto 5 é um termofluxímetro colocado na ponte térmica e o ponto 6 é o termofluxímetro para a zona corrente.

Quanto a fixação dos equipamentos de medição no provete é fundamental ter como opção um material termicamente neutro para que os resultados não sejam influenciados. Portanto optou-se por uma massa adesiva nas extremidades e também fita adesiva nos cabos para se fazer a fixação dos sensores, tendo em conta que a fita adesiva não pode estar sobreposta aos sensores nas extremidades ou demasiado próxima, para, de novo, não ter influência nos resultados obtidos. Nos termofluxímetros, foi usada uma camada fina de pasta de dentífrica na superfície e complementado com fita adesiva nos cabos.

As soluções de madeira usadas fazem o encaixe na abertura da câmara quente, apesar disso, existe uma circulação de ar. Para evitar esta situação comprometedora dos resultados, optou-se, nos casos em que o provete apenas seja a madeira, por colocar no perímetro em que seja possível a circulação do ar, uma camada de aglomerado de espuma poliuretano flexível como mostra a Figura 4.4, para ser garantida a estanquidade.



Figura 4.4 – Isolante que garante a estanquidade na ligação entre as câmaras

4.3.3 Levantamento de dados

Após a preparação dos provetes e de todos os equipamentos envolvidos, deu-se início ao levantamento de dados através do *datalogger* conectado computador para registo de dados. É necessário, em primeiro lugar, fazer a estabilização das temperaturas e dos fluxos (regime permanente). Dependendo das condições desejáveis, da propriedade do material em estudo, das condições iniciais e das propriedades da *hot-box*, assim varia o tempo necessário até atingir o estado de regime permanente.

Para registo de dados optou-se por retirar a medição dos valores da energia despendida para a câmara quente após a estabilização da temperatura e dos fluxos e num intervalo de tempo suficientemente grande para se fazer uma média aproximada em kWh/h.

As leituras do *datalogger* ligado ao computador optou-se por fazer um registo de uma amostra a cada 15 minutos.

4.3.4 Análise de Resultados

Como referido no início deste capítulo podem ser usados dois métodos distintos de abordagem para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica. O método tendo em conta a média do fluxo de calor que atravessa a amostra e o segundo método que tem em conta o consumo de energia.

O primeiro método usado tem em conta, como dito, a média do fluxo de calor que atravessa a amostra, a média das temperaturas superficiais de cada um dos lados da amostra e tem em conta as resistências superficiais, interior e exterior. Para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica, U , é usado a equação:

$$U = \frac{Q}{A(T_i - T_e)} \quad (19)$$

Onde:

- U – Coeficiente de transmissão térmica, dado em $W/m^2\text{°C}$;
- Q - Fluxo de calor que atravessa o provete, dado em W/m^2 ;
- A - Área da superfície da amostra, dado em m^2 ;
- T_i - Temperatura ambiente média na câmara quente (interior), em °C ;
- T_e – Temperatura ambiente média na câmara fria (exterior), em °C .

Para o cálculo do coeficiente de condutibilidade térmica, λ , de um material dado em $W/m\text{°C}$, vem em função de:

$$\lambda = \frac{Q \times e}{(T_{si} - T_{se})} \quad (20)$$

Em que:

- Q - Fluxo de calor que atravessa a abertura da câmara em W/m^2 ;
- e - Espessura da amostra em m;
- T_{si} - Temperatura superficial média na superfície quente (interior), em °C ;
- T_{se} – Temperatura superficial média na superfície fria (exterior), em °C ;

No segundo método pretende-se determinar as perdas de calor através do provete a partir da contabilização do consumo de energia. Para o efeito utilizou-se um medidor de energia que permitiu avaliar o consumo que resulta da resistência, da ventoinha e do sistema de medição. Seguidamente retirou-se a este valor, o valor do consumo de energia do sistema de medição e das perdas pela envolvente da câmara quente, obtendo-se deste modo as perdas através do provete.

Num ensaio laboratorial realizado anteriormente, no mesmo laboratório, à realização deste trabalho, foi feito um estudo sobre as perdas de calor pelas cinco faces da envolvente da câmara quente, só excluindo a face em que esta contido o provete em estudo. Sabendo os gastos de energia pela ventoinha e pela resistência, descontando os valores de perda de energia pelas envolventes da câmara quente, é possível chegar ao valor da quantidade de energia que atravessa o provete desde a câmara quente até à câmara fria. Fazendo-se uma medição do valor dos gastos de energia pelo sistema de medição, chegou-se a um valor aproximado de 3Wh/h. Os resultados do estudo anteriormente realizados sobre as perdas de energia pela envolvente da câmara quente estão apresentados, sumariamente, no Quadro 4.1:

ΔT	11	13	14	20
Perda (Wh/h)	12.50	14.97	17.21	24.74

Quadro 4.1 – Valores das perdas de energia pelas faces da envolvente da câmara quente

Nos casos estudados a diferença de temperatura é superior aos 20°C considerados no Quadro 4.1, assim sendo optou-se por considerar um valor de perdas pelas faces da envolvente da câmara quente de 26Wh/h, ficando uma perda total entre sistema e faces da câmara quente de aproximadamente 29 Wh/h. Só de referir que a diferença de temperaturas apresentadas é entre o valor de temperatura da câmara quente e o valor da temperatura ambiente.

Para se obter um valor para o coeficiente de transmissão térmica linear, ψ , segue-se pelas equações descritas de seguida:

$$Q = U \times A \times \Delta T + \psi \times L \times \Delta T \quad (21)$$

Alterando a expressão (21) para ficar em função do coeficiente, dado em W/m°C, que se pretende calcular, toma a forma de:

$$\psi = \frac{Q}{L \times \Delta T} - \frac{U \times A}{L} \quad (22)$$

Sendo que:

- Q - Fluxo de calor global que atravessa a área do provete em estudo, em W/m²;
- A - Área da faixa da ponte térmica linear em estudo, em m²;
- ΔT - Diferença de temperaturas ambientes, em °C;
- U - Coeficiente de transmissão térmica, dado em W/m²°C.

Para a obtenção das diferentes resistências superficiais, é usada a equação (23):

$$(R_{se} + R_{si}) = \frac{1}{U} - \frac{e}{\lambda} \quad (23)$$

4.3.5 Precisão dos resultados

Em ensaios deste tipo a ocorrência de erros podem ocorrer por via humana ou material. Sendo que a via humana pode ser traduzida por deficiente fixação de termopares ou termofluxímetros, ou de deficiente montagem do provete a ser testado. Os erros materiais ocorrem mais inesperadamente, pode ser falha de um termopar ou termofluxímetros, simplesmente não darem leitura pelo material deixar de funcionar. Mas todos os erros podem ter influência externa, como alteração das condições ambientes do laboratório que provoca menores ou maiores perdas pelas faces da envolvente que o esperado. Não havendo uma margem de erro quantitativa simples a apontar para ser aplicada aos casos de estudo.

4.4 Casos de Estudo

Irão ser apresentados de seguida casos de estudos idênticos aos casos de estudo apresentados no Capítulo 3, em que foi usado o programa THERM. Seguindo o mesmo número para os mesmos casos apresentados no capítulo anterior. Especificar os cálculos para o caso 1 para servir de exemplo de cálculo dos restantes casos. Os ensaios foram medidos pelo número de amostras, cada amostra foi retirada com 15 mins de intervalo entre si.

Antes dos casos de estudo das pontes térmicas lineares, irão ser apresentados resultados dos estudos realizados para obtenção de parâmetros dos materiais, da placa de XPS com 40 mm de espessura e placa de madeira de 35 mm de espessura, que através de cálculos se traduzem os parâmetros para 50 mm de espessura. Devido a grande diferença de temperatura entre as câmaras, a placa de madeira de 35 mm ficou deformada, como resultado optou-se por realizar os restantes ensaios com um provete de maior rigidez.

De referir que para todos os casos de estudo, houve leituras de temperaturas que não foram consideradas, devido a darem erros de leitura.

4.4.1 XPS e Madeira

4.4.1.1 XPS

Nas Figuras 4.5 e 4.6 faz-se a apresentação das temperaturas e do fluxo pelo termofluxímetro. Nestas figuras as designações “Quente1”, “Quente2”, “Quente3” e “Quente4” referem-se aos registos obtidos nos termopares posicionados do lado quente da amostra; as designações “Quente baixo”, “Quente lado” e “Quente cima” indicam as temperaturas no interior da câmara quente; as designações “Frio1” e “Frio4” referem-se aos registos obtidos nos termopares posicionados do lado frio da amostra; as designações “Frio lado”, “Frio cima” e “Frio baixo” indicam as temperaturas no interior da câmara fria.

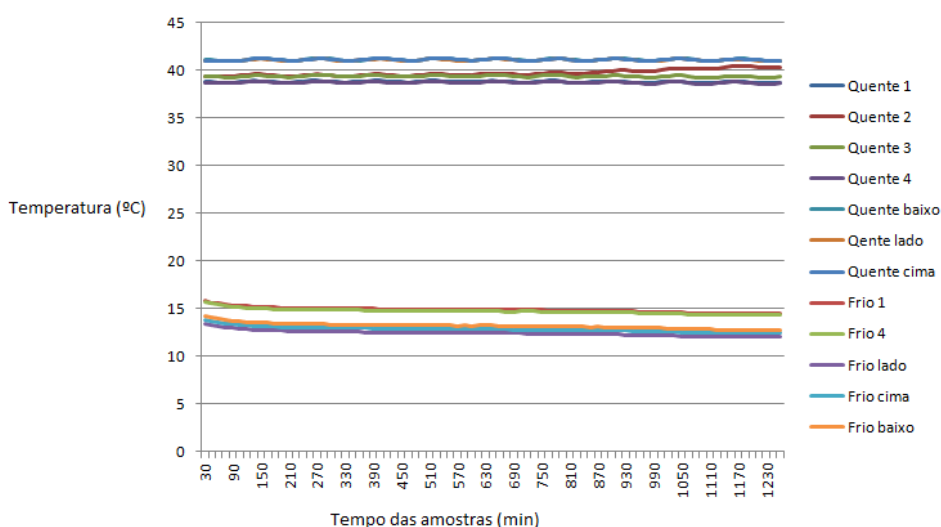


Figura 4.5 – Representação gráfica da variação das temperaturas para XPS

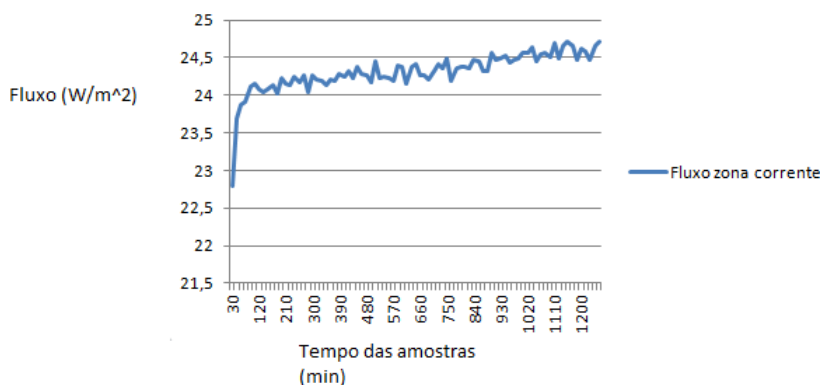


Figura 4.6 – Representação gráfica da variação do fluxo para XPS

Tendo retirado a leitura dos gastos de energia, fica resumido no Quadro 4.2 e no Quadro 4.3 a representação das médias de temperatura e de fluxo, após a estabilização:

Leituras	Hora	Data	Energia (kWh)	Q (W/m ²)
Início	09:05	14_12	8,933	24,4431
Fim	14:26	14_12	9,155	
Diferença	5,35	Horas		

Quadro 4.2 – Apresentação da leitura da energia para XPS

	Superficiais		Ambientais	
	Interior	Exterior	Interior	Exterior
Temperaturas (°C)	39,16	14,8	41,12	12,83

Quadro 4.3 – Apresentação da média de temperaturas para XPS

Fluxo médio obtido toma o valor de 24.3152 W/m². Usando as fórmulas (19) para o cálculo de U, fórmula (20) para cálculo de λ e fórmula (23) para cálculo de ($R_{se}+R_{si}$), tendo obtido os seguintes valores:

Ufluxo	0,86	W/m ² °C
λ fluxo	0,04	W/m°c
λ energia	0,04	W/m°c
Uenergia	0,86	W/m ² °c
R se+R si fluxo	0,16	m ² °C/W
R se+R si energia	0,16	m ² °C/W

Quadro 4.4 – Apresentação de resultados para XPS

4.4.1.2 Madeira

Foi realizado o estudo para uma placa de madeira isolada de 35 mm, mas posteriormente os restantes ensaios foram realizados com placas de madeira de 50 mm, assim sendo foram obtidos resultados para o primeiro tipo e usando algumas fórmulas foram obtidos resultados dos parâmetros necessários para a placa de madeira de 50 mm.

Nos Quadros 4.7 e 4.8 são demonstrados os valores registados de temperaturas e fluxo na zona corrente.:

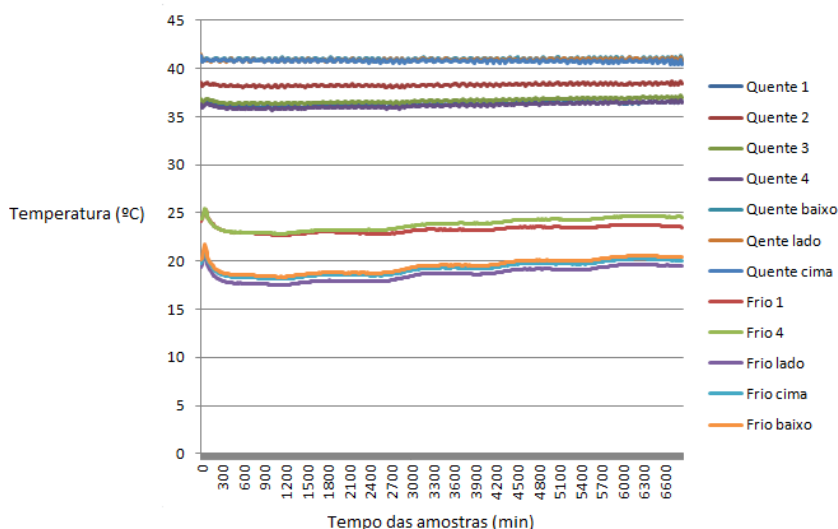


Figura 4.7 - Representação gráfica da variação das temperaturas para Madeira de 35 mm

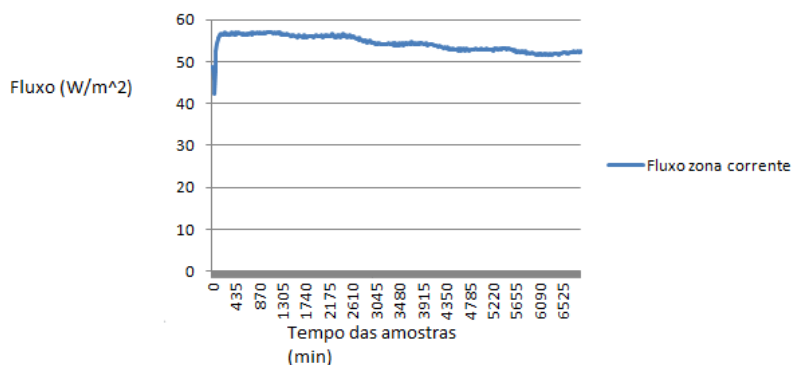


Figura 4.8 - Representação gráfica da variação do fluxo para Madeira de 35 mm Apresentado no Quadro 4.5 as leituras de energia:

Leituras	Hora	Data	Energia (kWh)	Q (W/m ²)
Início	08:42	9_12	2,405	78,3947
Fim	10:25	12_12	6,984	
Diferença	73,71	Horas		

Quadro 4.5 - Apresentação da leitura da energia para Madeira de 35 mm

Sendo o valor retirado da média do Fluxo, pelo Fluxímetro é de 54,3466 W/m². No Quadro 4.6 é apresentada a média calculada das Temperaturas:

	Superficiais		Ambientais	
	Interior	Exterior	Interior	Exterior
Temperaturas (°C)	36,84	23,51	40,87	19,07

Quadro 4.6 - Apresentação da média de temperaturas para Madeira de 35 mm

Usando o procedimento do caso anterior, chega-se aos resultados obtidos no Quadro 4.7:

Ufluxo	2,49	W/m ² °C
λfluxo	0,14	W/m ² c
λenergia	0,21	W/m ² c
Uenergia	3,60	W/m ² c
R se+R si fluxo	0,16	m ² °C/W
R se+R si energia	0,11	m ² °C/W

Quadro 4.7 - Apresentação de resultados para Madeira de 35 mm

Traduzindo os resultados obtidos para a placa de madeira de 35 mm para uma placa de madeira de 50 mm, usando as fórmulas (31) com um $e=0.05$ m obtém-se o valor de U_{50} e usando a fórmula (30) alterada para se obter o Fluxo (Q_{50}), sempre pelos dois métodos, termofluxímetro e energia. No Quadro 4.8 são, então, apresentados os resultados obtidos:

U50 fluxo	1,98	W/m ² °C
U50 energia	2,85	W/m ² °C
Q50 fluxo	43,06	W/m ²
Q50 energia	50,63	W/m ²

Quadro 4.8 – Resultados obtidos para Madeira de 50 mm

4.4.1.3 XPS com Madeira

Neste caso foi feito o estudo com a placa de madeira de 35 mm e com uma placa de XPS de 40 mm, sem ponte térmica, apenas para ser um termo de comparação.

A apresentação de resultados obtidos vai se proceder de maneira semelhante aos dois casos anteriores. Nas Figuras 4.9 e 4.10 é feita a representação gráfica dos valores retirados das leituras:

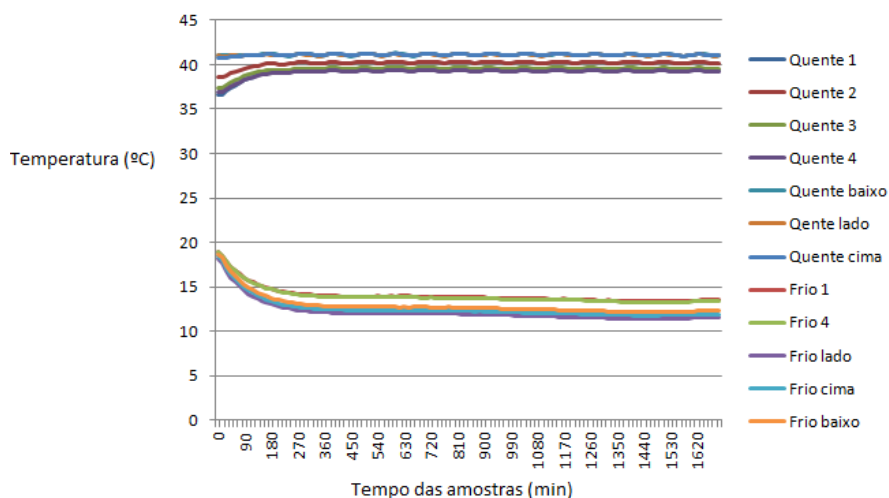


Figura 4.9 - Representação gráfica da variação das temperaturas para Madeira, 35 mm, com XPS

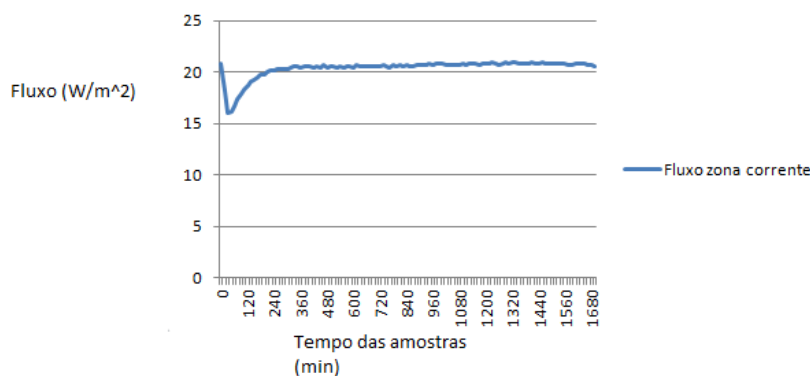


Figura 4.10 - Representação gráfica da variação do fluxo para Madeira, 35 mm, com XPS Tendo obtido leituras de energia, demonstradas no Quadro 4.9:

Leituras	Hora	Data	Energia (kWh)	Q (W/m ²)
Início	09:15	13_12	7,896	22,6543
Fim	18:21	13_12	8,247	
Diferença	9,1	Horas		

Quadro 4.9 - Apresentação da leitura da energia para Madeira, 35 mm, com XPS

Sendo o valor do Fluxo médio obtido pelo gráfico de 20,6956 W/m².

No que diz respeito a temperaturas, temos um quadro resumo apresentando os valores:

	Superficiais		Ambientais	
	Interior	Exterior	Interior	Exterior
Temperaturas (°C)	39,65	13,64	41,11	12,11

Quadro 4.10 - Apresentação da média de temperaturas para Madeira, 35mm, com XPS

No Quadro 4.11 é feita a apresentação de resultados do resultado de placa de XPS de 40 mm de espessura com uma placa de madeira de 35 mm de espessura:

Ufluxo	0,71	W/m ² °C
Uenergia	0,78	W/m ² °c
R se+R si fluxo	0,14	m ² °C/W
R se+R si energia	0,13	m ² °C/W

Quadro 4.11 - Apresentação de resultados para Madeira, 35mm, com XPS

Tendo de fazer, novamente, os cálculos de obtenção dos valores para madeira de 50 mm de espessura, mas com a placa de XPS, os resultados são proferidos no Quadro 4.12:

U50 fluxo	0,52	W/m ² °C
U50 energia	0,56	W/m ² °C
Q50 fluxo	11,24	W/m ²
Q50 energia	12,30	W/m ²

Quadro 4.12 - Resultados obtidos para Madeira, 50mm, com XPS

4.4.1 Caso 1

Em todos os casos de PTL em que é referido Ufluxo é medido pela zona corrente, mas apenas serve para comparação de resultados e não pode ser considerado correto. Devido à proximidade do fluxímetro com a zona de ponte térmica linear, os valores podem ser influenciados.

Começamos pelo caso mais simples de estudo de ponte térmica linear, com a obtenção do valor do coeficiente de transmissão térmica linear de uma ligação fachada com piso intermédio, sem isolamento térmico, como é demonstrado pela Figura 4.11, sendo que a figura mostra apenas a configuração.



Figura 4.11 – Ligação caso 1

Obtendo leituras pelos dois métodos referidos, termofluxímetro ou medição da energia despendida. Para casos de ponte térmica linear, a leitura fica mais aproximada da realidade com a quantidade de energia despendida, para se saber a quantidade de calor que atravessa a amostra em estudo. Sendo apresentados os dados pelas Figura 4.12 e Figura 4.13:

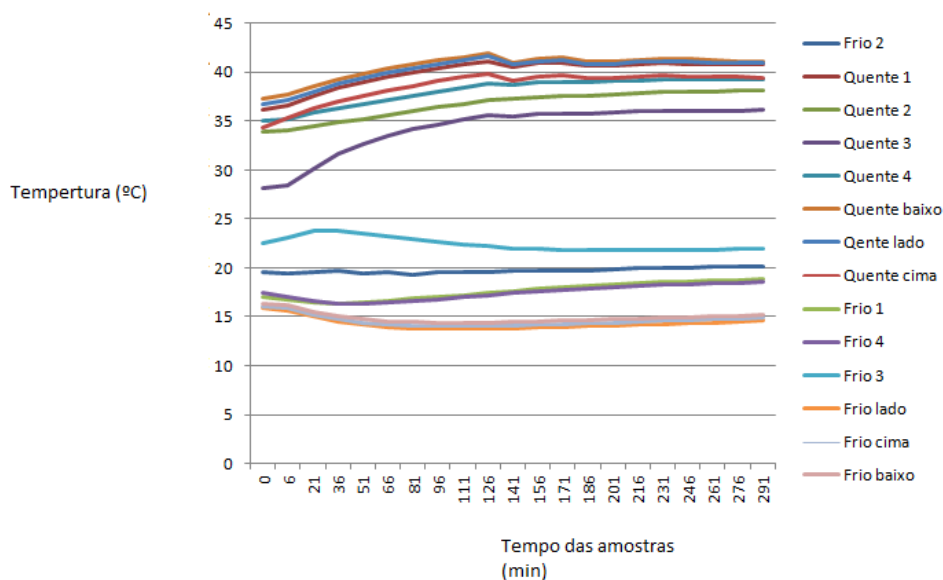


Figura 4.12 – Representação gráfica dos valores de temperatura dos diferentes termopares para o Caso 1

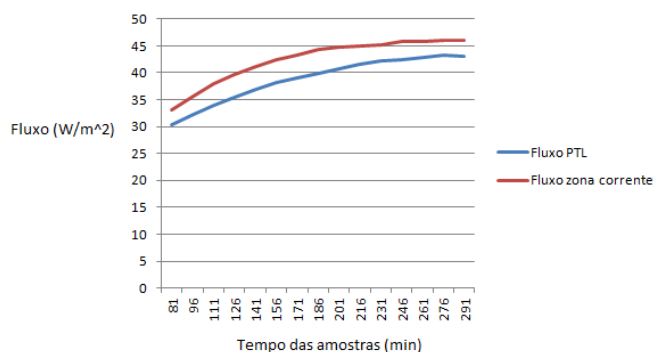


Figura 4.13 – Representação gráfica do valor do fluxo de calor para o Caso 1

Sistematizando no Quadro 4.13 os diferentes valores médios necessários.

	Superficiais			Ambientais	
	Interior	Exterior		Interior	Exterior
		ZC	PTL		
Temperaturas (°C)	38,45	18,9	20,07	40,64	14,45

Quadro 4.13 – Apresentação da média de temperaturas Caso 1

Usando o método do consumo de energia, tivemos as seguintes leituras apresentadas no Quadro 4.14. Sendo a média do Fluxo pelo Termofluxímetro de 43,7011 W/m², valor da zona corrente.

Leituras	Hora	Data	Energia (kWh)	Q (W/m ²)
Início	14:55	20_12	13,3	59,4231
Fim	17:45	20_12	13,46	
Diferença	2,833	Horas		

Quadro 4.14 – Apresentação da leitura da energia Caso 1

Ufluxo	1,67	W/m ² °C
Uenergia	2,27	W/m ² °c
ψ	0,30	W/m°C

Quadro 4.15 – Valores finais obtidos Caso 1

A fim de fornecer uma base para os casos seguintes, são de seguida apresentados os cálculos para os valores obtidos no Quadro 4.15. Usando a fórmula (19):

$$U = \frac{Q}{\Delta T_{amb}} \rightarrow U = \frac{59,4231}{(40,64 - 14,45)} = 2,2689 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Usando o valor de U obtido, recorre-se a fórmula (22):

$$\psi = \frac{59,4231 \times (0,68 \times 0,68)}{0,68 \times (40,64 - 14,45)} - \frac{1,975 \times (0,68 \times 0,68 - 0,68 \times 0,05)}{0,68} = 0,2984 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Sendo o valor de U=1,975 retirado do Quadro 4.8, pois o valor não tem influência da ponte térmica. Neste caso recorreu-se ao valor retirado do quadro em que apenas tem em atenção à Madeira. Nos casos com XPS e Madeira, retira-se o mesmo valor do Quadro 4.12.

4.4.2 Caso 2

A Figura 4.14 representa uma ligação fachada com pavimento intermédio com isolamento pelo exterior.



Figura 4.14 – Ligação caso 2

Fazendo uso dos valores retirados pelos aparelhos de medição e de armazenamento de dados, obtemos os gráficos das Figura 4.15 e Figura 4.16, onde estão apresentados os valores de temperatura e de fluxo.

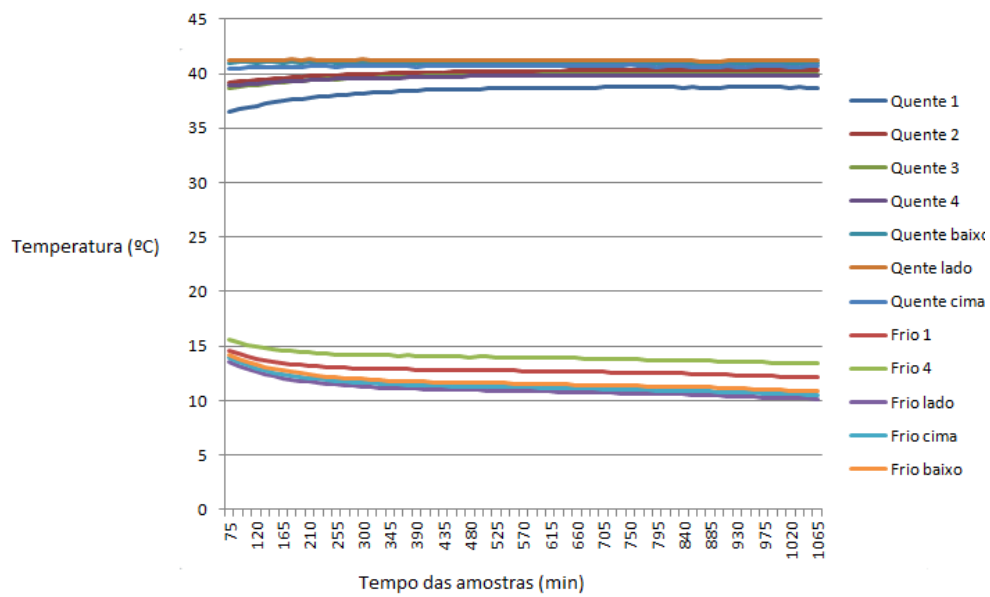


Figura 4.15 – Representação gráfica dos valores de temperatura dos diferentes termopares para o caso 2

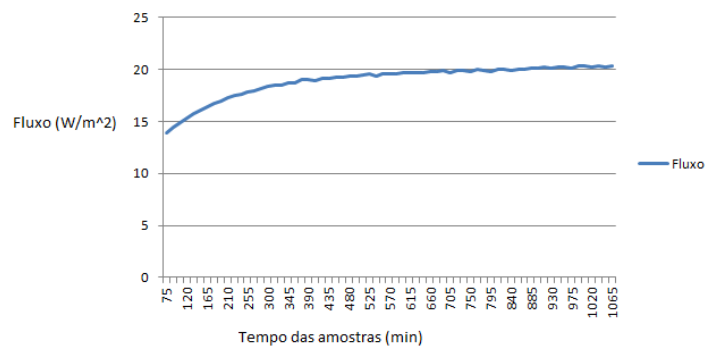


Figura 4.16 – Representação gráfica do valor do fluxo de calor para o Caso 2

Realizando a média dos valores e colocando de forma sintetizada em tabelas, apresentam-se os resultados nos Quadro 4.16 e Quadro 4.17.

	Superficiais			Ambientais	
	Interior	Exterior		Interior	Exterior
		ZC	PTL		
Temperaturas (°C)	39,69	12,48	13,71	40,95	10,93

Quadro 4.16 – Apresentação da média de temperaturas Caso 2

Leituras	Hora	Data	Energia (kWh)	Q (W/m ²)
Início	08:55	21_12	14,12	21,518
Fim	11:55	21_12	14,24	
Diferença	3 Horas			

Quadro 4.17 – Apresentação da leitura da energia Caso 2

Tendo um Fluxo médio, conseguido através dos termofluxímetros de $19,936 \text{ W/m}^2$, obtêm-se os valores finais de cálculo apresentados no Quadro 4.18:

Ufluxo	0,66	W/m ² °C
Uenergia	0,72	W/m ² °c
ψ	0,28	W/m°C

Quadro 4.18 – Valores finais obtidos Caso 2

4.4.3 Caso 3

A Figura 4.17 representa uma ligação fachada com pavimento intermédio, com isolamento pelo interior.



Figura 4.17 – Ligação referente ao caso 3

Fazendo uso dos valores retirados pelos aparelhos de medição e de armazenamento de dados, obtemos os gráficos das Figura 4.18 e Figura 4.19.

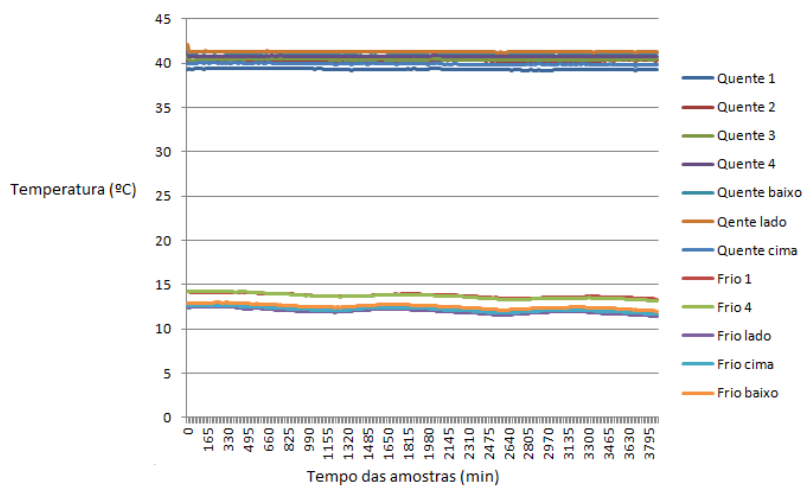


Figura 4.18 - Representação gráfica dos valores de temperatura dos diferentes termopares para o Caso 3

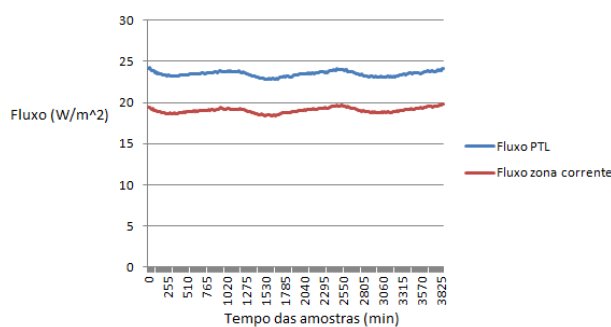


Figura 4.19 - Representação gráfica do valor do fluxo de calor para o Caso 3

Realizando a média dos valores e colocando de forma sintetizada em tabelas, apresentam-se os resultados nos Quadro 4.19 e Quadro 4.20.

	Superficiais			Ambientais	
	Interior	Exterior		Interior	Exterior
		ZC	PTL		
Temperaturas (°C)	40,19	13,73	13,7	40,8	12,23

Quadro 4.19 - Apresentação da média de temperaturas referentes ao Caso 3

Leituras	Hora	Data	Energia (kWh)	Q (W/m ²)
Início	10:35	5_1	0,957	28,6343
Fim	11:06	6_1	2,027	
Diferença	24,52	Horas		

Quadro 4.20 - Apresentação da leitura da energia referentes ao Caso 3

Tendo um Fluxo médio, conseguido através dos termofluxímetros 19,0599 W/m² para a zona corrente obtêm-se os valores finais de cálculo apresentados no Quadro 4.21:

Ufluxo	0,67	W/m ² °C
Uenergia	1,00	W/m ² °c
ψ	0,36	W/m°C

Quadro 4.21 - Valores finais obtidos Caso 3

4.4.4 Caso 4

A Figura 4.20 traduz a ligação fachada com varanda, sem isolamento térmico.



Figura 4.20 – Ligação ilustrativa do caso 4

Fazendo uso dos valores retirados pelos aparelhos de medição e de armazenamento de dados, obtemos os gráficos das Figura 4.21 e Figura 4.22.

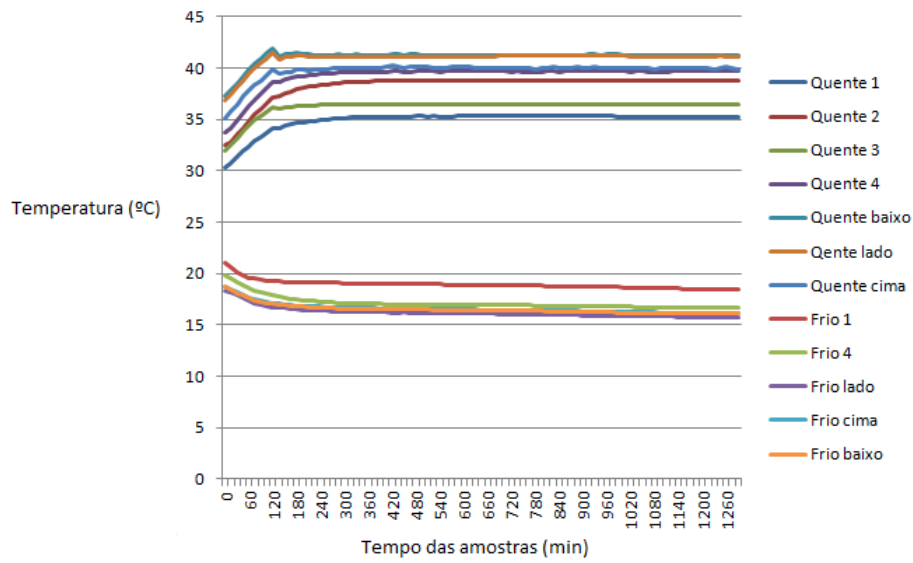


Figura 4.21 - Representação gráfica dos valores de temperatura dos diferentes termopares para o Caso 4

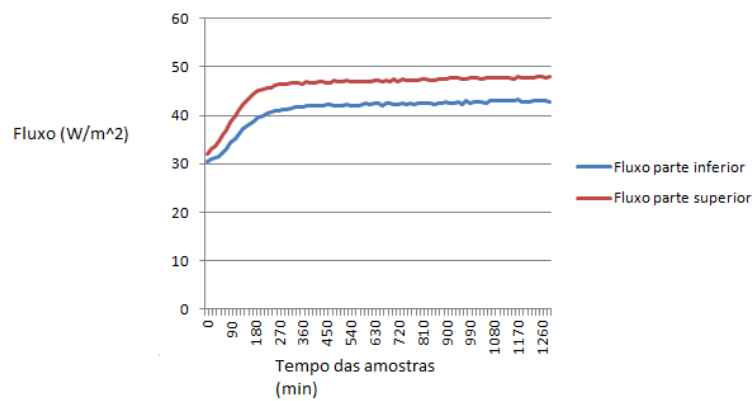


Figura 4.22 - Representação gráfica do valor do fluxo de calor para o Caso 4

Realizando a média dos valores e colocando de forma sintetizada em tabelas, apresentam-se os resultados nos Quadro 4.22 e Quadro 4.23.

	Superficiais		Ambientais	
	Interior	Exterior	Interior	Exterior
Temperaturas (°C)	37,53	19,03	40,81	16,25

Quadro 4.22 - Apresentação da média de temperaturas referentes ao Caso 4

Leituras	Hora	Data	Energia (kWh)	Q (W/m ²)
Início	10:20	10_1	6,627	53,056
Fim	15:14	10_1	6,902	
Diferença	4,9	Horas		

Quadro 4.23 - Apresentação da leitura da energia referente ao Caso 4

Tendo um Fluxo médio, conseguido através dos termofluxímetros de $44,828 \text{ W/m}^2$, obtêm-se os valores finais de cálculo apresentados no Quadro 4.24:

Ufluxo	1,95	W/m ² °C
Uenergia	2,16	W/m ² °c
ψ	0,22	W/m°C

Quadro 4.24 - Valores finais obtidos Caso 4

4.4.5 Caso 5

A Figura 4.23 é representativa de uma ligação fachada com varanda, com isolamento pelo exterior.



Figura 4.23 – Ligação ilustrativa do caso 5

Fazendo uso dos valores retirados pelos aparelhos de medição e de armazenamento de dados, obtemos os gráficos das Figura 4.24 e Figura 4.25.

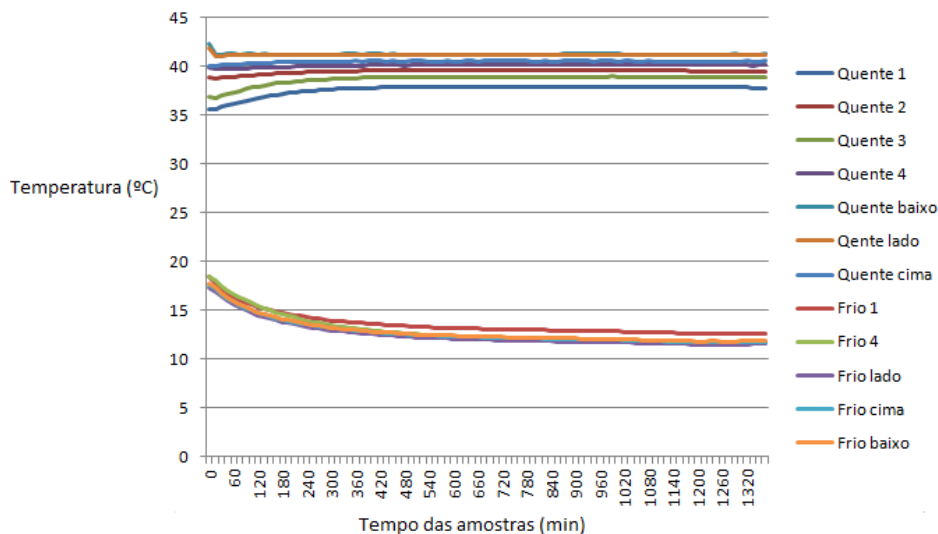


Figura 4.24 - Representação gráfica dos valores de temperatura dos diferentes termopares para o Caso 5

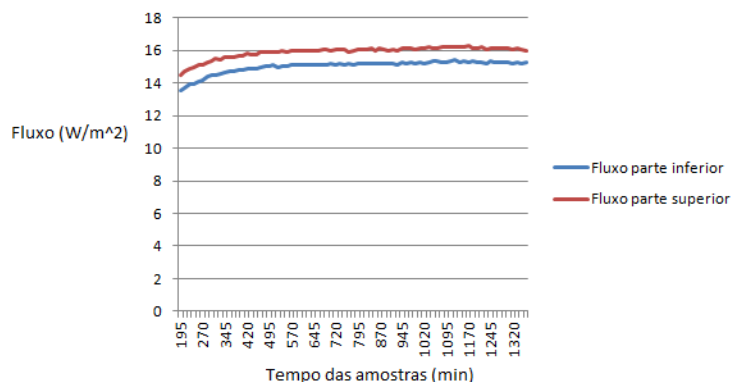


Figura 4.25 - Representação gráfica do valor do fluxo de calor para o Caso 5

Realizando a média dos valores e colocando de forma sintetizada em tabelas, apresentam-se os resultados nos Quadro 4.25 e Quadro 4.26.

	Superficiais		Ambientais	
	Interior	Exterior	Interior	Exterior
Temperaturas (°C)	39,09	12,82	40,99	12,3

Quadro 4.25 - Apresentação da média de temperaturas referentes ao Caso 5

Leituras	Hora	Data	Energia (kWh)	Q (W/m ²)
Início	10:22	11_1	7,782	30,0835
Fim	15:26	11_1	8,007	
Diferença	5,07	Horas		

Quadro 4.26 - Apresentação da leitura da energia referente ao Caso 5

Tendo um Fluxo médio, conseguido através dos termofluxímetros de 15,4217 W/m², obtêm-se os valores finais de cálculo apresentados no Quadro 4.27:

Ufluxo	0,55	W/m ² °C
Uenergia	1,05	W/m ² °c
ψ	0,39	W/m°c

Quadro 4.27 - Valores finais obtidos referentes ao Caso 5

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

O quinto capítulo da presente tese encontra-se dedicado à apresentação de resultados. Esta irá ser elaborada em três etapas as quais serão a apresentação de quadros síntese de resultados, a sua comparação e por fim a realização de uma análise, respetivamente. É importante realçar que sempre que num dos seguintes quadros se encontrar a conotação “Fluxo” esta deve ser interpretada como uma leitura realizada através dos termofluxímetros assim como quando surgir a conotação "Energia" deve ter sido em conta que a leitura é realizada pela contagem de energia.

O quadro seguinte, o Quadro 5.1 retrata a representação sumária dos Fluxos calculados na seção 4:

Soluções	Fluxos (W/m ²) Fluxímetro	Fluxos (W/m ²) Consumo de Energia
XPS	24,32	24,44
Madeira35	54,35	78,39
Madeira50	43,06	50,63
XPSMadeira35	20,70	22,65
XPSMadeira50	11,24	12,30
Caso1	43,70*	59,42
Caso2	19,94*	21,51
Caso3	19,06*	28,63
Caso4	47,28*	53,06
Caso5	15,86*	30,08

*- Valores medidos em zona corrente, apenas servindo como termo de comparação

Quadro 5.1 – Apresentação do Fluxo para todos os casos de estudo

Para o caso de Madeira de 35 mm de espessura, “Madeira35”, é assumível que existam fugas de calor, traduzida num deficiente selamento. Para o caso da Madeira de 50 mm de espessura, “Madeira50”, tendo por base a “Madeira35”, faz-se sentir o mesmo efeito de fuga. Realizando-se a comparação de “Madeira50” com o caso 1, é possível verificar um aumento do Fluxo quando introduzida a ponte térmica linear.

Existe maior fluxo nos casos em que o isolamento térmico não está presente, como são exemplos os Casos 1 e 4.

Para os casos 2 e 3, em que a diferença está na colocação do isolamento pelo interior ou exterior, verifica-se que tem menor fluxo o caso em que o isolamento se encontra no exterior.

Nos casos 2 e 5, em que o isolamento se encontra pelo exterior, verifica-se que a não continuidade do isolamento faz com que o fluxo seja maior.

No Quadro 5.2 é feita a comparação dos valores de U, calculados para cada caso através da equação (30):

Soluções	U (W/m ² °C) Fluximetro	U (W/m ² °C) Consumo de Energia
XPS	1,02	1,03
Madeira35	2,49	3,60
Madeira50	1,98	2,85
XPSMadeira35	0,71	0,78
XPSMadeira50	0,52	0,56
Caso1	1,67*	2,27
Caso2	0,80*	0,86
Caso3	0,67*	1,00
Caso4	1,93*	2,16
Caso5	0,55*	1,05

*- Valores medidos em zona corrente, apenas servindo como termo de comparação

Quadro 5.2 – Apresentação dos valores de U para os casos de estudo

No Quadro 5.3 são apresentados os valores obtidos para o cálculo das características dos materiais usados em comparação com valores tabelados.

	Soluções	λ (W/m°C) Fluximetro	λ (W/m°C) Energia
		XPS	0,040
	Madeira35	0,14	0,21
	Madeira50	0,14	0,21
LNEC	XPS	0,037	
	Madeira semi densa ou densa	0,18-0,23	

Quadro 5.3 - Valores para o Coeficiente de condutibilidade térmica

No Quadro 5.4 estão representados os valores calculados para as resistências térmicas superficiais.

	Soluções	R se+R si (m ² °C/W)	R se+R si (m ² °C/W)
		Fluxímetro	Consumo de Energia
	XPS	0,16	0,16
	Madeira35	0,16	0,11
	XPSMadeira35	0,14	0,13
Despacho	Horizontal	0,17	
	Rca <5mm	0	

Quadro 5.4 – Valores de Resistências Superficiais

Foi realizada a verificação para a possível existência de uma caixa de ar no estudo de placa de madeira de 35 mm de espessura em conjunto com a placa de XPS. Na verificação do valor da resistência de caixa de ar chegou-se a um valor de $R_{ca}=0,01 \text{ m}^2\text{°C/W}$, ou seja, valor nulo, podendo ser desprezada.

Para os casos de 1 a 5 foi realizada uma base de dados de resultados onde foi substituída a utilização da Madeira pelo Betão, mantendo-se o mesmo método de cálculo, esta foi realizada devido a ser esperado um aumento do coeficiente de transmissão térmica linear entre o Caso 1 e Caso 3, assim como seria de esperar, igualmente, um aumento do mesmo coeficiente quando comparados os Caso 4 e Caso 5. Apresenta-se, no Quadro 5.5, uma comparação direta da variação dos resultados obtidos, tendo em atenção que o coeficiente de condutibilidade térmica do betão é $2 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Soluções	THERM - ψ (W/m ² °C)	
	Betão	Madeira
Caso1	0,55	0,12
Caso2	0,09	0,03
Caso3	0,57	0,10
Caso4	0,60	0,12
Caso5	0,62	0,09

Quadro 5.5 – Apresentação de valores de ψ para os casos em Madeira e Betão

Relativamente aos valores obtidos para o caso referente à utilização de Betão seria de esperar que se verificasse uma subida do valor do coeficiente de transmissão térmica linear aquando da colocação de isolamento pelo interior. Esta subida deve-se à maior resistência existente na

zona corrente quando comparada com a zona de ponte térmica linear, resultando numa maior concentração de fluxo na zona de ponte térmica linear onde a resistência térmica é menor.

O caso anteriormente apresentado verifica-se para o Betão no Caso 3 em comparação com o Caso 1 assim como no Caso 5 em comparação com o Caso 4. Com a utilização de isolamento pelo exterior, onde não há quebra de isolamento, o decréscimo é acentuado assim como esperado.

Os valores obtidos para os casos em que se recorreu à utilização de Madeira, devido à resistência na zona da ponte térmica linear ser superior à resistência na zona corrente com isolamento, não é verificável a mesma linha de pensamento usada para os casos em que se recorreu à utilização de Betão.

A avaliação das pontes térmicas lineares, é realizada através de valores do coeficiente de transmissão térmica linear presente no Quadro 5.6, tendo como objetivo o estudo da validade dos ensaios experimentais no protótipo de hot-box.

Soluções	ψ (W/m ² C) Experimental	ψ (W/m ² C) THERM	ψ (W/m ² C) Regulamento
Caso1	0,30	0,12	
Caso2	0,22	0,03	0,15
Caso3	0,36	0,10	0,6
Caso4	0,22	0,12	
Caso5	0,39	0,09	0,6

Quadro 5.6 – Comparação de valores do coeficiente de transmissão térmica linear

Os valores do regulamento não são comparáveis aos valores obtidos pelos métodos estudados, isto deve-se à diferente constituição das soluções construtivas, os valores de regulamento são para materiais correntes na construção como tijolos ou betão. Visto que os valores por defeito possuem uma margem de +50% de erro, significa dizer que, os valores se encontram sobredimensionados.

Os valores no Quadro 5.6 foram retirados do regulamento e são representativos de ligação (Despacho 15793–K/2013):

- Caso 2 – Fachada com pavimento de nível intermédio com isolamento pelo interior;
- Caso 3 - Fachada com pavimento de nível intermédio com isolamento pelo exterior;
- Caso 5 – Fachada com varanda com isolamento pelo exterior.

Os valores obtidos pelo THERM, sendo numéricos, são mais confiáveis do que valores obtidos experimentalmente. A comparação de valores é realizada através do uso do programa THERM que permite conclusões como:

- A maior resistência térmica encontra-se na zona de ponte térmica linear para qualquer caso de estudo, pelo que, quanto maior for a resistência térmica na zona corrente menor será a diferença de resistência térmica que se traduz num menor valor do coeficiente de transmissão térmica linear.
- O valor mais baixo dos coeficientes de transmissão térmica linear, ψ , obteve-se no Caso 2. Este facto deve-se à existência de isolamento posicionado no exterior e ao facto de não haver uma interrupção do mesmo, ou seja, o isolamento cobre toda a face da placa de madeira;
- A diferença de resistência térmica entre a zona corrente e a zona de ponte térmica linear é maior para o Caso 1 onde se verifica um maior valor do coeficiente de transmissão térmica linear em comparação com o Caso 3 onde a diferença de resistência térmica é menor e esta se traduz num menor valor do coeficiente;
- A explicação utilizada no ponto anterior, é passível de ser utilizada para a comparação entre os Casos 4 e 5, onde a diferença de resistências é maior para o caso 4 do que para o Caso 5;

Os resultados experimentais são passíveis de comparação relativamente aos resultados numéricos, apesar de que a lógica de valores do coeficiente utilizada na explicação dos casos pelo método numérico não ser viável pelo que pode afirmar-se que as condições de ensaio experimental precisam de ser ajustadas. No entanto, conclui-se que se verifica um decréscimo do valor do coeficiente para o caso em que o isolamento é aplicado pelo exterior.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Considerações finais

É um dado adquirido que o conforto térmico cada vez assume um papel mais relevante nos dias de hoje pelo que se considerou pertinente a realização de um estudo sobre o conforto térmico, com incidência, neste caso, mais especificamente no coeficiente de transmissão térmica superficial, de zonas correntes da envolvente dos edifícios e no coeficiente de transmissão térmica linear, na zona das pontes térmicas, onde se centra mais o presente trabalho. Para o efeito foram utilizadas três formas distintas de abordagem: considerando os valores obtidos pelo Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), aprovado pelo Decreto-Lei nº28/2016, 23 de Junho; a avaliação experimental através de modelação em elementos finitos, através do THERM.

Os resultados obtidos através das referidas formas de abordagem foram depois avaliados e comparados, e para o caso específico das pontes térmicas lineares foi possível retirar as seguintes conclusões gerais (muitas delas já esperadas):

- Nos ensaios experimentais, uma frincha pode alterar significativamente todos os resultados finais;
- O estudo realizado para obtenção do coeficiente de condutibilidade térmica dos materiais isolados é viável segundo o protótipo de hot-box;
- Em casos comparáveis de isolamento interior ou exterior, a descontinuidade do isolamento térmico influencia o coeficiente de transmissão térmica linear, aumentando o fluxo de calor e, conseqüentemente, o coeficiente de transmissão térmica linear;
- A colocação do isolamento pelo exterior reduz os efeitos de ponte térmica;
- Em termos gerais, os resultados numéricos apresentam aparentemente maior fiabilidade do que resultados obtidos através do método experimental, uma vez que

nem sempre foi possível garantir as condições mais apropriadas para os ensaios (pequenas frinchas, difíceis de evitar, condicionam fortemente os resultados finais);

- Em ensaios futuros justifica-se um maior controlo sobre a montagem dos provetes de ensaio, em laboratório;
- Apesar dos desvios entre os resultados da metodologia experimental e da modelação, para os provetes de ensaio montados em melhores condições é possível chegar a uma aproximação de resultados;

Como referido nesta dissertação, os valores do regulamento estão muito sobredimensionados na maioria dos casos, visto que os valores obtidos a partir do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação não têm em atenção as espessuras nem o tipo de materiais usados, apenas refletem o tipo de construções e o local onde o isolamento é usado.

Apesar de existirem sistemas construtivos que permitem uma adequada correção dos efeitos negativos das pontes térmicas lineares, como sistema ETICS ou as fachadas ventiladas, na realidade as pontes térmicas lineares continuam sempre presentes, conseguindo-se no máximo uma forte atenuação.

6.2 Considerações finais

Para futuros trabalhos sugere-se o uso de diferentes materiais para servir o propósito de fachada e de ligações, com diferentes espessuras, bem como o uso de diferentes isolantes térmicos e diferentes espessuras. Seria relevante fazer o estudo para o mesmo material, mas fazer-se o uso de parede dupla e fazer a variação da localização do isolamento térmico: pelo interior, e posicionado entre panos, no interior da caixa de ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu A. (2015). “Caracterização de soluções de fachadas leves”. Tese de Mestrado Integrado, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Afonso A. (2012). “Pontes Térmicas: Perdas lineares, valores por defeito”. Tese de Mestrado Integrado, Universidade do Porto, Porto.

Amorim, R. (2016), “Estudo da Eficiência Energética de Edifícios de Habitação no Âmbito do REH – Influência das Pontes Térmicas Lineares”, Tese de Mestrado Integrado, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Castro, J. (2010), “Quantificação dos coeficientes de Transmissão Térmica Linear – Pontes Térmicas”, Tese de Mestrado Integrado, Universidade do Porto, Porto.

Catálogo Online de Pontes Térmicas Lineares, IteCons, <http://www.itecons.uc.pt/catalogoptl/> (Consultado 20/12/2016).

Decreto-Lei nº 40/1990 de 6 de Fevereiro, “Diário da República, 1ª série – Nº 31 – 1 de Janeiro de 1991” – p. 490-504.

Decreto-Lei nº 80/2006 de Abril, “Diário da República, 1ª série – Nº 67 – 4 de Julho de 2006” – p. 2468-2513.

Decreto-Lei nº 118/2013 de 20 de Agosto, “Diário da República, 1ª série – Nº 159 – 1 de Dezembro de 1991” – p. 4988-5005.

Decreto-Lei nº 28/2016 de 23 de Junho, “Diário da República, 1ª série – Nº 119 – 24 de Junho de 1991” – p. 1945-1966.

Despacho 15793-K/2013 de 3 de Dezembro, “Diário da República, 2ª série – Nº 234 – 3 de Dezembro”, p. 35088- (25) – 35088- (87).

Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios. Jornal Oficial das Comunidades Europeias Nº L1 de 04/01/2003, p. 65 – 71.

- Diretiva 2010/31/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios. Jornal Oficial das Comunidades Europeias N° L153 de 18/06/2010, p. 13 – 35.
- EN ISO 10211 (2007), “Thermal bridges in building construction – heat flows and surface temperatures – Detailed calculations”, ON – Committee ON-K 175, Austrian Standards Institute, Wien.
- Gesualdo F. (2010). “Método dos elementos finitos”. Universidade Federal de Uberlândia.
- Mateus, D. (2015), Apontamentos da disciplina Estratégias de Reabilitação Acústica e Energética de Edifícios, 2015/2016.
- Santos, C., Matias L. (2006) “Coeficiente de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios” Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Simões, N. (2007), Apontamentos da disciplina Física das Construções, 2007/2008.
- Simões, N. (2015), Apontamentos da disciplina Comportamento Térmico e Energético de Edifícios, 2015/2015.
- Tadeu A., Moreira A., António J., Simões N., Simões I. (2013). (Thermal delay provided by floors containing layers that incorporate expanded cork granule waste”. *Energy and Buildings* 68 (2014), p. 611- 619.
- THERM 6.3/Window 6.3 NFRC Simulation Manual (2013), Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Valério J. (2007). “Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e Energético de Edifícios Residenciais Correntes”. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa.
- Viot, H., Sempey A., Pauly M., Mora L. (2015). “Comparison of different methods for calculating thermal bridges: Application to wood-frame buildings”. *Building and Environment* 93, p. 339- 348.