



**Rui Filipe Pereira  
Oliveira**

**Construir segundo requisitos *Passivhaus*:  
Modelação de pontes térmicas**





**Rui Filipe Pereira  
Oliveira**

**Construir segundo requisitos *Passivhaus*:  
Modelação de pontes térmicas**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação do Professor Doutor Romeu da Silva Vicente, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me apoiaram durante o meu percurso académico, à minha namorada pelo seu apoio incondicional, à minha irmã, que apesar da sua tenra idade foi uma menina compreensiva, que sempre aceitou e respeitou o tempo de trabalho do irmão e principalmente ao meu avô.



## **o júri**

presidente

**Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa**  
Professora associada da Universidade de Aveiro

**Professora Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho**  
Professora auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Professora Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues**  
Professora auxiliar da Universidade de Aveiro





## **agradecimentos**

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que estiveram presentes e colaboraram comigo para que fosse possível concretizar mais uma etapa da vida e que neste momento se encontra no fim.

Agradeço, principalmente, aos meus orientadores, Professora Doutora Fernanda Rodrigues e o Professor Doutor Romeu Vicente por terem sido elementos importantes no desenvolvimento desta dissertação, não só pelo conhecimento profissional transmitido e disponibilidade para ajudar, mas também pela motivação e confiança demonstrada ao longo do último ano.

Agradeço à Arq. Ana Dinis Alves pelo apoio no desenvolvimento de pormenores construtivos.

Aos meus colegas, Eng.º António Figueiredo, Eng<sup>a</sup> Eliana Almeida e ao Eng.º Rui Grangeia pelo espírito de entreajuda e apoio demonstrados.

A todos os meus amigos que me acompanham e em especial à minha família que sempre está presente.



## palavras-chave

Consumo energético, eficiência energética, pontes térmicas, isolamento térmico, *Passivhaus*, coeficiente de transmissão térmica linear.

## resumo

Atualmente tem-se vindo a lutar contra vários problemas de índole económica e ambiental, nomeadamente contra as principais causas do consumo excessivo de energia, recurso cada vez mais escasso e conseqüentemente, mais caro. Para inverter essa tendência tem-se procurado encontrar soluções do ponto de vista sustentável e implementar medidas que reduzam o consumo global de energia. Os edifícios são um dos setores que mais contribuem para os elevados consumos de energia, sendo necessário ir ao encontro de medidas que visam torná-los mais eficientes. A Diretiva 2010/31/EU estabeleceu limites aos estados membros da União Europeia para que na construção de edifícios novos se alcance consumos de energia quase nulos. Os requisitos para se atingir um edifício passivo, segundo o conceito *Passivhaus*, são essenciais para se conseguir atingir esses limites, estando mesmo na génese dos edifícios de consumo quase nulo.

No âmbito do balanço térmico, as pontes térmicas contribuem para uma percentagem significativa da energia que é desperdiçada pela envolvente dos edifícios, pelo que, o conceito *Passivhaus* estabelece que a envolvente apresente características que permitem eliminar ou pelo menos minimizar significativamente as pontes térmicas.

O primeiro objetivo desta dissertação foi desenvolver um catálogo de pormenores construtivos de ligações que obedeam às exigências da construção segundo os requisitos *Passivhaus*, para cada um dos quais se apresentou os valores correspondentes de  $\Psi$  ( $W/(m \cdot ^\circ C)$ ), obtidos quer com medições exteriores quer com interiores. No desenvolvimento dos pormenores construtivos, teve-se em conta os sistemas de construção mais comuns em Portugal. Para cada uma das ligações construtivas (ponte térmica) foi realizado um estudo paramétrico, possibilitando a identificação das soluções ótimas a adotar, a fim de cumprir os requisitos *Passivhaus*, respeitando o valor do coeficiente de transmissão térmica linear ( $\Psi \leq 0,01 W/(m \cdot ^\circ C)$ ). O segundo objetivo foi fornecer suporte técnico a arquitetos, engenheiros e construtores, para projetarem e construírem segundo os requisitos *Passivhaus*, em relação à resolução e definição construtiva de pontes térmicas lineares.

O estudo iniciou-se com o desenho das ligações e posteriormente obteve-se o valor do coeficiente de transmissão térmica linear ( $\Psi$  ( $W/(m \cdot ^\circ C)$ )) utilizando o método de cálculo definido na EN ISO 10211: 2007. Em cada um dos pormenores de pontes térmicas realizou-se a sua modelação usando o software THERM 7® para obter o fluxo de calor em 2D. Durante o estudo paramétrico foram combinadas diferentes espessuras de isolamento térmico dos elementos construtivos e a variação da posição da camada isolante. Também foi realizado o cálculo do parâmetro de coeficiente de transmissão térmica linear ( $\Psi$  ( $W/(m \cdot ^\circ C)$ )) usando as medições externas das dimensões dos elementos construtivos (de acordo com a metodologia *Passivhaus*) e internas, de acordo com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE) e por último foi realizada uma análise crítica. Para cada ligação otimizada foi concebido o respetivo pormenor construtivo com a sua descrição e foi representado graficamente o valor do coeficiente de transmissão térmica linear ( $\Psi$  ( $W/(m \cdot ^\circ C)$ )) para cada combinação da espessura do isolamento.

O desenvolvimento de diversas soluções de ligações permitiu atingir a condição ( $\Psi \leq 0,01 W/(m \cdot ^\circ C)$ ) para diferentes configurações de pontes térmicas lineares em quase todos os pormenores. No entanto, foi possível constatar que a variação da espessura da camada de isolamento não se traduz sempre na redução do coeficiente de transmissão térmica linear ( $\Psi$  ( $W/(m \cdot ^\circ C)$ )). Para obter esta redução são essenciais aspetos construtivos, tais como a continuidade e a posição da camada de isolamento. A combinação de todos estes aspetos nos pormenores construtivos traduz-se em valores de coeficientes de transmissão térmica linear significativamente mais baixos do que os que estão tipificados no regulamento Português.

Em suma, este estudo demonstra a viabilidade do projeto e da construção de acordo com o padrão *Passivhaus* aplicando os métodos construtivos correntes em Portugal e releva a importância da correção das pontes térmicas na fase de conceção e execução dos edifícios.



**keywords**

Energy consumption, energy efficient, thermal bridges, thermal insulation, *Passivhaus*, linear thermal transmittance.

**abstract**

The struggle against diverse economic and environmental problems is a common issue nowadays, particularly in what respects excessive energy consumption, increased resource use and therefore more expensive. In order to invert this tendency, there's been made a general pursuit for sustainable solutions and consequently implementation of measures to reduce the overall energy consumption. Buildings are one of the sectors that most contribute to high energy consumption and it is crucial to implement measures which make them more efficient. The Directive 2010/31/EU established limits for member states of the European Union for the construction of new buildings in order to reach Nearly Zero Energy Consumption demand. In order to achieve these levels, the *Passivhaus* requirements are essential, being inclusively in the genesis of the NZEB building.

Within the context of heat balance, thermal bridges contribute to a significant proportion of energy losses through the building envelope. As a result, the *Passivhaus* concept establishes that the surrounding of the building must provide characteristics which allow the elimination or very significant minimization of thermal bridges.

The first objective of this thesis was to develop a catalog of construction details which satisfy the requirements of construction according to the requirements of *Passivhaus*, presenting detailed calculation and the corresponding values of the linear thermal transmittance ( $\Psi$  (W/(m. $^{\circ}$ C))), obtained either with external or internal dimensional measurements. For the development of construction details, it was taken into account the most common building systems used in Portugal. For each detailed constructive connection (thermal bridge) was conducted a parametric study which allowed the identification of the optimal solutions to adopt in order to fulfill the *Passivhaus* requirement, respecting the target value of the linear thermal transmittance ( $\Psi$ )  $\leq 0,01$  W/(m. $^{\circ}$ C). The second objective was to provide technical support to architects, engineers and builders, to design and build according to the *Passivhaus* requirements, concerning the resolution and constructive definition of linear thermal bridges.

The study began with the drawings of the connections and the subsequent correspondent calculation of the linear thermal transmittance ( $\Psi$  (W/(m. $^{\circ}$ C))), using the calculation method defined in EN ISO 10211:2007. Each thermal bridge detail was modelled, using software THERM 7® in order to calculate 2D heat flow. For the parametric study different thicknesses of thermal insulation of building elements and the variation of the position of the insulating layer were modeled and studied. It was also calculated the parameter of linear thermal transmittance ( $\Psi$  (W/(m. $^{\circ}$ C))) using the external measurements of the dimensions of building details (according to the *Passivhaus* standard) and internal, according to the Portuguese National Thermal Code (RCCTE) and finally performed a critical analysis. For each optimized connection it was conceived a designed detail with the respective description and then plotted the linear thermal transmittance  $\Psi$  (W/(m. $^{\circ}$ C)) for each combination of insulation thickness defined.

The development of various connection solutions allowed to reach the target condition of  $\Psi \leq 0,01$  W/(m. $^{\circ}$ C) for different linear thermal bridge configurations for almost every detail. However, it was possible to establish that the variation of insulating layer's thickness does not always translate in reducing the linear thermal transmittance  $\Psi$  (W/(m. $^{\circ}$ C)). To obtain this reduction, constructive aspects are essential, such as the continuity and the position of insulating layer. The combination of all these aspects in the construction details result in linear thermal transmittance ( $\Psi$  (W/(m. $^{\circ}$ C))) significantly lower than the typified in the Portuguese thermal code (RCCTE).

In summary, this study demonstrates the viability of design and consequent construction according to the *Passivhaus* standards applied to common constructive methods used in Portugal and enhances the importance of the correction of thermal bridges in the design phase and building planning.



# Índice

---

# Índice

## CAPÍTULO 1

1.	Introdução .....	1
1.1.	Enquadramento do trabalho .....	1
1.2.	Objetivos .....	2
1.3.	Metodologia .....	2
1.4.	Estrutura da dissertação .....	3

## CAPÍTULO 2

2.	<i>Passivhaus</i> .....	7
2.1.	Perspetiva energética nacional .....	7
2.2.	Conceito <i>Passivhaus</i> .....	9
2.3.	Padrão <i>Passivhaus</i> .....	10
2.3.1.	Requisitos <i>Passivhaus</i> .....	11
2.3.2.	Sustentabilidade .....	14
2.3.3.	Eficiência energética .....	15
2.3.4.	Conforto .....	15
2.3.5.	Custos .....	16
2.4.	<i>Passivhaus</i> noutros climas .....	17
2.4.1.	<i>Passivhaus</i> em Portugal .....	19
2.5.	Conceção e construção de edifícios <i>Passivhaus</i> .....	21
2.5.1.	Orientação solar .....	22
2.5.2.	Envidraçados .....	22
2.5.3.	Estanquidade .....	22
2.5.4.	Ventilação com recuperação de calor .....	23
2.5.5.	Isolamento térmico .....	23
2.5.6.	Planeamento .....	24
2.6.	Pormenorização construtiva: Pontes térmicas .....	24



---

2.6.1.	Pontes térmicas .....	25
2.6.2.	Projeto de pontes térmicas.....	27
2.6.3.	Avaliação de pontes térmicas .....	28
 <b>CAPÍTULO 3</b>		
3.	Metodologia de cálculo .....	35
3.1.	Método de cálculo 2D de pontes térmicas .....	35
3.1.1.	Coeficiente de transmissão térmica linear $\Psi$ .....	35
3.1.2.	Sistema de medição de pontes térmicas .....	36
3.1.3.	Condições de fronteira das modelações .....	37
3.1.4.	Coeficiente de transmissão térmica linear $\Psi$ de vãos .....	38
3.1.5.	Programa THERM <sup>®</sup> .....	39
3.2.	Exemplo de aplicação .....	42
 <b>CAPÍTULO 4</b>		
4.	Soluções construtivas e modelação de pontes térmicas .....	49
4.1.	Notas e limitações.....	49
4.2.	Soluções construtivas .....	52
4.2.1.	Lajes .....	52
4.2.1.1.	Pavimento térreo – ensoleiramento.....	52
4.2.1.2.	Laje de piso sobre desvão ventilado .....	53
4.2.1.3.	Laje de cobertura plana – Acessível .....	55
4.2.1.4.	Laje de cobertura plana – não acessível.....	57
4.2.1.5.	Laje de cobertura inclinada .....	58
4.2.1.6.	Pavimento sobre local não aquecido .....	60
4.2.2.	Paredes .....	61
4.2.2.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior) .....	61
4.2.2.2.	Parede exterior (dupla).....	64
4.2.3.	Janelas .....	66
4.2.3.1.	Caixilharia .....	66

4.2.3.2.	Envidraçado .....	66
4.2.3.3.	Caixa de estore.....	67
4.3.	Modelação de pontes térmicas .....	69
4.3.1.	Ligação de fachada com laje de piso sobre desvão ventilado .....	69
4.3.1.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior) .....	69
4.3.1.2.	Parede exterior (dupla).....	71
4.3.2.	Ligação de fachada com pavimentos térreos (ensoleiramento).....	75
4.3.2.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior) .....	75
4.3.2.2.	Parede exterior (dupla).....	77
4.3.3.	Ligação de parede interior com pavimentos térreos (ensoleiramento) ...	80
4.3.4.	Ligação fachada/padieira .....	82
4.3.4.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior) .....	82
4.3.4.2.	Parede exterior (dupla).....	84
4.3.5.	Ligação fachada (caixa de estore)/padieira .....	87
4.3.5.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior) .....	87
4.3.5.2.	Parede exterior (dupla).....	89
4.3.6.	Ligações fachada/peitoril .....	92
4.3.6.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior) .....	92
4.3.6.2.	Parede exterior (dupla).....	94
4.3.7.	Ligações fachada/ombreira .....	97
4.3.7.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior) .....	97
4.3.7.2.	Parede exterior (dupla).....	99
4.3.8.	Ligação de fachada com varanda.....	102
4.3.8.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior) .....	102
4.3.8.2.	Parede exterior (dupla).....	104
4.3.9.	Ligação de fachada com pavimentos intermédios.....	107
4.3.9.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior) .....	107
4.3.9.2.	Parede exterior (dupla).....	109

---

4.3.10.	Ligação de fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos .....	112
4.3.10.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior).....	112
4.3.10.2.	Parede exterior (dupla) .....	114
4.3.11.	Ligação de paredes interiores com pavimentos sobre locais não aquecidos .....	117
4.3.12.	Ligação entre duas paredes verticais (cunhal).....	119
4.3.12.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior).....	119
4.3.12.2.	Parede exterior (dupla) .....	121
4.3.13.	Ligação de fachada com cobertura plana (sem platibanda) .....	123
4.3.13.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior).....	123
4.3.13.2.	Parede exterior (dupla) .....	125
4.3.14.	Ligação de fachada com terraço (com platibanda) .....	128
4.3.14.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior).....	128
4.3.14.2.	Parede exterior (dupla) .....	130
4.3.15.	Ligação de fachada com cobertura inclinada (Bordo lateral ou de empena).....	133
4.3.15.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior).....	133
4.3.15.2.	Parede exterior (dupla) .....	135
4.3.16.	Ligação de fachada com cobertura inclinada (beiral) .....	137
4.3.16.1.	Parede exterior simples (isolamento pelo exterior).....	137
4.3.16.2.	Parede exterior (dupla) .....	139
4.3.17.	Ligação entre duas lajes de cobertura inclinadas (cumeeira) .....	141
4.4.	Análise de resultados .....	143
4.4.1.	Análise dos valores do coeficiente de transmissão térmica linear $\Psi_e$ ...	143
4.4.2.	Análise comparativa entre valores $\Psi_i$ dos pormenores construtivos adequados à <i>Passivhaus</i> e os valores estabelecidos no Regulamento Térmico – RCCTE.....	144
4.4.3.	Análise da variação do coeficiente de transmissão térmica linear $\Psi_e$ , consoante a espessura do isolamento térmico.....	145

4.4.4. Análise gráfica da variação de $\Psi_e$ em função da espessura do isolamento térmico entre sistemas construtivos de paredes .....	147
4.4.5. Análise da influência da sobreposição do isolamento na caixilharia dos envidraçados .....	148
4.4.6. Análise da variação de $\Psi$ , consoante a posição e espessura do isolamento térmico nas lajes.....	149

## **CAPÍTULO 5**

5. Conclusões e perspectiva de trabalhos futuros .....	153
5.1. Considerações finais .....	153
5.2. Síntese de resultados.....	153
5.3. Conclusões finais.....	155
5.4. Perspetiva de trabalhos futuros .....	156

## **CAPÍTULO 6**

6. Pesquisa bibliográfica.....	159
--------------------------------	-----

## **ANEXOS**

Anexo A – Representação dos cortes e outras informações da caixilharia ec vekaslide .....	167
Anexo B – Características técnicas dos vidros e da caixa de estore.....	169
Anexo C – Características técnicas do elemento de corte térmico Schock Isokorb tipo O.....	171
Anexo D – Características técnicas do elemento de corte térmico Ancon – isolan MV .....	173
Anexo E – Características técnicas do elemento de corte térmico Ancon – isolan FD .....	175
Anexo F – Características técnicas do elemento de corte térmico Schock Isokorb tipo F .....	177
Anexo G – Resumo dos resultados para os valores $\Psi$ de ambos os métodos de medição .....	179
Anexo H – Representação gráfica do parâmetro $\Psi_i$ em função das espessuras de isolamento das ligações.....	181
Anexo I – Certificado de validação do programa Therm conforme a norma EN 10211:2007.....	199

## Índice de figuras

Figura 1.	Consumo total de energia final por setor de atividade (ktep).....	7
Figura 2.	Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de energia e tipo de utilização – Portugal, 2010 .....	8
Figura 3.	Fachada Sul – Casa <i>Passivhaus</i> Darmstad, Kranichstein .....	10
Figura 4.	Princípios básicos da construção <i>Passivhaus</i> .....	13
Figura 5.	Esquema resumo dos requisitos <i>Passivhaus</i> .....	14
Figura 6.	Necessidades anuais de aquecimento e de arrefecimento para um edifício (DL 80/2006) e uma <i>Passivhaus</i> .....	20
Figura 7.	Primeiras casas <i>Passivhaus</i> em Portugal – Ílhavo.....	21
Figura 8.	Imagem termográfica: a) Edifício comum; b) Edifício <i>Passivhaus</i> .....	26
Figura 9.	Identificação de alguns locais onde ocorrem pontes térmicas....	26
Figura 10.	Valores de $\Psi$ de acordo com a variação da posição da janela na envolvente externa .....	30
Figura 11.	Sistemas de medição, a) interiores, b) exteriores, c) interiores globais..	36
Figura 12.	Identificação dos parâmetros no pormenor construtivo .....	38
Figura 13.	Ecrã do programa THERM <sup>®</sup> onde é efetuada a abertura do ficheiro do pormenor construtivo .....	40
Figura 14.	Introdução das características dos materiais e das condições de contorno exterior e interior .....	40
Figura 15.	Introdução dos dados do sistema do vidro .....	41
Figura 16.	Introdução das características do sistema do vidro e das condições de contorno exteriores e interiores .....	42
Figura 17.	Representação do pormenor construtivo a estudar .....	42
Figura 18.	Solução construtiva de pavimento térreo – ensoleiramento.....	52
Figura 19.	Valor do coeficiente de transmissão térmica de pavimento térreo - ensoleiramento.....	52

Figura 20.	Solução construtiva de laje de piso sobre desvão ventilado.....	53
Figura 21.	Valor do coeficiente de transmissão térmica da laje de piso sobre desvão ventilado.....	53
Figura 22.	Elemento de fixação mecânica .....	54
Figura 23.	Sistema de fixação mecânica das placas isolantes.....	54
Figura 24.	Solução construtiva da laje de cobertura plana – acessível.....	55
Figura 25.	Valor do coeficiente de transmissão térmica de laje de cobertura plana – acessível.....	55
Figura 26.	Solução construtiva de laje de cobertura plana – não acessível .....	57
Figura 27.	Valor do coeficiente de transmissão térmica da laje de cobertura plana – não acessível.....	57
Figura 28.	Solução construtiva da laje de cobertura inclinada.....	58
Figura 29.	Valor do coeficiente de transmissão térmica de laje de cobertura inclinada.....	59
Figura 30.	Solução construtiva de pavimento sobre locais não aquecidos .....	60
Figura 31.	Valor do coeficiente de transmissão térmica de pavimento sobre local não aquecido.....	60
Figura 32.	Solução construtiva de parede exterior simples (isolamento pelo exterior).....	61
Figura 33.	Valor do coeficiente de transmissão térmica de parede exterior (isolamento pelo exterior) .....	62
Figura 34.	Travamento do sistema de isolamento .....	62
Figura 35.	Perfil de esquina .....	63
Figura 36.	Solução construtiva de parede exterior (dupla) .....	64
Figura 37.	Valor do coeficiente de transmissão térmica de parede exterior dupla ..	64
Figura 38.	Exemplo de grampos para alvenaria.....	65
Figura 39.	Densidade e posicionamento de grampos .....	65
Figura 40.	Posição do isolamento nos vãos envidraçados.....	67

---

Figura 41.	Reforço dos cantos dos vãos .....	67
Figura 42.	Ligação de fachada (parede simples) com laje de piso sobre desvão ventilado.....	69
Figura 43.	Resultado Therm da ligação de fachada (parede simples) com laje de piso sobre desvão ventilado: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	70
Figura 44.	Valores de $\Psi_e$ segundo a variação de espessura do isolamento de parede exterior e do isolamento da laje .....	71
Figura 45.	Ligação de fachada (parede dupla) com laje de piso sobre desvão ventilado.....	71
Figura 46.	Resultado Therm da ligação de fachada (parede dupla) com laje de piso sobre desvão ventilado: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	73
Figura 47.	Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e do isolamento da laje .....	74
Figura 48.	Ligação de fachada (parede simples) com pavimentos térreos (ensoleiramento) .....	75
Figura 49.	Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com pavimentos térreos (ensoleiramento) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas .....	76
Figura 50.	Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e do isolamento da laje .....	77
Figura 51.	Ligação de fachada (parede dupla) com pavimentos térreos (ensoleiramento) .....	77
Figura 52.	Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com pavimentos térreos (ensoleiramento) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	79
Figura 53.	Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior dupla e do isolamento da laje .....	79
Figura 54.	Ligação de parede interior com pavimentos térreos (ensoleiramento) ...	80

Figura 55. Resultado Therm da ligação de parede interior com pavimentos térreos (ensoleiramento): a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	81
Figura 56. Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e do isolamento da laje .....	81
Figura 57. Ligação fachada (parede simples)/padieira .....	82
Figura 58. Resultados Therm da ligação fachada (parede simples)/padieira: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	83
Figura 59. Influência da sobreposição do isolamento na caixilharia e variação da espessura de isolamento da parede no valor de $\Psi_e$ .....	84
Figura 60. Ligação fachada (parede dupla)/padieira .....	84
Figura 61. Resultados Therm da ligação fachada (parede dupla)/padieira: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	85
Figura 62. Influência da sobreposição do isolamento na caixilharia e variação da espessura de isolamento da parede no valor de $\Psi_e$ .....	86
Figura 63. Ligação fachada (parede simples) e caixa de estore/padieira.....	87
Figura 64. Resultados Therm da ligação fachada (parede simples) e caixa de estore/padieira: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	88
Figura 65. Influência da sobreposição do isolamento na caixilharia e variação da espessura de isolamento da parede no valor de $\Psi_e$ .....	89
Figura 66. Ligação fachada (parede dupla) e caixa de estore/padieira.....	89
Figura 67. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) e caixa de estore/padieira: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	90
Figura 68. Influência da sobreposição do isolamento na caixilharia e variação da espessura de isolamento da parede no valor de $\Psi_e$ .....	91
Figura 69. Ligação fachada (parede simples)/peitoril .....	92



---

Figura 70.	Resultados Therm da ligação fachada (parede simples)/peitoril em pedra: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	93
Figura 71.	Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento térmico da parede exterior e do tipo de peitoril .....	94
Figura 72.	Ligação fachada (parede dupla)/peitoril .....	94
Figura 73.	Resultados Therm da ligação fachada (parede dupla)/peitoril em pedra: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	95
Figura 74.	Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento térmico da parede exterior dupla e do tipo de peitoril.....	96
Figura 75.	Ligação fachada (parede simples)/ombreira.....	97
Figura 76.	Perfil de janela .....	98
Figura 77.	Resultados Therm da ligação fachada (parede simples)/ombreira: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	98
Figura 78.	Influência da sobreposição do isolamento na caixilharia e variação da espessura de isolamento da parede no valor de $\Psi_e$ .....	99
Figura 79.	Ligação fachada (parede dupla)/ombreira.....	99
Figura 80.	Resultados Therm da ligação fachada (parede dupla)/ombreira: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	100
Figura 81.	Influência da sobreposição do isolamento na caixilharia e variação da espessura de isolamento da parede dupla no valor de $\Psi_e$ .....	101
Figura 82.	Ligação de fachada (parede simples) com varanda .....	102
Figura 83.	Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com varanda: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	103
Figura 84.	Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento térmico da parede exterior e do elemento de corte térmico .....	104
Figura 85.	Ligação de fachada (parede dupla) com varanda .....	104
Figura 86.	Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com varanda: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	105

Figura 87.	Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento térmico da parede exterior dupla e do elemento de corte térmico .....	106
Figura 88.	Ligação de fachada (parede simples) com pavimentos intermédios ....	107
Figura 89.	Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com pavimentos intermédios: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	108
Figura 90.	Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior.....	108
Figura 91.	Ligação de fachada (parede dupla) com pavimentos intermédios.....	109
Figura 92.	Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com pavimentos intermédios: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas	110
Figura 93.	Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior (dupla) e do elemento de corte térmico .....	111
Figura 94.	Ligação de fachada (parede simples) com pavimentos sobre locais não aquecidos.....	112
Figura 95.	Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com pavimentos sobre locais não aquecidos: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	113
Figura 96.	Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e da laje interior .....	114
Figura 97.	Ligação de fachada (parede dupla) com pavimentos sobre locais não aquecidos.....	114
Figura 98.	Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com pavimentos sobre locais não aquecidos: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	116
Figura 99.	Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior (dupla) e da laje interior .....	116
Figura 100.	Ligação de paredes interiores com pavimentos sobre locais não aquecidos.....	117

---

Figura 101. Resultados Therm da ligação de paredes interiores com pavimentos sobre locais não aquecidos: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	118
Figura 102. Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento na laje interior.....	118
Figura 103. Ligação entre duas paredes simples verticais (cunhal).....	119
Figura 104. Resultados Therm da ligação entre duas paredes simples verticais (cunhal): a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	120
Figura 105. Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento das paredes exteriores.....	120
Figura 106. Ligação entre duas paredes duplas verticais (cunhal).....	121
Figura 107. Resultados Therm da ligação entre duas paredes duplas verticais (cunhal) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	122
Figura 108. Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento das paredes exteriores duplas.....	122
Figura 109. Ligação de fachada (parede simples) com cobertura plana (sem platibanda).....	123
Figura 110. Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com cobertura plana (sem platibanda): a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	124
Figura 111. Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e da cobertura plana.....	125
Figura 112. Ligação de fachada (parede dupla) com cobertura plana (sem platibanda).....	125
Figura 113. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com cobertura plana (sem platibanda): a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	127
Figura 114. Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior (dupla) e da cobertura plana.....	127
Figura 115. Ligação de fachada (parede simples) com terraço (com platibanda)....	128

Figura 116. Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com terraço (com platibanda): a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	129
Figura 117. Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e da cobertura plana .....	130
Figura 118. Ligação de fachada (parede dupla) com terraço (com platibanda).....	130
Figura 119. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com terraço (com platibanda): a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	132
Figura 120. Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e da cobertura plana .....	132
Figura 121. Ligação de fachada (parede simples) com cobertura inclinada (bordo lateral ou de empena) .....	133
Figura 122. Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com cobertura inclinada (bordo lateral ou de empena): a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	134
Figura 123. Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e da cobertura inclinada.....	134
Figura 124. Ligação de fachada (parede dupla) com cobertura inclinada (bordo lateral ou de empena) .....	135
Figura 125. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com cobertura inclinada (bordo lateral ou de empena): a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	136
Figura 126. Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior dupla e da cobertura inclinada .....	136
Figura 127. Ligação de fachada (parede simples) com cobertura inclinada (beiral)	137
Figura 128. Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com cobertura inclinada (beiral): a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	138

---

Figura 129. Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e da cobertura inclinada.....	138
Figura 130. Ligação de fachada (parede dupla) com cobertura inclinada (beiral)...	139
Figura 131. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com cobertura inclinada (beiral): a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas.....	140
Figura 132. Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior dupla e da cobertura inclinada .....	140
Figura 133. Ligação entre duas lajes de cobertura inclinadas (cumeeira) .....	141
Figura 134. Resultados Therm da ligação entre duas lajes de cobertura inclinada (cumeeira) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas .	142
Figura 135. Valores de $\Psi_e$ segundo a variação da espessura de isolamento das lajes cobertura.....	142
Figura 136. Exemplo dos valores de $\Psi$ apresentados no RCCTE.....	144
Figura 137. Variação do valor $\Psi_e$ do pormenor construtivo da ligação de fachada (parede simples) com cobertura plana (sem platibanda).....	146
Figura 138. Variação do valor $\Psi_e$ da ligação de fachada (parede dupla) com varanda.....	146
Figura 139. Variação do valor $\Psi_e$ do pormenor construtivo da ligação entre duas paredes duplas (cunhal).....	147
Figura 140. Variação do valor $\Psi_e$ para a ligação de fachada com pavimentos térreos (ensoleiramento): a) Isolamento pelo exterior; b) Dupla .....	148
Figura 141. Relação entre a quantidade de isolamento e a sua posição na laje da ligação da fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos .....	149
Figura 142. Análise do posicionamento do isolamento nas lajes.....	150



---

## Índice de tabelas

Tabela 1. Necessidades de aquecimento e arrefecimento para casas novas construídas de acordo com os mínimos recomendados pela legislação em vigor e pela norma <i>Passivhaus</i> .....	17
Tabela 2. Diferença de custos e período de retorno das <i>Passivhaus</i> .....	18
Tabela 3. Necessidades e cargas energéticas da <i>Passivhaus</i> de referência.....	18
Tabela 4. Características das <i>Passivhaus</i> de referência .....	19





---

## Simbologia

- $\Psi$  – Coeficiente de transmissão térmica linear (W/m<sup>2</sup>.K)
- $\Psi_e$  – Coeficiente de transmissão térmica linear usando o sistema de medição exterior (W/m<sup>2</sup>.K)
- $\Psi_i$  – Coeficiente de transmissão térmica linear usando o sistema de medição interior (W/m<sup>2</sup>.K)
- $L^{2D}$  – Coeficiente de transmissão térmica obtido através do cálculo a duas dimensões
- $U$  – Coeficiente de transmissão térmica (W/m<sup>2</sup>.K)
- $U_p$  – Coeficiente de transmissão térmica da parede (W/m<sup>2</sup>.K)
- $U_w$  – Coeficiente de transmissão térmica da janela (W/m<sup>2</sup>.K)
- $L$  – Comprimento dentro do modelo geométrico bidimensional (m)
- $\phi_g$  – Fluxo global de calor por unidade de comprimento (W/m)
- $\Delta T$  – Diferença de temperatura entre o interior e o exterior do ambiente (K)
- $\vartheta_u$  – Temperatura média dos espaços não aquecidos (K)
- $\vartheta_i$  – Temperatura interior do ambiente (K)
- $\vartheta_e$  – Temperatura exterior do ambiente (K)
- $f$  – Fator de correção de temperatura
- $R_{se}$  – Resistência térmica superficial exterior ((m<sup>2</sup>.K)/W)
- $R_{si}$  – Resistência térmica superficial interior ((m<sup>2</sup>.K)/W)
- $b_w$  – Dimensão da janela até ao plano de corte perpendicular à superfície da janela (m)
- $b_p$  – Dimensão da parede até ao encontro com a caixilharia da janela (m)
- $\tau$  – Valor da temperatura adimensional do local não aquecido
- $CO_2$  – Dióxido de carbono
- $\chi$  – Coeficiente de transmissão térmica pontual



## **Acrónimos**

LNLB – Laboratório Nacional Lawrence Berkeley

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

EPBD – Energy Performance of Buildings Directive

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

XPS - Isolamento térmico em espuma rígida poliestireno extrudido

GEE – Gases de efeito de estufa



# **CAPÍTULO 1**

Introdução

---

# **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

- 1.1. Enquadramento do trabalho
- 1.2. Objetivos
- 1.3. Metodologia
- 1.4. Estrutura da dissertação

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento do trabalho

O Homem tem vindo a utilizar quantidades de energia cada vez mais elevadas, pelo que este recurso se tem tornado cada vez mais oneroso. A previsibilidade de escassez das fontes de energia não renováveis levou a que se implantassem ações que visem a diminuição do consumo de energia.

No que concerne ao setor residencial, o consumo energético e a problemática relacionada com as quantidades de gases com efeito de estufa emitidos para atmosfera são atualmente objeto de constante análise e investigação, no sentido de se desenvolverem tecnologias construtivas que reduzam quer esses consumos quer as emissões. Assim, a construção segundo os requisitos da *Passivhaus* apresenta-se como uma solução para se atingir essas reduções e para tornar os edifícios mais eficientes, já que promove a eficiência energética e um menor consumo de energia, através de medidas passivas.

Estas medidas, segundo o conceito *Passivhaus*, envolvem entre outras, a eliminação de pontes térmicas e a continuidade do isolamento térmico na envolvente, bem como a estanquidade do edifício, sendo essencial existir uma pormenorização rigorosa na fase de projeto e uma execução planeada e cuidada na fase de construção.

A envolvente do edifício representa um obstáculo ao fluxo de energia entre o exterior e o interior e vice-versa. Se estiver bem isolada termicamente, permitirá o controlo da energia que é desperdiçada promovendo a redução de perdas de calor e os gastos energéticos de climatização. Caso isso não se verifique haverá um desperdício avultado da energia gerada pelos sistemas de climatização, ou na sua ausência, um elevado desconforto no interior dos edifícios/fração.

As pontes térmicas podem contribuir significativamente para esse desperdício pelo que o estudo destas zonas tem-se revelado importante. A avaliação das pontes térmicas tem sido realizada através dos métodos de cálculo simplificado, detalhado ou experimental. Estes estudos, além de permitirem quantificar as perdas térmicas, possibilitam a análise do risco de ocorrência de condensações ou bolores superficiais, nos paramentos interiores da envolvente.

## 1.2. Objetivos

Um dos objetivos da dissertação é desenvolver um catálogo de pormenores construtivos que obedecem às exigências da construção segundo os requisitos da *Passivhaus*, para cada um dos quais se pretende apresentar os valores correspondentes de  $\Psi$  ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ), obtidos quer com medições exteriores quer com interiores. Os pormenores construtivos desenvolvidos seguem as soluções construtivas (sistema de construção de parede simples com isolamento pelo exterior e sistema de paredes duplas com isolamento no seu interior) mais utilizadas em Portugal e visam atingir pontes térmicas lineares quase nulas. Para cada ligação construtiva estudada, pretende-se identificar a solução ótima a adotar tendo sempre em vista o cumprimento da condição  $\Psi \leq 0,01 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ .

O resultado deste trabalho não pretende apenas facultar aos projetistas um conjunto de pormenores construtivos que os ajude a resolver e a eliminar as pontes térmicas lineares, na ligação entre elementos, mas também constituir um elemento importante para a formação das entidades executantes.

## 1.3. Metodologia

Para se atingir os objetivos estabelecidos procedeu-se ao desenvolvimento dos pormenores construtivos das ligações e ao cálculo do valor do coeficiente de transmissão térmica linear ( $\Psi$  ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ )), através do método de cálculo preconizado na norma EN ISO 10211: 2007.

Em cada pormenor realizou-se a sua modelação térmica com o *software* THERM 7<sup>®</sup> para se obter o fluxo de calor em 2D. Efetuou-se um estudo paramétrico no qual são combinadas diferentes espessuras e a posição do isolamento térmico dos elementos construtivos, visando o cálculo do respetivo coeficiente de transmissão térmica linear para se atingir as exigências do conceito *Passivhaus*. Nos vãos envidraçados fizeram-se algumas análises quanto à colocação do isolamento e dos elementos de peitoril. Dado que o Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE) efetua o cálculo dos  $\Psi$  ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ) dos edifícios considerando que as medições dos elementos construtivos se efetua pelo interior, e que a *Passivhaus* efetua esse mesmo cálculo considerando essas medições pelo exterior, efetuou-se o cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear ( $\Psi$ ) das diferentes ligações estudadas, considerando a medição das dimensões dos elementos construtivos realizada pelo exterior e pelo interior, para a posterior análise crítica.



Por fim, concebeu-se a descrição de forma faseada do processo construtivo de cada ligação otimizada e ainda a representação gráfica do valor do coeficiente de transmissão térmica linear ( $\Psi$ ) em função da variação da espessura do isolamento.

#### **1.4. Estrutura da dissertação**

A dissertação desenvolve-se ao longo de sete capítulos e oito anexos.

O capítulo 1 é dedicado ao enquadramento do tema, objetivos propostos, metodologia e estrutura da dissertação.

No capítulo 2 é abordada a temática do consumo energético a nível nacional. Esta abordagem incide em três aspetos: consumo energético no domínio público; o consumo de energia dos edifícios; regulamentação térmica dos edifícios; Ainda no capítulo 2 apresenta-se o conceito *Passivhaus* e são enumerados os requisitos impostos pela norma, a avaliação da norma quanto à sustentabilidade, eficiência energética, conforto e a parte económica. No mesmo capítulo apresenta-se a viabilidade de implementação da norma noutros climas, inclusive em Portugal. É apresentado também o método de conceção e de construção dos edifícios *Passivhaus*, bem como os requisitos impostos às pontes térmicas.

No capítulo 3 apresenta-se o método de avaliação utilizado no cálculo das pontes térmicas e descreve-se o programa THERM<sup>®</sup> utilizado no método.

O capítulo 4 é dedicado à aplicação do método de cálculo, à apresentação de varias soluções de pormenores construtivos, bem como dos resultados do respetivo coeficiente de transmissão térmica linear. Também se analisaram neste capítulo os resultados alcançados, que permitem obter informações sobre a correção das pontes térmicas.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões gerais referentes à globalidade do estudo efetuado e as perspetivas de trabalhos futuros.

A informação contida nos anexos divide-se: Anexo A, cortes e outras informações sobre a caixilharia utilizada no estudo; no anexo B, apresentam-se os elementos inerentes à caracterização dos vidros e da caixa de estore usados; no Anexo C, D, E e F, apresentam-se as características associadas a diferentes elementos de corte térmico; no anexo G, apresenta-se a tabela resumo dos coeficientes de transmissão térmica linear obtidos; no anexo H, apresentam-se os dados resultantes do cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear usando a medição pelo interior; no anexo I, apresenta-se o certificado de validação do programa de modelação térmica segundo requisitos da norma EN 10211:2007.



## **CAPÍTULO 2**

*Passivhaus*

---

## CAPÍTULO 2 – *PASSIVHAUS*

- 2.1. Perspetiva energética nacional
- 2.2. Conceito *Passivhaus*
- 2.3. Padrão *Passivhaus*
  - 2.3.1. Requisitos *Passivhaus*
  - 2.3.2. Sustentabilidade
  - 2.3.3. Eficiência energética
  - 2.3.4. Conforto
  - 2.3.5. Custos
- 2.4. *Passivhaus* noutros climas
  - 2.4.1. *Passivhaus* em Portugal
- 2.5. Conceção e construção de edifícios *Passivhaus*
  - 2.5.1. Orientação solar
  - 2.5.2. Envidraçados
  - 2.5.3. Estanquidade
  - 2.5.4. Ventilação com recuperação de calor
  - 2.5.5. Isolamento térmico
  - 2.5.6. Planeamento
- 2.6. Pormenorização construtiva: Pontes térmicas
  - 2.6.1. Pontes térmicas
  - 2.6.2. Projeto de pontes térmicas
  - 2.6.3. Avaliação de pontes térmicas

## 2. PASSIVHAUS

### 2.1. Perspetiva energética nacional

O consumo de energia em Portugal tem sofrido algumas alterações ao longo do tempo, sendo que o consumo de energia final (eletricidade, gás natural, propano ou butano, biomassa, etc) desde 2005 até 2010 tem vindo a diminuir, tendo no entanto em 2010 sofrido uma ligeira subida (ver Figura 1).

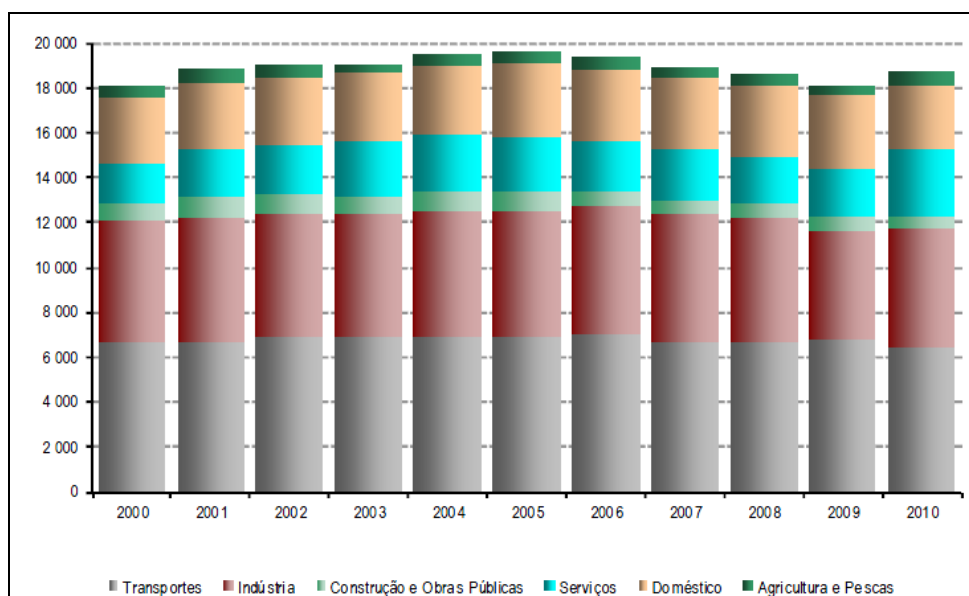


Figura 1. Consumo total de energia final por setor de atividade (ktep) (Fonte: DGEG, 2012)

Quanto ao consumo por setor, o que mais consome é o dos transportes, não apresentando grandes alterações ao longo dos anos, seguido pelo setor da indústria e depois pelo dos edifícios, que compreende o setor dos serviços e doméstico. O setor dos edifícios no seu total apresenta um aumento de consumo de energia que se deve à mudança dos hábitos de consumo no setor doméstico (INE & DGEG, 2011). Existe pois uma tendência para o aumento do consumo de energia relativamente às exigências de conforto dos habitantes. Assim sendo, o aumento de utilização de energia nas habitações poderá conduzir ao aumento de custos para os ocupantes, devendo por isso procurar-se formas de reduzir esse consumo, garantindo as exigências de conforto.

Segundo os censos de 2011, em Portugal existem cerca de 5.878.756 alojamentos (INE, 2012). Em 2010, o Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico indica que o

consumo, segundo o tipo de utilização de energia nesses alojamentos, corresponde a 39,1% na cozinha, seguindo-se o aquecimento de águas com 23,5% e o aquecimento do ambiente interior com 21,5%, como se verifica na Figura 2 (INE & DGEG, 2011).

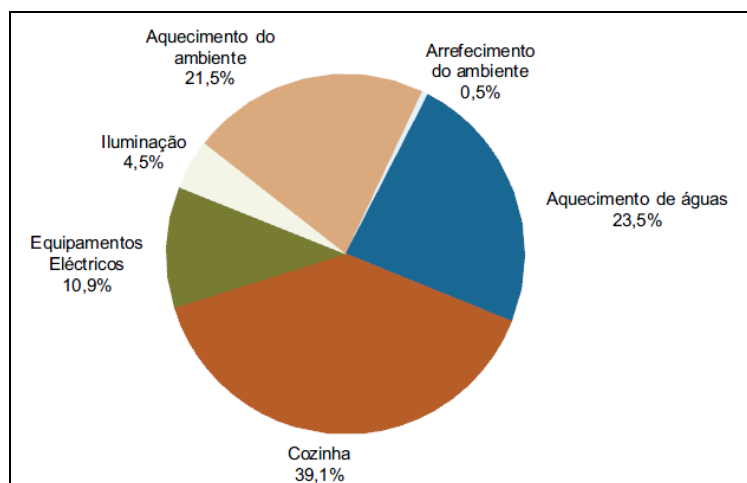


Figura 2. Distribuição do consumo de energia no alojamento por tipo de energia e tipo de utilização – Portugal, 2010 (Fonte: INE & DGEG, 2011)

Face ao consumo energético a nível global surgiu, através do parlamento europeu e do conselho da união europeia, em 2002, a Diretiva 2002/91/EU, relativa ao desempenho energético dos edifícios. Passados 8 anos da publicação desta diretiva é realizada a sua reformulação através da Diretiva 2010/31/EU. Esta nova publicação veio clarificar alguns princípios provenientes da primeira diretiva e introduzir novas linhas para promover a eficiência energética nos edifícios. A Diretiva 2010/31/EU estabelece uma maior redução das necessidades energéticas dos edifícios e que os Estados membros devem assegurar “o mais tardar em 31 de Dezembro de 2020, todos os edifícios novos sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia e após 31 de Dezembro de 2018, os edifícios novos ocupados e detidos por autoridades públicas sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia”. Um edifício de necessidades energéticas quase nulas define-se como tendo “um desempenho energético muito elevado” - seguindo uma metodologia de cálculo energético – e “as necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades” (EPBD, 2010).

Em Portugal a Diretiva 2002/91/EU foi transposta para o direito interno, tendo sido publicados três diplomas que visam a eficiência energética dos edifícios, o RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios), RSECE (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios) e o SCE (Sistema

Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios). Depois dos limites impostos pela Diretiva 2010/31/EU houve necessidade de se proceder à sua revisão, tendo sido publicada uma nova regulamentação, através do Decreto-Lei n.º 118/2013, que se destaca pela associação, num único diploma, do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), promovendo a “harmonização conceptual e terminológica e a facilidade de interpretação por parte dos destinatários das normas”. Este diploma faz ainda a atualização dos requisitos de qualidade térmica, entre outros. No entanto, encontra-se ainda dependente da publicação de despachos que a enquadram e das respetivas portarias com a definição de estratégias e metodologias até 1 de dezembro, altura em que o mesmo entra em vigor e passa a poder ser aplicado (Decreto-Lei n.º 118/2013).

Um estudo sobre como alcançar um melhor desempenho energético dos edifícios em Portugal tinha já reforçado a necessidade de se reformular a regulamentação portuguesa. Esse estudo já apontara algumas alterações a serem feitas nos regulamentos, a fim de se atingirem edifícios de consumo energético quase nulo, indo de encontro às metas apontadas pela Diretiva 2010/31/EU. Este trabalho previu claramente, alguns dos pontos-chave que foram alvo de reformulação no Decreto-Lei n.º 118/2013, nomeadamente, no que respeita à introdução de melhorias no sistema de classificação energética dos edifícios e ao incentivo à utilização de sistemas ou soluções passivos (Ferreira & Pinheiro, 2011).

Tendo em vista a reformulação dos regulamentos, outro estudo avaliou os requisitos das necessidades energéticas de arrefecimento para evitar o sobreaquecimento dos edifícios no verão, típico dos climas mediterrâneos. Os autores deste trabalho concluíram que alguns parâmetros estabelecidos pelo regulamento ainda em vigor (RCCTE, 2006), são insuficientes para evitar o sobreaquecimento no interior dos edifícios durante a estação de arrefecimento (Panão, Camelo, & Gonçalves, 2011). O novo regulamento a ser publicado em dezembro aponta para o mesmo problema, para a melhoria do comportamento térmico nos edifícios, a avaliação e a atualização dos requisitos inerentes ao sobreaquecimento.

## **2.2. Conceito *Passivhaus***

O conceito *Passivhaus* teve origem na sequência do trabalho desenvolvido pelos investigadores, Professor Bo Adamson da Suécia e Doutor Wolfgang Feist da Alemanha, que

em 1988 desenvolveram o conceito *Passivhaus* com base na construção de baixa energia, exigida nos anos 80 na construção de edifícios novos na Suécia e Dinamarca (Feist, 2006). O resultado desta investigação resultou na construção dos primeiros projetos *Passivhaus* na Europa, em Darmstadt – Kranichstein (1990) (ver Figura 3) e Groß Umstadt (1995), ambos na Alemanha. Tratava-se de moradias concebidas com o objetivo de alcançar um baixo consumo de energia a custos razoáveis para o clima alemão, tendo sido alvo de monitorização e da consequente análise de resultados (Passipedia, 2012; PHi, 2012).



Figura 3. Fachada Sul – Casa *Passivhaus* Darmstadt, Kranichstein (Fonte: W.Ebel)

O sucesso da primeira casa passiva levou à fundação do Passive House Institute, sediado em Darmstadt e liderado por Wolfgang Feist. Este instituto tem-se dedicado à investigação e desenvolvimento de edifícios eficientes sob o ponto de vista energético, essencialmente na Alemanha. No entanto, esta organização não se restringe somente à aplicação do conceito da casa passiva neste país, estando também a desenvolver o conceito noutros países (PHi, 2012).

### 2.3. Padrão *Passivhaus*

O padrão *Passivhaus* é constituído fundamentalmente por três componentes. Em primeiro lugar o limite das necessidades de energia, que envolve o aquecimento, o arrefecimento, a produção de água quente e eletricidade. A segunda componente é a exigência de qualidade, que envolve o conforto térmico dos utilizadores. Por último, é necessário um conjunto de sistemas preferencialmente passivos que permitem satisfazer o limite de energia e a exigência de qualidade a um custo rentável (Passive-on project, 2007).

A construção de edifícios em climas frios (do centro e norte da Europa) segundo os requisitos da *Passivhaus* leva à aplicação de níveis de isolamento muito elevados, de janelas triplas, à



ausência de pontes térmicas, à estanquidade do edifício e à instalação dum sistema de ventilação com recuperação de calor, não esquecendo que a tudo isto se deve aliar a utilização de equipamentos de baixo consumo elétrico. Com a conjugação de todos estes elementos é possível obter um edifício altamente eficiente (Cardoso & Ascenso, 2011).

A conceção de um edifício passivo passa por uma abordagem construtiva bastante rigorosa, com o objetivo de diminuir o consumo e aumentar o conforto, sendo necessário seguir com rigor os requisitos quer na fase de projeto quer na de construção (Cardoso & Ascenso, 2011).

O conceito *Passivhaus* encontra-se divulgado por todo o mundo, contando já com cerca de 37 mil edifícios construídos estando este número em ascensão. Este aumento deve-se ao facto do conceito *Passivhaus* não se restringir apenas a um tipo de construção, a um tipo de edifícios nem a um dado clima. Esta forma de construir pode ser adotada tanto na construção de madeira maciça ou seus derivados, na construção pré-fabricada, na construção de betão armado, sendo possível implementar-se na construção de edifícios de habitação, escolares, administrativos, industriais e hotéis, mostrando assim que o conceito se adequa a qualquer sistema construtivo e tipologia, segundo o fim a que se destina, independentemente da funcionalidade do edifício. Esta diversidade de aplicações do padrão *Passivhaus* está relacionada com o facto deste tipo de construção se basear apenas em princípios físicos (Passipedia, 2012).

### 2.3.1. Requisitos *Passivhaus*

O conceito *Passivhaus* envolve um conjunto de requisitos muito específicos a ser cumpridos na fase de projeto e de construção, que são fundamentais para se considerar um edifício como *Passivhaus* (PHi, 2012):

- Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento
- Consumo de energia primária
- Estanquidade
- Conforto térmico.

As necessidades nominais de energia para o **Aquecimento e o Arrefecimento** dos edifícios não podem exceder o limite de 15 kWh/(m<sup>2</sup>.ano) para cada situação. Estes valores são verificados com o auxílio do PHPP<sup>1</sup> (*Passive House Planning Package*).

---

<sup>1</sup> PHPP – Ferramenta importante para o projeto de casas passivas. Inclui o cálculo do balanço energético, planeamento de janelas, projeto de ventilação, determinação da carga de aquecimento e arrefecimento, estima o conforto de Verão e o projeto de aquecimento de águas quentes (Passipedia, 2012).

O consumo de **energia primária** inerente às aplicações de serviços energéticos (aquecimento de águas quentes, equipamentos elétricos, aquecimento e arrefecimento do ambiente) não deve exceder o limite de 120 kWh/(m<sup>2</sup>.ano) de acordo com o cálculo efetuado no PHPP.

A **estanquidade do edifício** ao ar deve ser verificada através do teste (Blower Door) de pressurização (positiva e negativa) a 50 Pa, cujos resultados para a taxa de renovação do ar deve ser inferior ou igual a 0,6 renovações de ar por hora.

O **conforto térmico** exige, no Inverno, que a temperatura de ar interior não seja inferior a 17 °C em todas as áreas do edifício, incluindo na superfície dos vãos envidraçados. No Verão a temperatura interior deve manter-se abaixo dos 26°C, não permitindo que este valor seja excedido por um período de tempo superior a 10%.

Aliado ao cumprimento dos critérios referidos são necessárias considerações (ver Figura 4) relativas às características e continuidade do isolamento térmico da envolvente. O valor de  $U$  (coeficiente de transmissão térmica) das coberturas, paredes e lajes da envolvente, não deve exceder os 0,15 W/(m<sup>2</sup>.K) em climas frios. Isto significa que apenas 0,15 watt atravessam perpendicularmente o elemento, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitária entre os ambientes que o separa, em cada metro quadrado da superfície (PHi, 2012).

O valor de  $U$  das janelas (incluindo caixilharia) ou outros elementos de construção translúcida, deve ser igual ou inferior a 0,8 W/(m<sup>2</sup>.K) e, quando instalados, igual ou inferior a 0,85 W/(m<sup>2</sup>.K) em climas frios. As janelas devem admitir valores de  $g$  (fator solar do envidraçado) o mais alto possível, com valores em torno de 0,5, ou seja, com ganhos energéticos na ordem dos 50% (Passipedia, 2012).

Outro fator a considerar tendo em conta os requisitos do padrão *Passivhaus* é a existência de ventilação com recuperação de calor. A ventilação com recuperação de calor deve possibilitar a qualidade do ar interior e baixo consumo energético. Isto deve ser conseguido através de um permutador de calor de elevado rendimento, permitindo no mínimo que 75% do calor resultante da recuperação de calor seja renovado e inserido no ambiente interno. A utilização de sistemas de recuperação de calor eficientes reduz perdas de calor por ventilação entre 75% a 90% (Passipedia, 2012).

Os sistemas de ventilação devem possuir ainda um baixo nível acústico (menos de 25 dB). Associado à ventilação é exigida a existência de pelo menos uma abertura por cada compartimento do edifício para favorecer o fluxo natural de ar nas noites de Verão (“*free cooling*”) (Passipedia, 2012).

A ausência de pontes térmicas (conexões entre elementos construtivos) é fundamental para o funcionamento térmico das casas *Passivhaus*, como tal devem ser eliminadas ou minimizadas

todas as ligações que possibilitam o fluxo de calor. O valor limite para o coeficiente de transmissão térmica linear é  $\Psi \leq 0,01 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ , considerando o sistema de medição da ponte térmica linear pelo exterior (Passipedia, 2012).

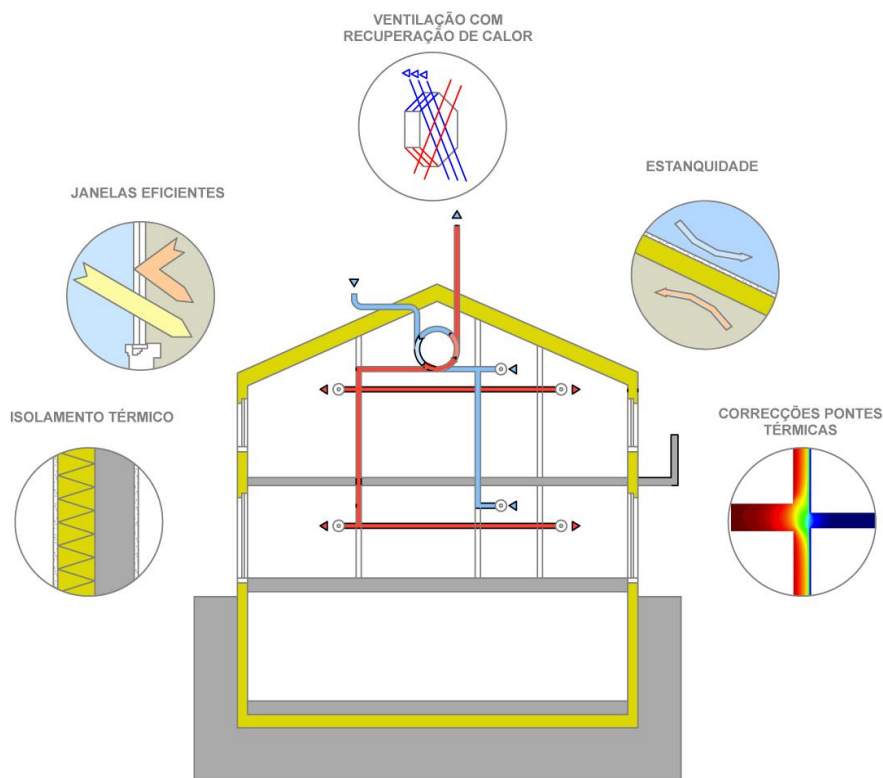


Figura 4. Princípios básicos da construção *Passivhaus* (Fonte: PZE-PP, 2013)

Na Figura 5 pode-se ver de uma forma esquemática a síntese dos requisitos da construção segundo o conceito *Passivhaus*.

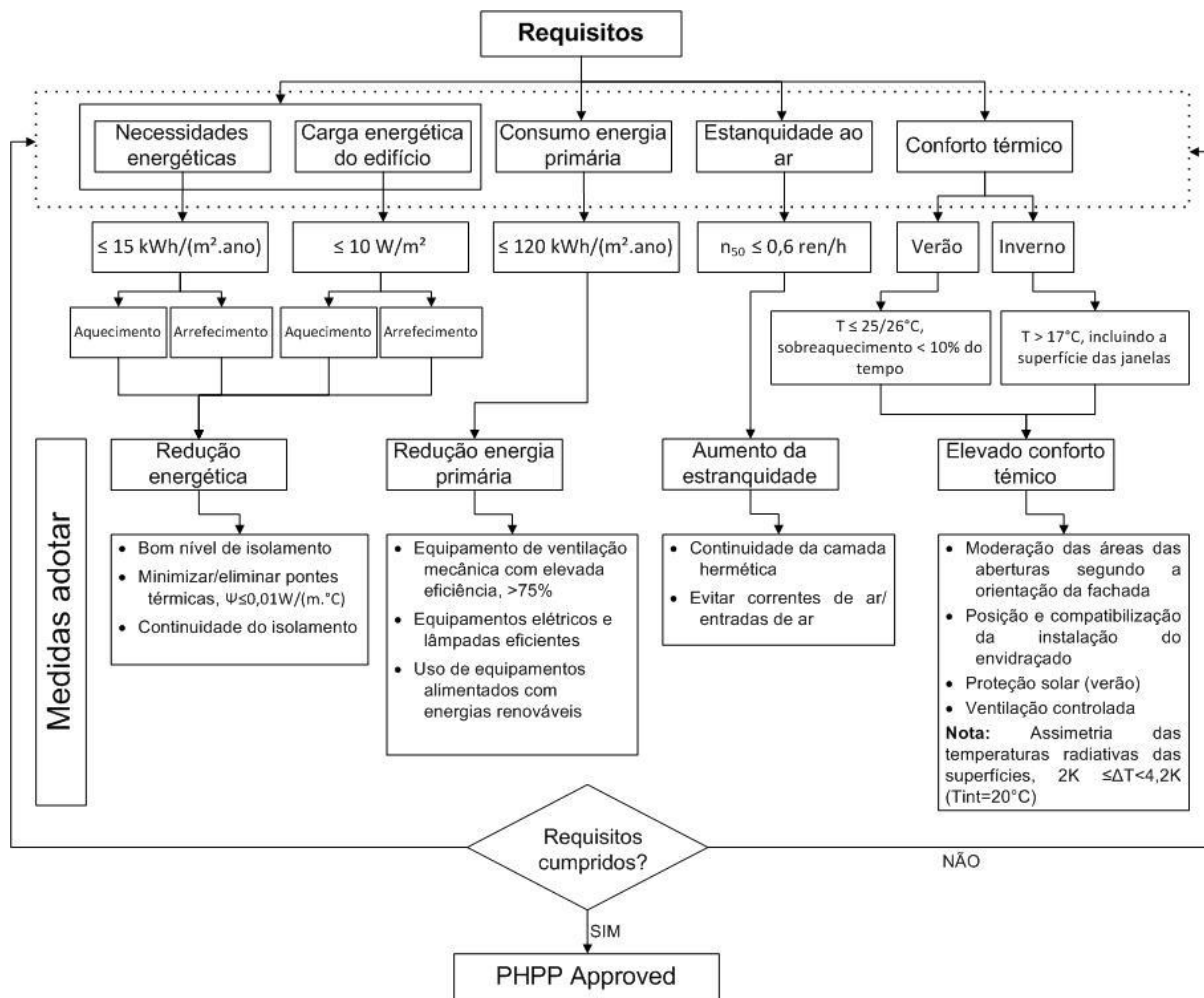


Figura 5. Esquema resumo dos requisitos *Passivhaus*

A construção *Passivhaus* não representa apenas um edifício que consome pouca energia, é também uma construção sustentável, que favorece o conforto dos utilizadores, capaz de ser obtido de forma acessível e ainda apresentar resultados ecologicamente favoráveis.

### 2.3.2. Sustentabilidade

Apesar da norma *Passivhaus* não obrigar ao uso de fontes renováveis, esta opção é uma solução que se pode considerar. Visto que o consumo dos edifícios *Passivhaus* por si só já é baixo, se a energia necessária tiver origem em fontes renováveis, então obtém-se um edifício mais sustentável (Cardoso & Ascenso, 2011). A energia de fontes renováveis pode-se conseguir com recurso a coletores solares e a sistemas fotovoltaicos, entre outros, que podem contribuir significativamente para a redução do consumo de energia primária (Passipedia, 2012).

A minimização da emissão dos gases de efeito de estufa (GEE) na atmosfera é um objetivo e compromisso tanto ao nível europeu como mundial. Sendo os edifícios uma grande fonte de emissão de  $CO_2$  para a atmosfera, os edifícios *Passivhaus* podem contribuir para a diminuição desses efeitos, pois o elevado nível de eficiência energética que apresentam, permite ter edifícios muito próximos de emissões zero. O facto de consumirem níveis de energia primária muito baixos permite a poupança de recursos energéticos e assim contribuir para a proteção do meio ambiente (Passipedia, 2012). Este contributo vai ao encontro das exigências da Diretiva 2010/31/EU.

A escolha dos materiais a usar nos edifícios *Passivhaus* é um aspeto a considerar na aplicação dos critérios de sustentabilidade, devendo ser escolhidos tendo em conta o transporte e o desempenho durante o ciclo de vida do edifício. Assim, deve-se optar pela utilização de materiais produzidos localmente e pela aplicação de materiais naturais, promovendo com isto a construção sustentável (Cardoso & Ascenso, 2011).

### 2.3.3. Eficiência energética

A construção de edifícios *Passivhaus* permite economizar cerca de 90% da energia face à construção existente na Europa e 75% relativamente à construção nova. Esta poupança reflete-se também noutros climas, onde o consumo de energia também ocorre no arrefecimento (climas quentes) (Passipedia, 2012; Schnieders, 2009).

O facto deste tipo de construção reduzir os consumos de energia, isso não significa que os edifícios percam qualidade de conforto, antes pelo contrário, pois além de consumirem baixos níveis de energia eles garantem um nível de conforto superior.

### 2.3.4. Conforto

O conceito *Passivhaus* dá primazia ao conforto dos ocupantes dos edifícios, mostrando, com a consideração de sistemas passivos, ser capaz de proporcionar valores de conforto acima do normal.

Esse conforto é conseguido sem a utilização dos normais dispositivos de aquecimento ou arrefecimento (Passipedia, 2012), mas sim através da energia interior dos edifícios, ou através dos ganhos solares (IPHA, 2010). Contribui também para o conforto a instalação de janelas (zonas propícias a maiores perdas de calor) eficientes sob o ponto de vista térmico, paredes, lajes de piso e de cobertura muito bem isoladas, concebidas para que o calor interno não seja

perdido através desses elementos (Passipedia, 2012). A utilização de ventilação mecânica, aliada aos itens anteriormente referenciados, permite manter a qualidade do ar interior, através da sua constante renovação (IPHA, 2010).

### 2.3.5. Custos

A construção *Passivhaus* é um investimento dado que resulta em ganhos económicos, já que as despesas com o aquecimento ou arrefecimento deixam de ser necessárias ou passam a ser mínimas.

O investimento efetuado decorrente dos materiais, janelas, isolamento e sistema de ventilação, em conformidade com os requisitos que a norma estabelece, promove a diminuição das necessidades energéticas e a consequente diminuição de custos ao longo da vida útil da edificação (Passipedia, 2012). De acordo com um estudo sobre a viabilidade económica do conceito *Passivhaus* aplicado a uma habitação unifamiliar construída em Portugal (Aveiro), verificou-se que o investimento adicional (cerca de 15.000€) permitiu poupar na fatura energética logo no primeiro ano 1.100€, comparativamente com o mesmo edifício com uma classe energética A (segundo o RCCTE (2006)) e estando dependente exclusivamente de energia elétrica para os vários serviços (Grangeia, 2013).

Ao fazer-se a comparação de custos entre edifícios *Passivhaus* e edifícios concebidos e construídos segundo o método convencional, verifica-se um custo adicional de cerca de 10% na conceção de edifícios unifamiliares isolados ou geminados. Na construção de edifícios com cobertura plana e em habitações multifamiliares o acréscimo é de aproximadamente 8%. Para edifícios de serviços, como escolas e grandes escritórios esse aumento ronda os 5% (IPHA, 2010). O trabalho realizado por Grangeia (2013) revela que para uma moradia isolada construída em Portugal representa um custo adicional de cerca de 10% a 12%. No entanto, ao longo do tempo a experiência vai sendo adquirida, o que permitirá construir este tipo de edifícios com custos adicionais inferiores.

Segundo Wolfgang Feist, o objetivo não é conceber uma casa sem sistemas construtivos específicos, apesar de ser possível a sua realização. Então, com vista a tornar este tipo de construção rentável o *Passive House Institute* tem procurado reunir esforços junto dos fabricantes para conseguir solucionar a construção respeitando a norma *Passivhaus* sem esforços financeiros avultados, criando produtos e sistemas construtivos que se adequem ao conceito e que estejam disponíveis a custos acessíveis (Cardoso & Ascenso, 2011).

## 2.4. *Passivhaus* noutros climas

Inicialmente a norma *Passivhaus* foi desenvolvida para países do Norte e Centro da Europa, tendo-se provado através da monitorização dos edifícios construídos que o conceito é eficaz. Perante a aplicação e resultados positivos procurou-se transpor o conceito para os países do Sul da Europa, perspetivando-se que o clima quente que caracteriza estes países, poderia constituir um obstáculo para a aplicação do conceito nestes climas. Face às dúvidas do sucesso da norma em climas quentes surgiu, em 2005, o consórcio Passive-On que procurou desenvolver uma proposta de revisão para a aplicação da norma *Passivhaus* para os climas quentes da Europa (Gonçalves & Brotas, 2007). Também Schnieders (2009) analisou a aplicação da norma em várias regiões do Mediterrâneo, cujos resultados foram publicados sob o título *Passive Houses in South West Europe*.

Essencialmente, o que se procurou responder com o projeto elaborado pela Passive-On foi definir o limite da energia necessária para arrefecimento nos países de climas quentes, algo que noutros países europeus não assume grande importância, devido ao clima frio que apresentam. O projeto envolveu 5 países: Portugal, Espanha, Reino Unido, França e Itália (Gonçalves & Brotas, 2007). Este estudo mostra diferenças evidentes nas necessidades energéticas associadas à construção *Passivhaus* relativamente à construção convencional de cada país, indicadas na Tabela 1.

Tabela 1. Necessidades de aquecimento e arrefecimento para casas novas construídas de acordo com os mínimos recomendados pela legislação em vigor e pela norma *Passivhaus* (Fonte: Adaptado de Passive-on project, 2007)

	Necessidades de aquecimento (kWh/(m <sup>2</sup> .a))		Necessidades de arrefecimento (kWh/(m <sup>2</sup> .a))	
	Típica	<i>Passivhaus</i>	Típica	<i>Passivhaus</i>
<b>Alemanha</b>	90	15	0	0
<b>Itália</b>	111	10,5	4,63	3
<b>França</b>	69,6	17,4	n/a	5
<b>Espanha</b>	59	8,7	23,1	7,9
<b>Portugal</b>	73,5	5,8	32	3,7
<b>Reino Unido</b>	59	15	0	0

No que respeita a diferença de custos associados à construção *Passivhaus*, o estudo mostrou que os custos adicionais relativamente à construção convencional variam entre 3% a 10%, apresentando-se a Espanha como sendo o país que melhor justifica o investimento (Gonçalves & Brotas, 2007). De salientar que o período de retorno para os casos de estudo do projeto variou entre os 4 e os 19 anos, concluindo ainda que à medida que se desce para o sul da Europa o período de retorno acompanha esse decréscimo. Como se verifica na Tabela 2, o

Reino Unido apresenta um período de retorno de 19 anos, enquanto mais a Sul, Portugal tem um período de retorno de 12 anos e a Espanha de 4 a 5 anos (Gonçalves & Brotas, 2007).

Tabela 2. Diferença de custos e período de retorno das *Passivhaus* (Fonte: Adaptado de Gonçalves & Brotas, 2007)

		Reino Unido	Alemanha	França	Portugal	Itália	Espanha (Granada)	Espanha (Sevilha)
Custos médios de construção (Euro/m <sup>2</sup> )	Casa de referência	1317	1400	1100	800	1200	720	720
	Casa Passiva	1390	1494	1203	858	1260	744,1	740,5
Diferença de custos	(Euro/m <sup>2</sup> )	+73,0	+94,0	+103	+58,0	+60,0	+24,1	+20,5
	(%)	+5,54	+6,71	+9,00	+7,00	+5,00	+3,35	+2,85
Período de retorno	(anos)	19	19	19,5	12	8	4	5

O estudo de Schnieders (2009) sobre a adaptação da norma *Passivhaus* ao clima mediterrânico teve em conta as temperaturas elevadas, a humidade do ar, a radiação solar entre outros aspetos.

O clima quente característico dos países do Sul da Europa exige menor isolamento térmico em relação ao que é imposto na Alemanha. Nos climas quentes a orientação a Sul dos envidraçados tem grande relevância, sendo que a utilização de vidros duplos e de baixa emissividade associados a dispositivos de sombreamento serão fundamentais no Verão, bem como a escolha adequada das cores do revestimento das fachadas exteriores (Schnieders, 2009). Este estudo indica ainda que um sistema de ventilação com recuperação de calor é essencial para a estação de aquecimento. Os resultados relativos a este estudo indicam que é possível a construção *Passivhaus* nestes países, com necessidades de aquecimento e arrefecimento muito baixas conforme se pode verificar na Tabela 3.

Tabela 3. Necessidades e cargas energéticas da *Passivhaus* de referência (Fonte: Adaptado de Schnieders, 2009)

	Necessidades de aquecimento (kWh/(m <sup>2</sup> a))	Necessidades de arrefecimento (kWh/(m <sup>2</sup> a))	Potência média de aquecimento diária (W/m <sup>2</sup> )	Potência média de arrefecimento diária (W/m <sup>2</sup> )
Mannheim	16,7	0,00	8,20	0,00
Lisboa	15,6	0,10	10,0	1,10
Porto	13,4	0,00	10,4	0,00
Sevilha	6,20	5,10	8,00	8,40
Madrid	14,7	1,10	9,90	5,30
Bordéus	10,1	0,00	9,70	0,00
Carpentras	13,1	0,00	9,40	0,00
Nice	14,5	3,40	10,0	6,80
Torino	16,4	2,80	9,70	6,10
Veneza	18,5	2,60	9,70	5,90
Campobasso	17,0	0,00	9,80	0,00
Nápoles	10,0	4,10	9,70	5,50
Palermo	4,40	7,90	7,90	5,70



### 2.4.1. *Passivhaus* em Portugal

A implementação da norma em Portugal passa por adaptar os requisitos legais e técnicos do país e fazer com que os projetistas possibilitem a aplicação do conhecimento existente para adaptar a norma (Cardoso & Ascenso, 2011).

O estudo de Schnieders (2009) para Portugal teve em conta a aplicabilidade no Porto e Lisboa, onde foram consideradas as características de referência das *Passivhaus* descritas na Tabela 4. Através destas características foi possível atingir baixas necessidades energéticas anuais, entre outros aspetos já apresentados na Tabela 3.

Tabela 4. Características das *Passivhaus* de referência (Fonte: Adaptado de Schnieders, 2009)

		Lisboa	Porto
<b>Parede</b>	<b>U (W/(m<sup>2</sup>K))</b>	0,62	0,202
	<b>Espessura do isolamento (cm)</b>	4	15
<b>Cobertura</b>	<b>U (W/(m<sup>2</sup>K))</b>	0,33	0,155
	<b>Espessura do isolamento (cm)</b>	8	20
<b>Cave</b>	<b>U (W/(m<sup>2</sup>K))</b>	0,85	0,432
	<b>Espessura do isolamento (cm)</b>	2	6
	<b>Redução das pontes térmicas</b>	Não	Não
<b>Janelas</b>	<b>U – Caixilharia (W/(m<sup>2</sup>K))</b>	1,6	1,6
	<b>U – Vidros (W/(m<sup>2</sup>K))</b>	1,2	1,2
	<b>g – Vidros (-)</b>	0,6	0,6
<b>Eficiência da recuperação de calor (-)</b>		0,85	0
<b>Fornecimento de ar aquecido</b>		Sim	Não
<b>Operação da bomba de arrefecimento *</b>		v/s	Nenhuma
<b>Controlo da humidade para arrefecimento</b>		Sim	Não

\*Compressor de velocidade variável com menor índice sensibilidade de calor

O projeto Passiv-On para uma casa *Passivhaus* localizada em Lisboa, estimou necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento de 5,9 kWh/(m<sup>2</sup>.ano) e 3,7 kWh/(m<sup>2</sup>.ano), respetivamente. A regulamentação energética RCCTE (2006) foi cumprida, sendo que a mesma habitação calculada segundo os requisitos deste regulamento, apresentava limites de necessidades de aquecimento e arrefecimento de 73,5 kWh/(m<sup>2</sup>.ano) e 32 kWh/(m<sup>2</sup>.ano),

respetivamente. O balanço térmico foi efetuado através da ferramenta *EnergyPlus* (Gonçalves & Brotas, 2007).

Outros estudos (Brandão, 2008; Almeida, 2013) verificaram o cumprimento das necessidades anuais máximas de aquecimento e arrefecimento estabelecidos pela norma *Passivhaus* para as cidades do Porto e Lisboa, através da adaptação dos sistemas construtivos correntes. O estudo de Almeida (2013) foi um pouco mais alargado, fazendo cumprir para outras cidades do país os requisitos da norma. Este estudo, alerta no entanto para o potencial risco de sobreaquecimento na estação de arrefecimento para zonas climáticas mais severas. O autor deste estudo realizou a comparação entre as necessidades de um edifício *Passivhaus* com as necessidades do mesmo edifício, mas com uma construção considerada *standard*, de boa qualidade, seguindo a regulamentação térmica portuguesa (RCCTE, 2006) e localizado em Aveiro. Usando a ferramenta PHPP concluiu que se pouparia com a casa *Passivhaus* cerca de 77% nas necessidades de aquecimento e 43% nas necessidades de arrefecimento. Na Figura 6 são apresentadas as necessidades anuais dos dois casos. Relativamente às necessidades de aquecimento aponta-se para o edifício *Passivhaus* e Standard, 15 kWh/(m<sup>2</sup>.a) e 66 kWh/(m<sup>2</sup>.a), respetivamente. As necessidades de arrefecimento para o edifício *Passivhaus* e Standard é de 8 kWh/(m<sup>2</sup>.a) e 14 kWh/(m<sup>2</sup>.a), respetivamente.

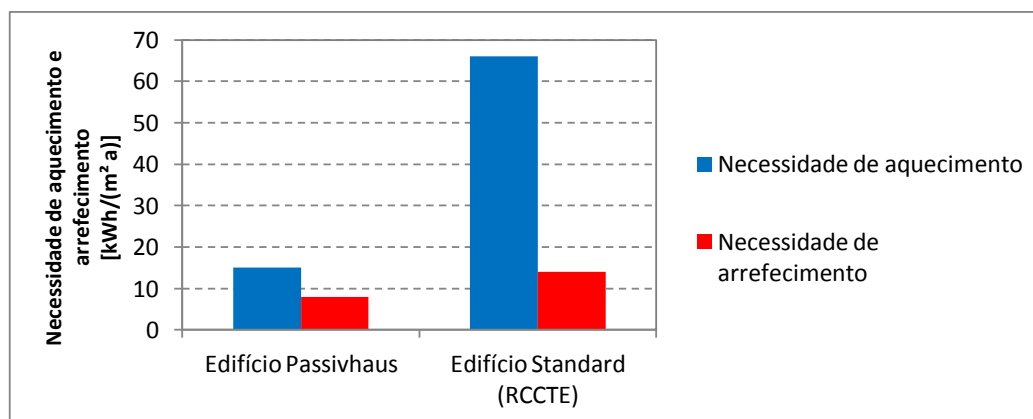


Figura 6. Necessidades anuais de aquecimento e de arrefecimento para um edifício (DL 80/2006) e uma *Passivhaus* (Fonte: Almeida, 2013)

A nível económico um projeto *Passivhaus* representa um acréscimo de custos na ordem dos 58 €/m<sup>2</sup> face à construção corrente em Portugal, conforme se indicou na Tabela 2, e apresenta um período de retorno do investimento de cerca de 12 anos. Enquanto, o estudo realizado por Almeida (2013) refere que o projeto *Passivhaus* acresce cerca de 10% em relação à casa Standard, representando um período de retorno entre 7 a 12 anos. No trabalho desenvolvido por Grangeia (2013) é apontado um período de retorno de 13 anos e de 15 anos quando o

edifício está dependente apenas de energia elétrica ou de energia elétrica e gás, respetivamente.

A construção das primeiras *Passivhaus*, em Portugal (ver Figura 7), ocorreu em Ílhavo, consistindo em duas moradias unifamiliares, construídas pela Homegrid<sup>2</sup>. Têm por base a aplicação da norma alemã, mas adaptada à realidade Portuguesa, sendo a sua certificação conduzida por Susanne Theumer da *Passive House Institute* (Marcelino & Gavião, 2012).



Figura 7. Primeiras casas *Passivhaus* em Portugal – Ílhavo

A construção das primeiras casas *Passivhaus* é um avanço no desenvolvimento do conceito no país, também ao nível da formação algumas entidades encontram-se a disponibilizar formação a técnicos promovendo a aproximação da norma às empresas, engenheiros, arquitetos e estudantes.

## 2.5. Conceção e construção de edifícios *Passivhaus*

Os edifícios *Passivhaus* para conseguirem atingir os seus objetivos não necessitarão de grandes mudanças face à construção que se realiza atualmente, sendo apenas necessário fazer um projeto e um planeamento pormenorizados, e uma construção mais rigorosa.

Nos detalhes inclui-se a utilização de maior quantidade de isolamento, a aplicação de janelas eficientes e a garantia da orientação correta do edifício, colocando as áreas que apresentam maiores vãos envidraçados dispostas de preferência a Sul. Tem ainda de se assegurar a estanquidade da envolvente e instalar um sistema de ventilação complementado com recuperação de calor, imprescindível para o aquecimento interior.

---

<sup>2</sup> Homigrid - <http://www.homegrid.pt/>

### 2.5.1. Orientação solar

A orientação solar é um fator importante, pois é possível tirar partido do Sol no Inverno, dispondo as áreas de envidraçados nas fachadas a Sul para permitir a captação de radiação solar na estação fria. Para maior contribuição energética os edifícios devem-se colocar, preferencialmente na parte Norte do terreno, de modo a evitar o sombreamento devido a obstáculos ou futuros edifícios (Guedes, 2009).

Um edifício com geometria retangular, sendo o seu comprimento disposto paralelamente à linha do Equador permitirá expor a maior área superficial do edifício a Sul durante a estação mais fria. Assim, é possível contribuir para a eficiência energética do edifício, minimizando necessidades de aquecimento e arrefecimento no Inverno e no Verão, respetivamente (Guedes, 2009).

### 2.5.2. Envidraçados

A construção passiva envolve a utilização de janelas *high-tech* e estas têm a vantagem de permitir um clima agradável no interior dos edifícios e um balanço térmico positivo, independentemente do clima em questão. Este tipo de envidraçados para edifícios *Passivhaus* na Europa Central apresentam baixos coeficientes de transmissão térmica (máximo 0,85 W/(m<sup>2</sup>.C)) e a sua constituição compreende caixilharia com corte térmico, vidro triplo *low-e* (vidros de baixa emissividade térmica), instalação otimizada na parede e bom isolamento. Janelas *low-e* beneficiam a eficiência energética do edifício, devido às características que permitem maiores ganhos de radiação solar, mantendo o calor no interior. Janelas bem isoladas promovem maior conforto térmico, e pelo contrário, as janelas mal isoladas favorecem perdas consideráveis de calor e o conseqüente aumento das necessidades de energia para aquecimento. A utilização de janelas eficientes contribui para a redução de cerca de 50% das perdas de calor, comparando com as janelas tradicionais (Passipedia, 2012).

### 2.5.3. Estanquidade

Um edifício que dê garantias ao nível da estanquidade pode prevenir muitos problemas associados a condensações e humidades. A construção de um edifício completamente estanque torná-lo-á isento de pontos (conexões entre materiais e cantos) abertos, pois estes

possibilitam a entrada de humidade cuja condensação leva ao aparecimento de fungos e bolores (IPHA, 2010).

Associado aos pontos de passagem de ar através da envolvente do edifício estão as perdas de calor que provocam desconforto e põem em causa a eficácia do sistema de ventilação com recuperação de calor, quando este se encontra instalado (Passipedia, 2012).

#### 2.5.4. Ventilação com recuperação de calor

O princípio do sistema de ventilação consiste em promover a substituição do ar viciado pelo ar fresco. O ar é continuamente retirado dos locais com elevados teores de poluentes e humidade, enquanto o ar fresco faz o caminho inverso. Manter os compartimentos frescos é um aspeto fundamental para o bem-estar e também para as questões higiénicas (Passipedia, 2012).

Abrir as janelas de forma a promover a renovação do ar é uma opção para obter a ventilação desejada, no entanto, este sistema não garante os efeitos desejados, pois para funcionar corretamente era necessário proceder a uma abertura das janelas durante 5 a 10 minutos em cada 3 horas (Passipedia, 2012).

Os sistemas de ventilação podem incluir recuperação de calor e apresentam-se na construção de casas passivas da Europa Central como um sistema altamente eficiente que consegue renovar o ar viciado e ainda recuperar o calor resultante da exaustão do ar. Para isso, é fundamental o auxílio de um permutador de calor que fornece novamente o ar, ao espaço, sem haver qualquer conflito no fluxo do ar. Associado ao sistema de recuperação de calor ainda é possível recorrer a outras soluções de aproveitamento do calor proveniente do ar extraído, nomeadamente através de uma bomba de calor compacta. Esta permite tornar o sistema mais eficiente, aproveitando a energia do ar extraído para fazer o aquecimento de águas (Passipedia, 2012).

A aplicação destes sistemas representam benefícios na construção *Passivhaus*, mas isso só é possível se houver a conjugação dos requisitos de isolamento térmico, estanquidade da envolvente, orientação solar e envidraçados.

#### 2.5.5. Isolamento térmico

A envolvente do edifício *Passivhaus* devidamente isolada permite atingir o objetivo de baixar as necessidades energéticas. Assim, toda a envolvente deve garantir que não existem perdas

nem ganhos de calor, conseguindo com isto atingir um bom conforto térmico no Inverno e no Verão.

O aumento do isolamento térmico da envolvente representa uma barreira contra o fluxo de radiação térmica. Quando o fluxo de calor tende para o interior (clima quente) a barreira de isolamento impede que esse fluxo se estabeleça, enquanto nos climas frios (fluxo tende para o exterior) evita a perda de energia calorífica. Com a envolvente bem isolada o edifício apenas admite uma pequena variação de temperatura, dado que existem superfícies no interior da envolvente com temperaturas mais baixas em relação ao espaço interior. Resultantes da variação térmica vão ocorrer correntes de convecção natural. No entanto, como a variação de temperatura é pequena, a massa de ar que se desloca no interior do edifício é bastante pequena não originando qualquer desconforto (Passipedia, 2012).

Na aplicação do isolamento térmico, a continuidade do mesmo, a espessura do material isolante e a eliminação das pontes térmicas são aspetos fundamentais para se atingir elevado nível de isolamento e também para responder às necessidades de aquecimento. Relativamente à construção de casas comuns a espessura do isolamento de casas *Passivhaus* (mínimo de 20 cm de isolamento no Norte da Europa) é muito superior (Passipedia, 2012).

### 2.5.6. Planeamento

A conceção da casa *Passivhaus* baseia-se no balanço energético que é calculado através da ferramenta informática PHPP (*Passive House Planning Package*).

O PHPP é uma folha de cálculo que permite otimizar e planear o edifício *Passivhaus*, dando conta de todas as características térmicas da envolvente, estabelecendo todo o conjunto de requisitos *Passivhaus* a considerar, designadamente, isolamento, projeto de pontes térmicas, janelas, ventilação, estanquidade, aquecimento, etc (Passipedia, 2012).

## 2.6. Pormenorização construtiva: Pontes térmicas

A consideração das pontes térmicas nas *Passivhaus* torna-se importante para garantir o seu desempenho. Para tal, será necessário ir de encontro à simplificação do modelo da construção *Passivhaus*, apoiando construtores e projetistas no conhecimento da importância que representam as pontes térmicas. Isto pode ser conseguido através da elaboração de pormenores construtivos que apoiam a conceção e a execução do projeto dos edifícios.

### 2.6.1. Pontes térmicas

Uma ponte térmica pode-se definir como o fenómeno localizado de transferência de calor na envolvente do edifício. De acordo com a norma EN ISO 10211:2007 a ponte térmica é considerada a área da envolvente do edifício que oferece menor resistência em relação à restante envolvente, conduzindo a elevadas perdas de calor nessa área. A presença das pontes térmicas deve-se a fatores relacionados com a existência de zonas com elementos estruturais localizados mais próximos do ambiente exterior (topos de lajes, vigas e pilares), a diferenças entre áreas internas e externas, como ocorre em ligações entre paredes e pavimentos e paredes e tetos, a existência de materiais com condutibilidade térmica diferente na envolvente do edifício, a existência de zonas onde o isolamento é interrompido, a mudança na espessura dos elementos construtivos e a outras situações com problemas nas ligações entre os diferentes elementos de construção (Labrincha, Samagaio, & Vicente, 2006; EN ISO 10211:2007).

Geralmente, o mais comum nos edifícios é aparecerem pontes térmicas bidimensionais ou lineares, que resultam, no mínimo, da ligação entre dois elementos, ou nos pontos onde a espessura dos elementos estruturais varia. Nestes casos o fluxo de calor nas zonas de pontes térmicas lineares é caracterizado pelo coeficiente de transmissão térmica linear ( $\Psi$ ), que depende de uma diferença de temperatura e traduz a taxa de transferência de calor por ela originada (Labrincha, Samagaio, & Vicente, 2006; Pechincha, 2011). Segundo Almeida (2013), este parâmetro é fundamental para aumentar a poupança energética. A redução deste parâmetro em cada ligação permitiria alcançar necessidades de aquecimento inferiores. Além das pontes térmicas lineares, existem também as pontes térmicas pontuais ou tridimensionais, que surgem nas extremidades tridimensionais, como é o caso dos cantos, ou no caso de uma parede isolada que é perfurada por outro elemento com condutibilidade térmica mais elevada. Estes tipos de pontes térmicas caracterizam-se por um coeficiente de transmissão térmica pontual  $\chi$  ( $W/^\circ C$ ) (Labrincha, Samagaio, & Vicente, 2006; Pechincha, 2011).

A garantia de continuidade do isolamento em toda a envolvente dos edifícios afigura-se como sendo essencial para se atingir uma redução significativa das pontes térmicas. No entanto, para algumas ligações torna-se difícil garantir tal continuidade do isolamento, pois a nível estrutural seria necessário interromper a ligação entre elementos fundamentais para a estabilidade estrutural. Para minimizar esse efeito, alguns fabricantes têm-se dedicado ao desenvolvimento de elementos isolantes que garantem a continuidade das estruturas, ao mesmo tempo que fazem o corte térmico (Erhorn et al., 2010). Estas soluções alternativas são essenciais para estabelecer a continuidade do isolamento na ligação de consolas com a laje

interior, pisos intermédios com sistema de parede exterior dupla, platibandas, entre outros. Nos anexos é possível ver alguns exemplos destas soluções.

O recurso a imagens termográficas é ideal para detetar a existência de pontes térmicas num edifício. Estas são possíveis de identificar através de irregularidades de temperatura superficial da envolvente. Nas imagens térmicas da Figura 8a) e Figura 8b) apresentam-se dois edifícios, onde as zonas vermelhas e amarelas mostram menor resistência térmica, enquanto as zonas verdes e azuis mostram maior resistência térmica. Verifica-se que o edifício do lado esquerdo perde mais calor através das paredes e janelas do que o edifício *Passivhaus* à direita.

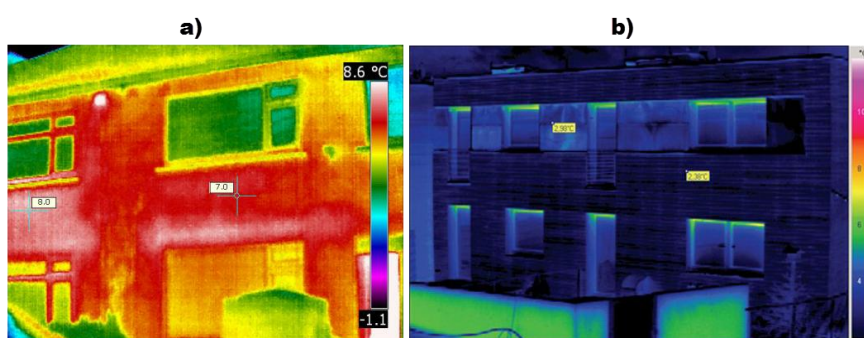


Figura 8. Imagem termográfica: a) Edifício comum (Fonte: [www.rebelenergy.ie](http://www.rebelenergy.ie)); b) Edifício *Passivhaus* (Fonte: Guido Wimmers)

Outras zonas, para além das visualizadas na Figura 8a) e Figura 8b) (ligações dos vãos às paredes, ligações parede-cobertura), onde podem ocorrer pontes térmicas são: na transição entre materiais de diferentes condutibilidades térmicas; na transição de alterações na espessura do elemento; encontros de paredes (cunhais); ligações entre paredes e pavimentos e entre paredes e tetos (Valério, 2007) (ver Figura 9).

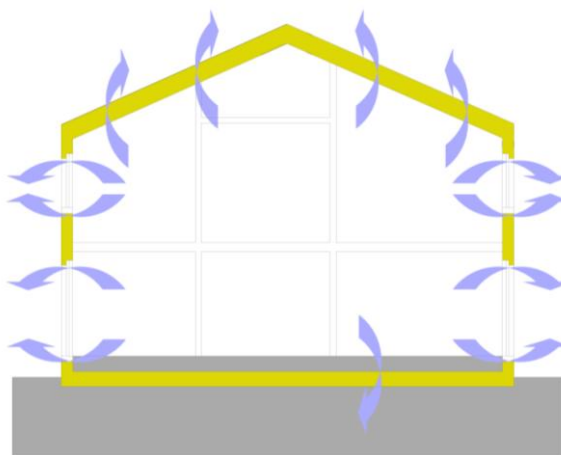


Figura 9. Identificação de alguns locais onde ocorrem pontes térmicas (Fonte: PZE-PP, 2013)



A existência de pontes térmicas nos edifícios promove o aumento das trocas de calor na envolvente, conduzindo diretamente a um aumento nos consumos energéticos. A desconsideração das pontes térmicas num edifício *Passivhaus* colocaria em causa a eficiência do isolamento térmico das zonas correntes, visto que o fluxo de calor tomaria o caminho das zonas onde a resistência térmica é menor (pontes térmicas) (Passipedia, 2012).

As necessidades energéticas superiores não são os únicos problemas que as pontes térmicas originam, podendo-se verificar também a ocorrência de patologias e a redução dos níveis de conforto. Esses efeitos devem-se à diminuição da temperatura das superfícies interiores, podendo dar origem a humidades de condensação nessas zonas frias (Valério, 2007). Por outro lado, as humidades de condensação dão origem a gastos adicionais de manutenção, problemas de durabilidade dos materiais, redução do conforto e o aparecimento de fungos e bolores que podem levar à insalubridade do ar e do restante ambiente envolvente (Labrincha, Samagaio, & Vicente, 2006).

Um aspeto fundamental na prevenção de pontes térmicas é a compacidade dos edifícios. Geralmente, o arquiteto resolve desenhar um edifício tendo em mente algo inovador e que sobressai-a ao olho humano. Para seguir essa perspetiva, ele acaba por criar um edifício com uma forma pouco regular, levando conseqüentemente ao aumento das pontes térmicas e dos custos associados às perdas de calor pela envolvente. Assim é necessário haver a sensibilização dos mesmos para estas questões e a interação com os projetistas da térmica, a fim de se evitarem estes problemas.

### 2.6.2. Projeto de pontes térmicas

O projeto de pontes térmicas é a chave para garantir que os edifícios *Passivhaus* se mantenham ausentes de pontes térmicas. Este projeto não só pode ajudar a uma construção de alto nível, bem como presta informações sobre as pontes térmicas, que servem de dados de entrada no cálculo de desempenho energético do edifício na fase inicial do projeto, i.e., na metodologia simplificada de previsão das necessidades de aquecimento em habitações (Carlos & Nepomuceno, 2012).

A ausência ou má conceção de um projeto deste tipo, muitas vezes implica má execução em obra e conseqüentemente resulta no aparecimento de grande número de pontes térmicas nos edifícios. Não olhar para estes problemas torna posteriormente mais difícil a eliminação das pontes térmicas estando o edifício concluído (Labrincha, Samagaio, & Vicente, 2006).

Fazer um planeamento cuidadoso ao nível dos detalhes é fundamental para se eliminarem/minimizarem as pontes térmicas, quer por parte dos projetistas quer pelos executantes das diversas especialidades durante a fase de construção (Passipedia, 2012). Dada a inexperiência dos projetistas e executantes, numa fase ainda de desenvolvimento e implementação do processo *Passivhaus* em Portugal, o trabalho que se pretende desenvolver revela-se importante, conseguindo através de vários pormenores construtivos apoiar projetistas e contribuir para a formação dos executantes, indo de encontro ao critério  $\Psi \leq 0,01$  W/(m. $^{\circ}$ C) impostos pela *Passivhaus*. Para isso é necessário criar ilustrações bem definidas e claras, proceder à descrição e ilustração da sequência de construção e por último ter em atenção a forma da linguagem adotada nas anotações de cada detalhe, devendo-se optar por uma linguagem simples de forma a facilitar a compreensão do utilizador (Schild, 2010).

### 2.6.3. Avaliação de pontes térmicas

A avaliação das pontes térmicas poderá ser efetuada através de cálculo experimental, através de métodos de ensaios normalizados a dois elementos de construção idênticos, sendo um com ponte térmica e outro sem. Este método restringe-se apenas a estes elementos de estudo. Assim a avaliação térmica torna-se pouco precisa, trabalhosa, demorada e cara. Este processo de cálculo limita-se apenas a ser aplicado em projetos de maior importância ou para validar os cálculos obtidos através de simulações (Larbi, 2005; McGowan & Desjarlais, 1997). As pontes térmicas podem também ser avaliadas através de métodos numéricos com ajuda de *software* especializado. Os *softwares* de cálculo automático baseiam-se essencialmente na introdução dos dados geométricos a 2D (THERM<sup>®</sup>, BISCO<sup>®</sup>, PSI-THERM 2D<sup>®</sup>, etc.) ou a 3D (TRISCO<sup>®</sup>, PSI-THERM 3D<sup>®</sup>, etc.) das pontes térmicas através de interface gráfica. Todos os *softwares* requerem um mínimo de conhecimento e algum cuidado relativamente à definição das condições fronteira de cada pormenor avaliado (Erhorn et al., 2010; Déqué, Ollivier, & Roux, 2001).

Várias normas são seguidas por todo o mundo na avaliação das pontes térmicas, seguindo os procedimentos de cálculo adotados e considerando várias hipóteses de cálculo (em regime estacionário a 1D e até dinamicamente a 2D). No entanto, as pontes térmicas não deixam de ser um problema, registando-se ainda em muitas ligações entre elementos construtivos. Isto leva a concluir que as perdas de energia são subestimadas durante o projeto devido à má previsão da espessura de isolamento, ou geralmente devido à escolha dos métodos de cálculo, e conseqüentemente, traduz-se numa maior (comparando com as pontes térmicas estimadas na

fase de projeto) necessidade de requisitos energéticos na prática (Theodosiou & Papadopoulos, 2008). A diferença entre as pontes térmicas estimadas e as reais realmente existe, apesar de ambos os métodos, analíticos ou de simulação, permitirem ao projetista alcançar resultados de perdas térmicas muito boas (Larbi, 2005; Déqué, Ollivier, & Roux, 2001).

Na Europa há países que desenvolveram catálogos com vários exemplos de pontes térmicas com parâmetros fixos (e.g. dimensões e tipos de materiais). Na Suíça, por exemplo, existe um catálogo em forma de tabelas com os valores de  $\Psi$  para diversos pormenores típicos de forma a ajudar construtores, arquitetos entre outros, na questão das pontes térmicas (GmbH, 2002). No entanto, esses pormenores não coincidem com a realidade *Passivhaus*. Igualmente no RCCTE (2006) podem-se encontrar alguns valores de  $\Psi$  para alguns pormenores tipo, mas que se destinam apenas à construção mais comum do país (valores  $\Psi$  mais permissivos a pontes térmicas). Portugal dispõe também de catálogos de pontes térmicas, com os títulos “Catálogo de pontes térmicas – Nota de informação técnica” (Corvacho, 1999) e “Catálogo de pontes térmicas lineares” (ITeCons, 2011), sendo que o primeiro apresenta não apenas os valores dos coeficientes  $\Psi$ , mas também toda a informação necessária para o seu cálculo e recomendações para a correção das mesmas. A utilização de valores tabelados pode traduzir a subestimação das perdas de energia devido às pontes térmicas (Déqué, Ollivier, & Roux, 2001).

O aumento da espessura de isolamento encontra-se associado a um maior número de pontes térmicas. Em todas as ligações é possível verificar uma maior transferência de energia devido ao efeito geométrico causado pelo aumento de isolamento, ou seja, maior área de transferência de energia (Berggren & Wall, 2013; Corvacho, 1996).

As pontes térmicas relativas à envolvente translúcida suscitam particular interesse na forma como a disposição das janelas e portas são posicionadas na envolvente exterior dos edifícios e o tipo de *spacer*<sup>3</sup> que é usado no bordo do vidro. Ou seja, indica que a posição destes elementos face à envolvente exterior, influencia o valor do coeficiente de transmissão térmica linear ( $\Psi$ ) (Cappelletti et al., 2011). Quando os elementos translúcidos são posicionados no interior do isolamento térmico da envolvente e o isolamento sobrepõe a caixilharia, tanto quanto possível, o coeficiente  $\Psi$ , associado à instalação da caixilharia pode tomar o valor zero (ver Figura 10) (Kehl, 2008). A sobreposição do isolamento na caixilharia é deveras

---

<sup>3</sup> Elemento colocado entre os vidros das janelas duplas ou triplas com a função de separar os vidros desempenhando ao mesmo tempo um papel de vedante e isolante dos bordos dos vidros (Van Den Bergh et al., 2013).

importante para se atingirem resultados significativos ao nível do parâmetro  $\Psi$ . Segundo os estudos ProKlima (n.d.) e de Cappelletti et al.(2011) este valor tende a baixar quando aumenta a espessura de isolamento sobre a caixilharia. Pelo contrário, o parâmetro  $\Psi$  mantém-se praticamente constante com o aumento da espessura de isolamento da parede. O estudo aponta também para o facto do acréscimo de isolamento não ser perceptível relativamente ao impacto sobre o custo total (ProKlima, n.d.).

		Non insulated jamb - rectangular sub-frame	Insulated jamb - L shaped sub-frame	Insulated jamb - insulation above frame	Non insulated sill - rectangular sub-frame	Insulated sill - rectangular sub-frame	Shutter box
External Insulated wall	external frame	$L^{2D}=0.777$ $\Psi_i=0.055$	$L^{2D}=0.759$ $\Psi_i=0.041$	$L^{2D}=0.738$ $\Psi_i=0.020$	$L^{2D}=0.795$ $\Psi_i=0.059$	$L^{2D}=0.787$ $\Psi_i=0.052$	$L^{2D}=1.187$ $\Psi_i=0.398$
	intermediate frame	$L^{2D}=0.879$ $\Psi_i=0.152$	$L^{2D}=0.776$ $\Psi_i=0.051$	$L^{2D}=0.763$ $\Psi_i=0.035$	$L^{2D}=0.902$ $\Psi_i=0.179$	$L^{2D}=0.824$ $\Psi_i=0.100$	$L^{2D}=1.023$ $\Psi_i=0.098$
	internal frame	$L^{2D}=0.941$ $\Psi_i=0.221$	$L^{2D}=0.815$ $\Psi_i=0.097$	$L^{2D}=0.788$ $\Psi_i=0.070$	$L^{2D}=0.986$ $\Psi_i=0.242$	$L^{2D}=0.856$ $\Psi_i=0.111$	$L^{2D}=0.894$ $\Psi_i=0.229$
Wall with cavity insulation	external frame	$L^{2D}=0.787$ $\Psi_i=0.059$	$L^{2D}=0.762$ $\Psi_i=0.039$	$L^{2D}=0.755$ $\Psi_i=0.027$	$L^{2D}=0.800$ $\Psi_i=0.060$	$L^{2D}=0.775$ $\Psi_i=0.034$	$L^{2D}=1.187$ $\Psi_i=0.398$
	intermediate frame	$L^{2D}=0.878$ $\Psi_i=0.149$	$L^{2D}=0.775$ $\Psi_i=0.046$	$L^{2D}=0.764$ $\Psi_i=0.035$	$L^{2D}=0.902$ $\Psi_i=0.161$	$L^{2D}=0.823$ $\Psi_i=0.082$	$L^{2D}=1.023$ $\Psi_i=0.098$
	internal frame	$L^{2D}=0.950$ $\Psi_i=0.222$	$L^{2D}=0.812$ $\Psi_i=0.090$	$L^{2D}=0.799$ $\Psi_i=0.077$	$L^{2D}=0.994$ $\Psi_i=0.255$	$\Psi_i=0.130$ $L^{2D}=0.869$	$L^{2D}=0.894$ $\Psi_i=0.229$

Figura 10. Valores de  $\Psi$  de acordo com a variação da posição da janela na envolvente externa (Fonte: Cappelletti et al., 2011)

Relativamente ao tipo de *spacer*, existe uma grande diferença entre *spacers* de alumínio (atuam como ponte térmica na ligação vidro/caixilharia) e outras soluções (combinação de aço inoxidável e termoplásticos, espumas) mais eficientes (Van Den Bergh et al., 2013;

Pfluger et al., 2003). Estas soluções permitem alcançar consideráveis poupanças de energia e ainda minimizar o risco de condensações e a consequente formação de bolores (ENSINGER, 2001). Há estudos que comprovam que apenas é possível obter melhorias significativas quando a quantidade de metal na constituição do *spacer* é menor (Van Den Bergh et al., 2013; Pfluger et al., 2003).

No cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear ( $\Psi$ ) é necessário a medição dos elementos construtivos, podendo este procedimento induzir em erro quando a abordagem não é feita da forma mais correta, pois, os valores específicos das pontes térmicas podem sofrer alterações consoante a medição das dimensões dos elementos se efetue pelo interior, pelo interior incluindo a espessura das paredes divisórias ou pelo exterior (Berggren & Wall, 2013; EN ISO 14683:2005).

Um recente estudo realizado na Suécia comprovou a existência do risco de má interpretação quanto à aplicação da norma EN ISO 13789:2007 (Berggren & Wall, 2013). Esta tem em conta 3 métodos diferentes de medição para o cálculo do valor  $\Psi$  (EN ISO 13789:2007). A dimensão dos elementos construtivos difere de acordo com a interpretação feita quanto às ligações entre os diversos elementos estarem ou não incluídos nas áreas desses elementos (Berggren & Wall, 2013). O conhecimento entre a utilização de dimensões externas ou internas é necessário, dado que os cálculos de transferência de calor sofrem desvios em relação às metodologias de cálculo usadas (Carlos & Nepomuceno, 2012). O estudo de Berggren & Wall (2013) revela a falta de compreensão sobre o impacto dos diferentes métodos de medição das pontes térmicas, conduzindo consequentemente a cálculos erróneos que levam a sistemas de aquecimento subdimensionados, inexistência de conforto interior e custos de energia adicionais. Aponta também para o cuidado nas trocas de informações entre engenheiros e arquitetos, ou estudos e publicações sobre informações de pontes térmicas sem a definição clara do sistema de medição aplicado. Verifica-se a inexistência de práticas e/ou normas que identifiquem o método de medição usualmente aplicado, focando a necessidade de normas de construção mais esclarecedoras e orientadoras sobre a utilização das normas internacionais (Berggren & Wall, 2013).

Numa *Passivhaus* são utilizadas as dimensões exteriores no cálculo das perdas de calor, verificando-se com esse tipo de medições, que o valor de  $\Psi$  pode tomar valores negativos. Estes valores negativos significam que o fluxo numa ponte térmica (2D) pode ser menor do que o fluxo energético a uma dimensão. No entanto, isto torna-se uma mais-valia, dado que conduzirá a um aumento de aquecimento no edifício (ganhos de energia) através do balanço energético, podendo neste caso considerar-se a ponte térmica nula e admitir-se que o balanço

térmico se encontra do lado da segurança (Mcleod, Mead & Standen, 2012; Vicente et al., 2013).

Considerando as dimensões internas os valores de  $\Psi$  são geralmente sempre positivos. Isto deve-se à existência de um fluxo de energia a uma dimensão menor que o fluxo a 2D, conduzindo, contrariamente à medição pelo exterior, a perdas de calor adicionais no balanço térmico. Assim, as pontes térmicas não deverão nunca ser ignoradas (Vicente et al., 2013). A norma portuguesa, que se encontra em vigor, opta pelo sistema de medição realiza pelo interior (Carlos & Nepomuceno, 2012; Camelo et al., 2006). O estudo de Berggren & Wall (2013) aponta para a diferença de grandezas entre a medição realizada pelo interior e pelo exterior, afirmando que a participação das pontes térmicas é sempre maior se for usado o sistema de medição interior, independentemente do sistema construtivo.

## **CAPÍTULO 3**

Metodología de cálculo

---

## CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA DE CÁLCULO

- 3.1. Método de cálculo 2D de pontes térmicas
  - 3.1.1. Coeficiente de transmissão térmica linear
  - 3.1.2. Sistema de medição de pontes térmicas
  - 3.1.3. Condições de fronteira das modelações
  - 3.1.4. Coeficiente de transmissão térmica linear  $\Psi$  de vãos
  - 3.1.5. Programa THERM<sup>®</sup>
- 3.2. Exemplo de aplicação



### 3. METODOLOGIA DE CÁLCULO

#### 3.1. Método de cálculo 2D de pontes térmicas

##### 3.1.1. Coeficiente de transmissão térmica linear $\Psi$

Na determinação do coeficiente de transmissão térmica linear seguiu-se a norma EN ISO 10211:2007, que estabelece a forma de modelar a ponte térmica com programas numéricos de diferenças ou elementos finitos, e a correspondente forma de cálculo do coeficiente  $\Psi$  a partir da utilização de programas deste tipo. A norma faz a abordagem das pontes térmicas em que se admite a hipótese da transmissão de calor tridimensional (caso geral) e bidimensional. Esta última abordagem é a seguida neste trabalho que utilizou o programa de simulação THERM 7<sup>®</sup> que calcula apenas a transmissão de calor em duas direções.

De acordo com a norma EN ISO 10211:2007 o cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear  $\Psi$  das pontes térmicas da envolvente dos edifícios é realizado segundo a equação (1):

$$\psi = L^{2D} - \sum_{i=1}^N U_i \times L_i \quad (1)$$

onde  $L^{2D}$  é o coeficiente de transmissão térmica do pormenor construtivo obtido a partir do cálculo 2D do elemento  $i$  de separação dos ambientes (interior e exterior) considerados. Este parâmetro pode também representar-se pela equação (2),

$$L^{2D} = \frac{\Phi_g}{\Delta T} \quad (2)$$

com  $\phi_g$ , fluxo global de calor por unidade de comprimento (W/m) obtido com um programa de modelação térmica, que neste trabalho, conforme já referido, foi o THERM 7<sup>®</sup>, que é descrito mais à frente. Embora seja possível o cálculo manual, é preferível a resolução através de programas de cálculo automático, garantindo menor esforço e maior precisão de resultados.  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre o interior e o exterior do ambiente (em graus Kelvin - K),  $N$  o número de elementos segundo uma dimensão,  $U_i$  a transmissão térmica superficial segundo uma dimensão do elemento  $i$  que separa dois meios (W/m<sup>2</sup>K) e  $L_i$  em metros (m) é o comprimento dentro do modelo geométrico a 2D (duas dimensões) sobre o qual o valor  $U_i$  se aplica.

O cálculo do valor  $U$  é efetuado seguindo as normas EN ISO 6946:2007 e EN ISO 13370:2007.

### 3.1.2. Sistema de medição de pontes térmicas

A medição do comprimento  $L_i$  pode ser feita segundo três sistemas de dimensões, interiores, interiores globais e exteriores, desde que o mesmo sistema seja utilizado de forma consciente para todas as partes de um edifício. Os valores de transmissão térmica linear dependem do sistema utilizado, no entanto, o coeficiente de transmissão térmica total é o mesmo, isto se todas as pontes térmicas do edifício são consideradas.

As dimensões interiores são medidas entre as faces internas acabadas de cada espaço num edifício, excluindo a espessura das paredes divisórias (ver Figura 11a).

As dimensões exteriores são medidas entre as faces externas acabadas dos elementos externos do edifício (ver Figura 11b).

As dimensões interiores globais são medidas entre as faces interiores acabadas dos elementos externos do edifício, incluindo a espessura das paredes divisórias (ver Figura 11c).

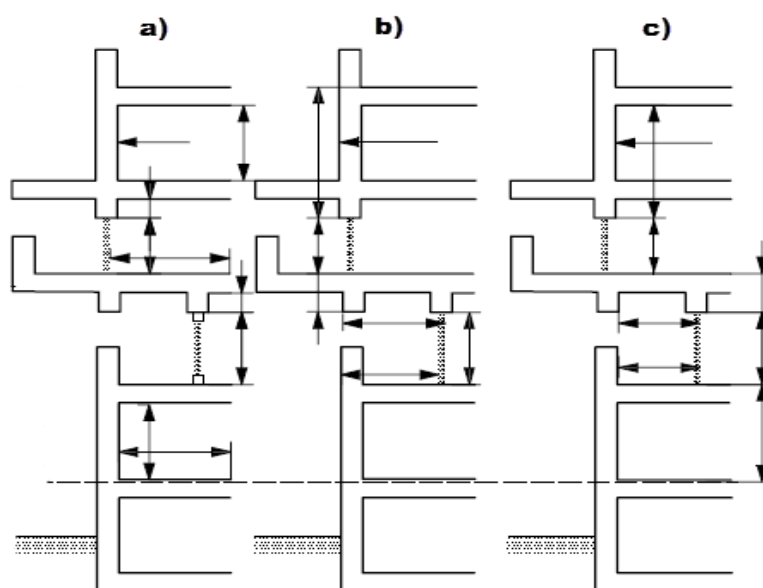


Figura 11. Sistemas de medição, a) interiores, b) exteriores, c) interiores globais (Fonte: Adaptado de EN ISO 13789:2007)

Estes sistemas de medição são descritos com maior detalhe na norma EN ISO 13789:2007. Neste trabalho apenas é calculado o coeficiente  $\Psi$  para as dimensões exteriores e interiores. No domínio do cálculo deve prever-se uma distância suficiente da zona corrente à ponte térmica para que as linhas de fluxo de calor voltem à perpendicularidade do paramento (no

mínimo de 1 metro), de forma a restaurar a mono-dimensionalidade do fluxo térmico, necessário para se estabelecer a condição adiabática no plano de corte perpendicular à superfície da parede.

A definição do “ponto de referência” é importante no cálculo, o qual no modelo interrompe o primeiro elemento e o segundo começa. Os valores  $\Psi$  específicos de cada pormenor construtivo aplicam-se apenas para a posição associada ao ponto de referência (ver Figura 17). De salientar que a medição das dimensões dos elementos que compõem as ligações relativamente ao estudo dos envidraçados mantém-se inalterável em ambos os sistemas de medição quando analisado para a mesma ligação, ou seja, o comprimento resultante da medição feita pelo exterior coincide com o mesmo comprimento quando é medido o elemento pelo interior (EN ISO 14683:2005).

Quando a medição se realiza pelo interior existem, por vezes, situações em que o valor do coeficiente de transmissão térmica linear é considerado com sendo o valor de  $\Psi$  global (que engloba por exemplo  $\Psi_{inf} + \Psi_{sup}$ ).

### 3.1.3. Condições de fronteira das modelações

A cada superfície dos elementos é atribuída uma temperatura e uma resistência térmica. As condições de temperatura adotadas para o estudo das pontes térmica foi 20°C de temperatura interior e 0°C para o exterior. A temperatura adotada para o solo foi 10°C. De acordo com a norma DIN 18599-2:2007, a temperatura média dos espaços não aquecidos  $\vartheta_u$  (desvão e caves, etc) adotadas neste trabalho são calculadas segundo a equação (3):

$$\vartheta_u = \vartheta_i - f \times (\vartheta_i - \vartheta_e) \quad (3)$$

onde  $\vartheta_i$  é a temperatura interior do ambiente,  $\vartheta_e$  a temperatura exterior e  $f$  o fator de correção de temperatura (para pisos elevados 0,9 e cave 0,6).

As resistências térmicas superficiais usadas na modelação estão de acordo com a norma EN ISO 6946:2007. A norma estabelece a resistência da superfície exterior  $R_{se}$  de 0,04 (m<sup>2</sup>.K)/W e a resistência da superfície interior  $R_{si}$  de 0,13 (m<sup>2</sup>.K)/W para superfícies onde o fluxo é horizontal. Para elementos horizontais onde o fluxo de calor estabelecido é ascendente, a resistência da superfície interior é 0,10 (m<sup>2</sup>.K)/W e a resistência da superfície exterior é de 0,04 (m<sup>2</sup>.K)/W. Quando o fluxo estabelecido é descendente, a resistência da superfície interior é 0,17 (m<sup>2</sup>.K)/W e a resistência da superfície exterior é de 0,04 (m<sup>2</sup>.K)/W. Para superfícies

exteriores onde o espaço é fortemente ventilado estas tomam valores de  $R_{se}=R_{si}$ . Nas superfícies em contacto com o solo  $R_{se}$  é 0,00 (m<sup>2</sup>.K)/W.

### 3.1.4. Coeficiente de transmissão térmica linear $\Psi$ de vãos

O cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear  $\Psi$  dos vãos é semelhante ao que foi referido anteriormente e segue o especificado na norma EN ISO 10211:2007. O valor  $\Psi$  da ligação fachada/caixilharia resulta da equação (4):

$$\Psi = L^{2D} - U_p \times b_p - U_w \times b_w \quad (4)$$

onde  $U_p$  é o coeficiente de transmissão térmica da parede de acordo com a EN ISO 6946:2007 (W/m<sup>2</sup>K) e  $U_w$  é o coeficiente de transmissão térmica da janela dada pelo respetivo fabricante (W/m<sup>2</sup>K). Convencionalmente, neste trabalho  $b_p$  é a dimensão da parede até ao encontro com a caixilharia da janela, considerando a área ocupada pelo suporte da caixilharia ou caixas de estores (se presente), como se fosse tudo parede. De acordo com a norma EN ISO 10211:2007 as pontes térmicas associadas a estes elementos são caracterizadas pelo coeficiente de transmissão térmica linear. O valor  $b_w$  é a dimensão da janela até ao plano de corte perpendicular à superfície da janela onde se estabelece a condição adiabática. Na Figura 12 pode-se verificar a associação dos parâmetros da equação (4) ao pormenor construtivo do envidraçado.

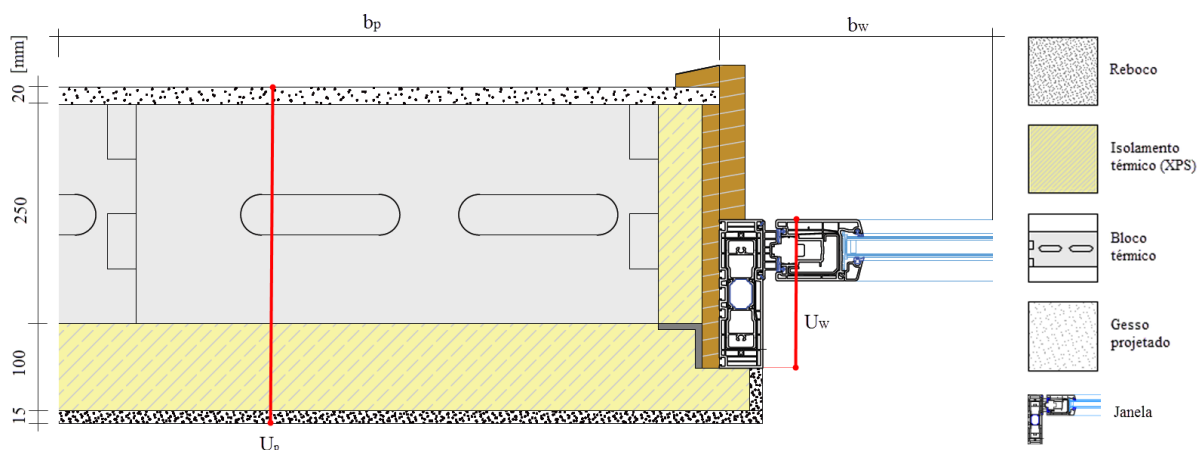


Figura 12. Identificação dos parâmetros no pormenor construtivo

O comprimento de vidro visível na janela de 190mm, para vidros com espessura até 60mm, é suficiente, caso contrário este comprimento deve ser aumentado (ISO 10077-2:2012).

Neste estudo não foi abordada a influência dos *spacers* na modelação térmica dos vãos envidraçados. O *spacer* usado na modelação pertence à base de dados do programa THERM 7<sup>®</sup>. O elemento é constituído por película de aço inoxidável e o seu interior preenchido com sílica gel.

### 3.1.5. Programa THERM<sup>®</sup>

O programa THERM<sup>®</sup> é um *software* desenvolvido no Laboratório Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) para uso dos fabricantes de materiais de construção, engenheiros, arquitetos, professores, estudantes e outros interessados em fenómenos de transferência de calor. O algoritmo de cálculo utilizado por este programa cumpre com os requisitos da norma EN 10211:2007 (conforme o certificado que se encontra no Anexo I). O programa permite efetuar uma análise térmica bidimensional de qualquer pormenor construtivo, tais como janelas, paredes, fundações, telhados e portas, aparelhos, e outros produtos nos quais as pontes térmicas são um motivo de preocupação. A análise de transferência de calor efetuada pelo programa baseia-se no método dos elementos finitos (Huizenga et al., 1999).

O programa solícita como dados de entrada: o desenho do pormenor construtivo à escala; as espessuras das camadas dos diferentes materiais; as condutibilidades térmicas de cada material, a temperatura interior e exterior e, por último as condutâncias superficiais associadas.

O programa THERM<sup>®</sup> tem capacidades de desenho muito boas destinadas a minimizar o esforço necessário para definir a geometria dos elementos. As secções transversais dos pormenores construtivos podem ser elaborados previamente noutros programas de desenho e depois fazer a sua importação (usando o formato DXF). Na Figura 13 apresenta-se um exemplo do ecrã de entrada do programa onde é feita a abertura do ficheiro com o pormenor construtivo.

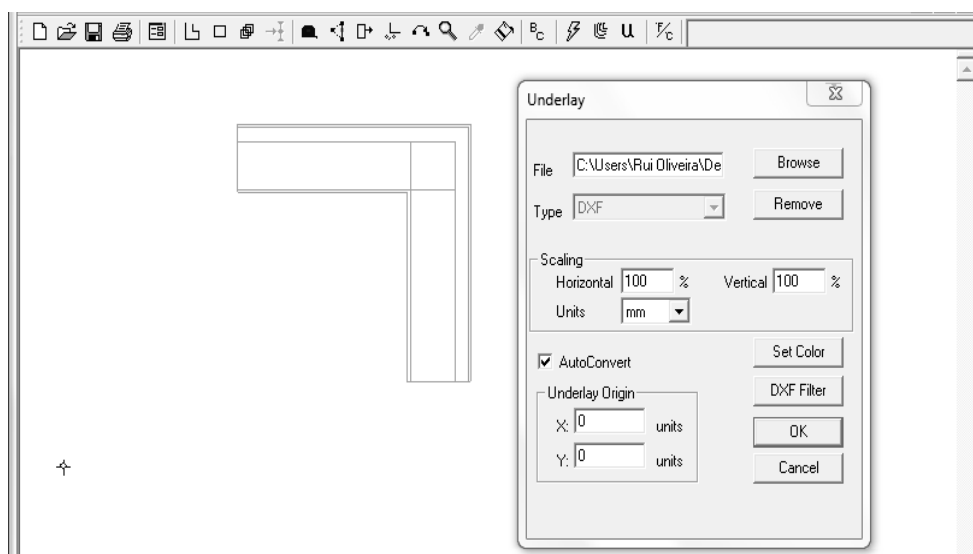


Figura 13. Ecrã do programa THERM® onde é efetuada a abertura do ficheiro do pormenor construtivo

Após a abertura no programa do desenho do pormenor, são introduzidas as características térmicas dos diversos materiais, bem como as condições do ambiente interior e exterior (ver Figura 14).

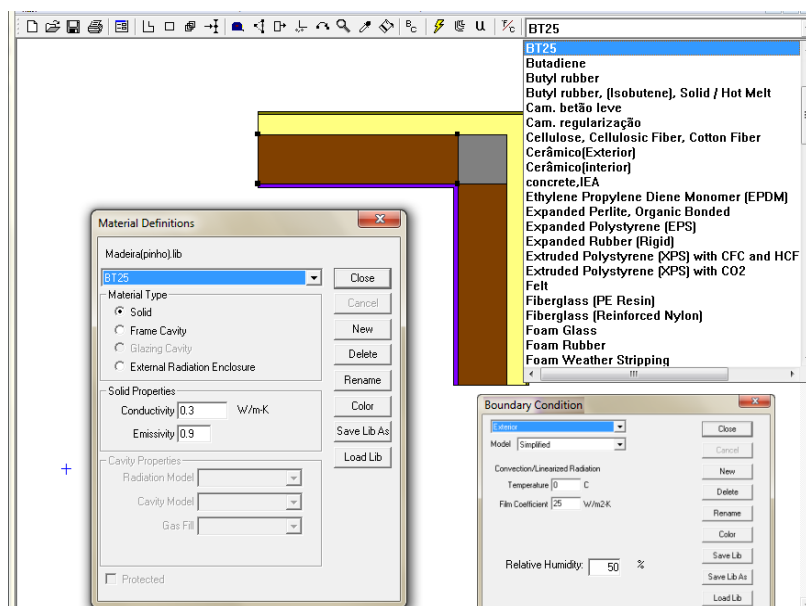


Figura 14. Introdução das características dos materiais e das condições de contorno exterior e interior

Depois da introdução de dados no THERM®, o programa calcula a distribuição de fluxos e as temperaturas sob condições de regime estacionário do pormenor. Para isso o programa efetua a discretização dos elementos numa malha de elementos de dimensões reduzidas. Depois de definir a malha de elementos finitos, o programa calcula a temperatura em cada um dos

elementos mais reduzidos. Quando o THERM<sup>®</sup> termina o cálculo do fluxo de calor, ele fornece o respetivo valor, bem como os resultados gráficos, sob a forma de linhas isotérmicas, vetores de fluxo de calor, linhas de fluxo constantes, perfil de temperaturas, linhas de temperatura constante e temperaturas (locais e médias, máximas e mínimas). Neste trabalho apenas são representados em cada pormenor construtivo os vetores de fluxo de calor, as linhas isotérmicas, o perfil de temperaturas e o fluxo de calor.

Os gráficos de distribuição de temperaturas são importantes para se ver onde existem gradientes de temperaturas extremas (isotérmicas muito próximas umas das outras) que podem traduzir-se em pontes térmicas ou problemas estruturais. Também são importantes porque é possível identificar as áreas quentes e frias da secção transversal com a finalidade de prever condensações e perdas térmicas. O gráfico de vetores de fluxo de calor indica a quantidade e a direção do fluxo de calor através da secção transversal. O valor do fluxo de calor é importante para mostrar a quantidade de energia que o pormenor construtivo permite passar para o exterior (Huizenga et al.,1999).

Na modelação térmica dos vãos envidraçados com o programa THERM<sup>®</sup> é necessário a caracterização do sistema de vidro através do *software* WINDOWS 7<sup>®</sup> (LBNL, 2011). Este programa permite criar o tipo de vidro de acordo com as características especificadas que depois se insere na cavidade da caixilharia. Na Figura 15 apresenta-se o exemplo do ecrã de entrada do programa onde são introduzidos os elementos que compõem o sistema do envidraçado. Depois são calculados os parâmetros específicos que caracterizam o sistema do vidro (ver Figura 15).

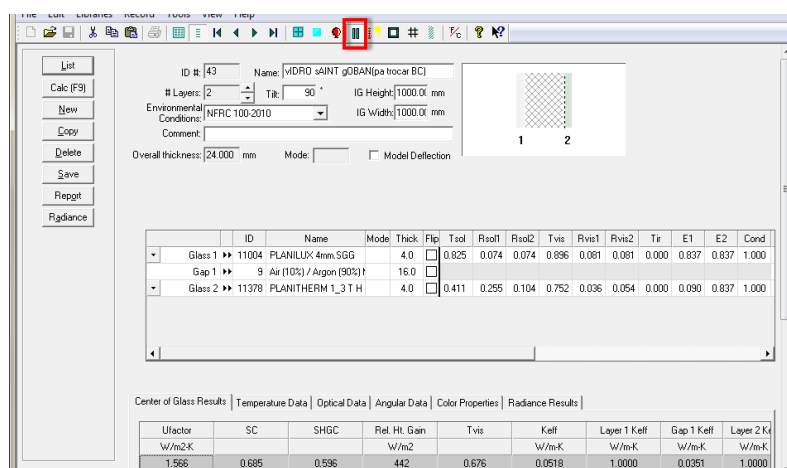


Figura 15. Introdução dos dados do sistema do vidro

No programa THERM<sup>®</sup> é importado o sistema de vidro e são introduzidas as características técnicas do sistema, bem como as condições do ambiente interior e exterior (ver Figura 16).

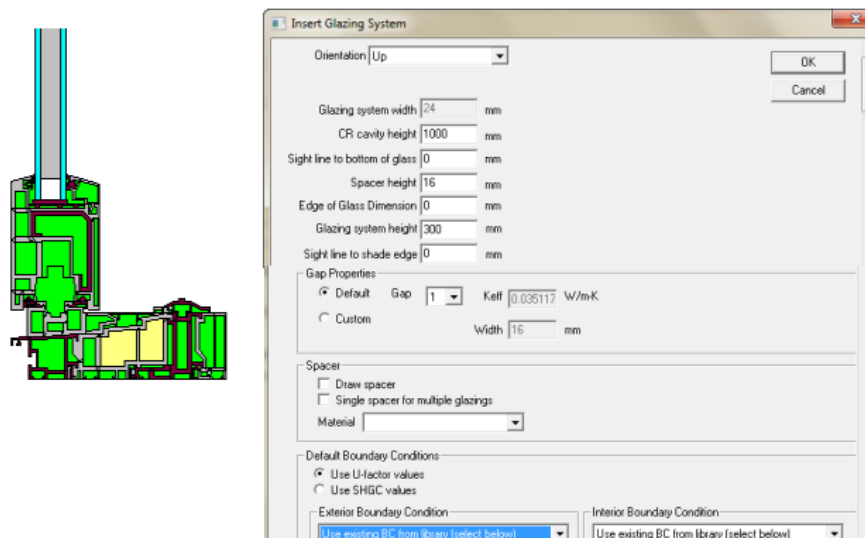


Figura 16. Introdução das características do sistema do vidro e das condições de contorno exteriores e interiores

### 3.2. Exemplo de aplicação

O pormenor construtivo representado na Figura 17 corresponde à ligação entre duas paredes verticais simples (cunhal) isoladas pelo exterior. O valor da transmissão térmica superficial  $U$  das paredes é de  $0,253 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ . Os restantes dados fundamentais para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear  $\Psi$  usando a medição das dimensões pelo exterior e interior encontram-se na Figura 17.

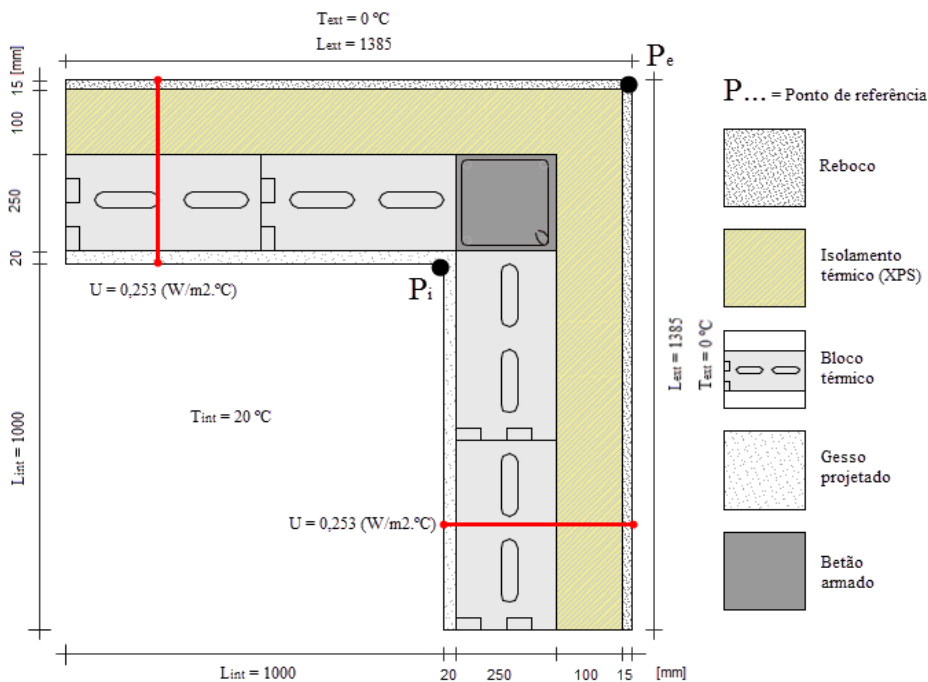


Figura 17. Representação do pormenor construtivo a estudar



O fluxo global de calor  $\phi_g$ , obtido com o programa de modelação térmica, THERM 7<sup>®</sup> é de 13,1737 (W/m). Utilizando a equação (1) e (2), temos:

a) Para medições pelo exterior:

$$\begin{aligned}\psi_e &= \frac{\phi_g}{\Delta T} - \sum_{i=1}^N U_i \times L_i \\ \psi_e &= \frac{13,1737}{20} - 2 \times 0,253 \times 1,385 \\ \psi_e &= -0,042(\text{W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C})\end{aligned}\tag{5}$$

b) Para medições pelo interior:

$$\begin{aligned}\psi_i &= \frac{\phi_g}{\Delta T} - \sum_{i=1}^N U_i \times L_i \\ \psi_i &= \frac{13,1737}{20} - 2 \times 0,253 \times 1,0 \\ \psi_i &= 0,153(\text{W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C})\end{aligned}\tag{6}$$

Conclui-se que o valor do coeficiente de transmissão térmica  $\Psi_e$  obtido com medições pelo exterior é igual a -0,042 (W/m<sup>2</sup>.°C) e o valor do coeficiente de transmissão térmica  $\Psi_i$  obtido com medições pelo interior é igual a 0,153 (W/m<sup>2</sup>.°C). A diferença na obtenção destes valores já foi explicada no ponto 3.4.3.



## **CAPÍTULO 4**

Soluções construtivas e modelação de pontes térmicas

---

# CAPÍTULO 4 – SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E MODELAÇÃO DE PONTES TÉRMICAS

## 4.1. Notas e limitações

## 4.2. Soluções construtivas

### 4.2.1. Lajes

### 4.2.2. Paredes

### 4.2.3. Janelas

## 4.3. Modelação de pontes térmicas

### 4.3.1. Ligação de fachada com laje de piso sobre desvão ventilado

### 4.3.2. Ligação de fachada com pavimentos térreos (ensoleiramento)

### 4.3.3. Ligação de parede interior com pavimentos térreos (ensoleiramento)

### 4.3.4. Ligação fachada/padieira

### 4.3.5. Ligação fachada (caixa de estore)/padieira

### 4.3.6. Ligação fachada/peitoril

### 4.3.7. Ligação fachada/ombreira

### 4.3.8. Ligação de fachada com varanda

### 4.3.9. Ligação de fachada com pavimentos intermédios

### 4.3.10. Ligação de fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos

### 4.3.11. Ligação de paredes interiores com pavimentos sobre locais não aquecidos

### 4.3.12. Ligação entre duas paredes verticais (cunhal)

### 4.3.13. Ligação de fachada com cobertura plana (sem platibanda)

### 4.3.14. Ligação de fachada com terraço (com platibanda)

### 4.3.15. Ligação de fachada com cobertura inclinada (bordo lateral ou de empena)

### 4.3.16. Ligação de fachada com cobertura inclinada (beiral)

### 4.3.17. Ligação entre duas lajes de cobertura inclinadas (cumeeira)

## 4.4. Análise de resultados

### 4.4.1. Análise dos valores do coeficiente de transmissão térmica linear $\Psi_e$

### 4.4.2. Análise comparativa entre valores $\Psi_i$ dos pormenores construtivos adequados à Passivhaus e os valores estabelecidos no regulamento térmico - RCCTE

### 4.4.3. Análise da variação do coeficiente de transmissão térmica linear $\Psi_e$ consoante a espessura do isolamento térmico

- 4.4.4. Análise gráfica da variação de  $\Psi_e$  em função da espessura do isolamento térmico entre sistemas construtivos de paredes
- 4.4.5. Análise da influência da sobreposição do isolamento na caixilharia dos envidraçados
- 4.4.6. Análise da variação  $\Psi$ , consoante a posição e a espessura do isolamento térmico nas lajes



## 4. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E MODELAÇÃO DE PONTES TÉRMICAS

### 4.1. Notas e limitações

Um dos objetivos desta dissertação é o desenvolvimento de um catálogo de pormenores construtivos que obedecem às exigências da construção segundo os requisitos *Passivhaus*, para cada um dos quais se vai apresentar os valores correspondentes de  $\Psi$  ( $\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ), obtido quer com medições exteriores quer com interiores. No entanto, sempre que em sede de um projeto, se pretenderem utilizar estes valores, releva-se a necessidade de se verificar se as soluções apresentadas são aplicáveis ao caso concreto, para se poderem utilizar os resultados da presente dissertação. Quer isto dizer que a aplicação de diferentes materiais ou soluções construtivas pode não corresponder aos valores que aqui foram obtidos.

As soluções construtivas adotadas neste estudo tiveram como referência as que são correntemente utilizadas em Portugal e para o seu desenvolvimento teve-se como suporte, principalmente, o atlas de detalhes construtivos desenvolvido por Beinhauer (2007) e as soluções Dow (2013) para a construção. No entanto, o sistema de parede dupla apresentado neste trabalho é materializado de maneira diferente, relativamente à tipologia normalmente adotada em Portugal (caixa de ar parcialmente isolada). Neste trabalho optou-se por usar a caixa-de-ar entre panos de alvenaria totalmente preenchida com isolamento em detrimento de caixa-de-ar parcialmente preenchida. A execução de paredes duplas com caixa-de-ar parcialmente preenchida com isolamento térmico, do ponto de vista do desempenho térmico, resistência a condensações intersticiais e de proteção face ao risco de infiltrações de águas pluviais é favorável. Este tipo de paredes duplas beneficiam os edifícios, mas se a sua execução não for correta podem levar a inúmeros problemas. O desempenho destas paredes é comprometido devido a anomalias, tais como, irregularidades das superfícies, inexistência de caleira ou deficiente execução da mesma, inexistência de tubos de drenagem, entre outros (Mendes & Abrantes, 2007). Dado ao fabrico de isolamentos térmicos com elevada resistência à humidade, poder-se-á adotar a execução de paredes duplas com caixa-de-ar totalmente preenchida com isolamento térmico, visto que, eventuais infiltrações pelo pano exterior da parede e as condensações superficiais não o afetarão (Dow, 2013). Com esta tipologia de paredes duplas as espessuras dos panos de alvenaria terão de ser aumentadas em

conformidade, ou, em alternativa, é aumentada a espessura do isolamento térmico, trazendo benefícios a nível de resistência mecânica e das exigências térmicas (Pina, 2007).

Foram também consideradas as normas e diretrizes dos fabricantes dos materiais de construção, no processo de aplicação dos mesmos. São disponibilizadas nos anexos algumas especificações e manuais de construção de fabricantes dos materiais.

A conceção dos pormenores construtivos apresentados não teve em conta a análise estrutural, pelo que as ligações estruturais são apenas exemplos, sendo por isso em cada caso concreto aconselhável a consulta do engenheiro de estruturas.

Na representação de cada pormenor construtivo são fornecidos os dados das condições fronteira de cada elemento: temperatura, espessura dos elementos construtivos e resistências térmicas superficiais interior e exterior. Também são identificados nos pormenores os pontos de referência relativos à medição pelo interior e pelo exterior. Os pontos de referência tiveram como base o catálogo de pontes térmicas da GmbH (2002).

Nos casos que apresentam mais do que dois diferenciais de temperatura, foi sempre considerada a diferença de temperatura mais elevada, estando-se por isso do lado da segurança.

Na modelação com o programa THERM<sup>®</sup>, os pormenores que envolvem tetos falsos não são considerados, pelo facto do espaço livre entre a laje e as placas do teto falso, na prática, não serem na generalidade dos casos espaços totalmente estanques, logo despreza-se a existência do teto falso.

Nos pormenores associados a caixa de estore, estes elementos são considerados como se fossem área de parede e o valor do parâmetro  $\Psi$  inclui o efeito do elemento obturador.

Neste trabalho não se faz o estudo da influência dos *spacers* nos envidraçados, tendo sido considerado sempre o mesmo *spacer* nos pormenores dos envidraçados, conforme já foi referido.

O estudo realizado determinou valores do coeficiente de transmissão térmica quer para a medição realizada pelo exterior do elemento construtivo, quer pelo interior, sendo que, como já referido, os valores obtidos com a medição feita pelo exterior podem resultar em valores de  $\Psi$  negativos. A apresentação dos valores do parâmetro  $\Psi$  resultantes da medição realizada pelo interior são apresentados no Anexo H.

Inicialmente, para cada pormenor foram consideradas as espessuras de isolamento nas paredes e nas coberturas, 10 cm e 15 cm, respetivamente. Posteriormente fez-se variar a espessura de isolamento nos vários elementos que compõem o pormenor construtivo. Os valores de  $\Psi$  e as



figuras associadas aos resultados do programa THERM<sup>®</sup> são dados relativos às disposições construtivas apresentadas no respetivo pormenor.

A cotagem das soluções construtivas e dos pormenores das ligações encontram-se em centímetros.

## 4.2. Soluções construtivas

### 4.2.1. Lajes

#### 4.2.1.1. Pavimento térreo – ensoleiramento

##### Solução:

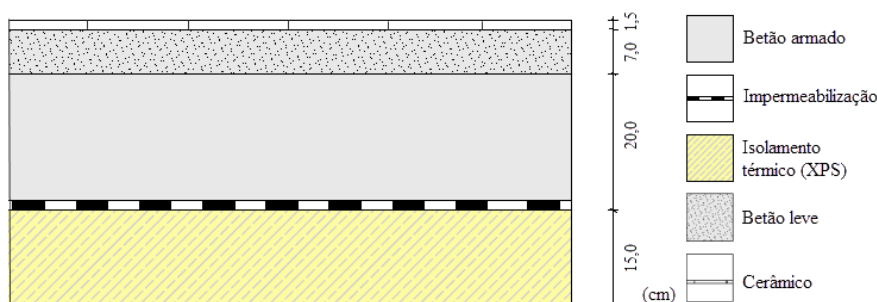


Figura 18. Solução construtiva de pavimento térreo – ensoleiramento

##### Descrição técnica:

Pavimento térreo - ensoleiramento		
Heat transfer resistance [m²K/W]		interior R <sub>si</sub> : 0,17
		exterior R <sub>se</sub> : 0,00
Area section 1	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Isolamento XPS	0,037	150
2. Material de impermeabilização	0,000	0
3. Laje de betão armado	2,000	200
4. Camada de betão leve	0,850	70
5. Revestimento cerâmico	1,040	15
6.		
7.		
8.		
U-Value: 0,226 W/(m²K)		Total 43,5 cm

Figura 19. Valor do coeficiente de transmissão térmica de pavimento térreo - ensoleiramento

##### Processo construtivo:

- Limpeza e preparação da superfície (seca e isenta de irregularidades) da camada de betão de limpeza na qual se irá aplicar o material isolante.
- Isolamento térmico do pavimento com placas rígidas resistentes à compressão e com função de estanquidade à água e à humidade para evitar a degradação das propriedades térmicas e mecânicas. As placas são aplicadas diretamente sobre a camada de betão de

limpeza sem a necessidade de qualquer fixação. Estas devem estar bem juntas para que não existam juntas abertas, e ser dispostas com juntas transversais desencontradas.

- Colocação do material/camada de impermeabilização a fim de evitar as humidades por capilaridade. Tratamento dos elementos singulares (ângulos, arestas, sobreposições, etc).
- Execução da laje de pavimento.
- Revestimento da estrutura de betão composto por camada de betão leve e revestimento cerâmico colado.

### 4.2.1.2. Laje de piso sobre desvão ventilado

#### Solução:

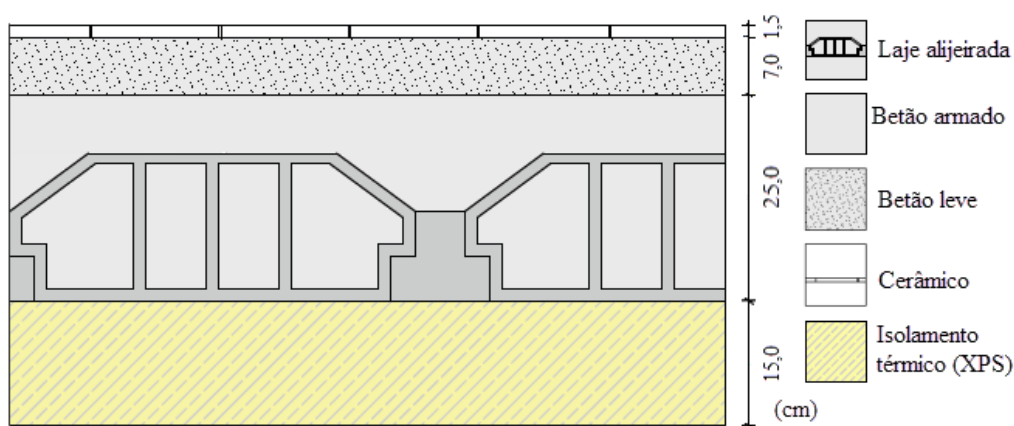


Figura 20. Solução construtiva de laje de piso sobre desvão ventilado

#### Descrição técnica:

Laje de piso sobre desvão ventilado		
Heat transfer resistance [m²K/W]		interior R <sub>si</sub> : 0,17
		exterior R <sub>se</sub> : 0,17
Area section 1	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Isolamento XPS	0,037	150
2. Laje alijeirada	0,833	250
3. Camada de betão leve	0,850	70
4. Revestimento cerâmico	1,040	15
5.		
6.		
7.		
8.		
U-Value: 0,209 W/(m²K)		Total 48,5 cm

Figura 21. Valor do coeficiente de transmissão térmica da laje de piso sobre desvão ventilado

**Processo construtivo:**

- Execução da laje de piso.
- Aplicação do isolamento térmico em placas através de sistema de colagem na zona inferior do suporte. A colagem destes elementos é realizada com argamassa polimérica especificada pelo fabricante e aplicada no tardo das placas. As placas de isolamento são montadas em fiadas sucessivas e contrafiadas em relação à fiada anterior. O ajustamento da planimetria de cada placa em relação às adjacentes deverá ser permanentemente verificado, com o auxílio de régua metálica e nível de bolha de ar (Weber, 2013). Se a aplicação do isolamento é feita através de fixação mecânica, por razões de falta de aderência ao suporte (acontece quando a espessura das placas é elevada), a fixação das placas faz-se com buchas específicas (ver Figura 22).



Figura 22. Elemento de fixação mecânica (Fonte: Weber, 2013)

- Estas buchas deverão ter comprimento adequado à espessura da placa isolante a fixar. A sua instalação faz-se através da furação do suporte, com broca de diâmetro e comprimento adequado à bucha. De seguida introduz-se a bucha no orifício e esta é apertada com a introdução do prego de expansão, por percussão (ver Figura 23)

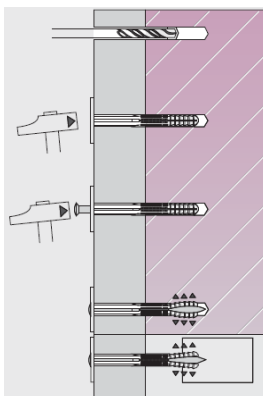


Figura 23. Sistema de fixação mecânica das placas isolantes (Fonte: Weber, 2013)

As cabeças circulares das buchas serão pressionadas de modo a esmagar um pouco a superfície da placa para que não fique saliente em relação ao plano da mesma. As

cavidades resultantes do esmagamento deverão ser preenchidas com argamassa de revestimento antes da aplicação do revestimento (Weber, 2013). A quantidade de fixadores e a disposição dos mesmos por m<sup>2</sup> deverá respeitar as especificações do próprio fabricante. As soluções de aplicação do isolamento apresentadas são possíveis de se realizar quando a altura do desvão permite a fácil aplicação, mas quando o espaço de trabalho é reduzido a aplicação do isolamento térmico sob a laje pode ser realizado previamente na cofragem (Dow, 2013).

- Revestimento da parte superior da estrutura de betão composto por camada de betão leve e revestimento cerâmico colado.

### 4.2.1.3. Laje de cobertura plana – Acessível

#### Solução:

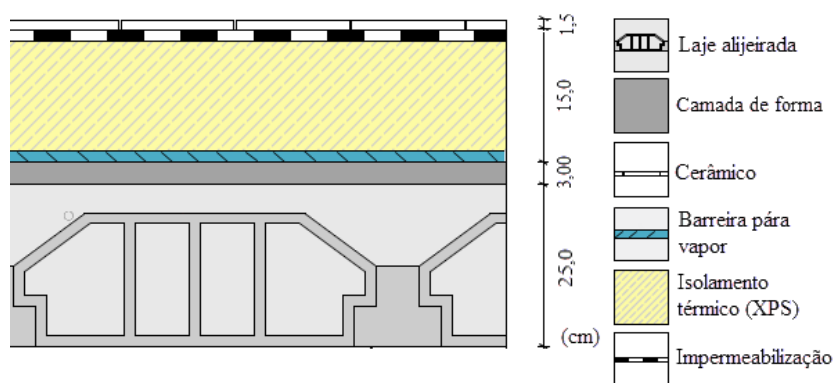


Figura 24. Solução construtiva da laje de cobertura plana – acessível

#### Descrição técnica:

Laje de cobertura plana - Acessível			
Heat transfer resistance [m <sup>2</sup> K/W]		interior Rsi:	0,10
		exterior Rse:	0,04
Area section 1	$\lambda$ [W/(mK)]	Thickness [mm]	
1. Laje alijeirada	0,833	250	
2. Camada de forma	0,000	30	
3. Material de impermeabilização ou pára vapor	0,000	0	
4. Isolamento XPS	0,037	150	
5. (Material de impermeabilização ou camada de dessolidarização)	0,000	0	
6. Revestimento cerâmico	1,040	15	
7.			
8.			
U-Value:		0,222	W/(m <sup>2</sup> K)
		Total 44,5 cm	

Figura 25. Valor do coeficiente de transmissão térmica de laje de cobertura plana – acessível

**Processo construtivo:**

- Execução da laje de cobertura.
- Aplicação da camada pendente.
- Solução de cobertura invertida: Impermeabilização da superfície da cobertura. O sistema de impermeabilização deve ser aplicado sobre o suporte seco, limpo e isento de superfícies irregulares e cortantes. Tratamento dos elementos singulares (ângulos, arestas, sobreposições, etc). O sistema de impermeabilização desempenha também o papel de barreira para vapor. Aplicação do isolamento térmico em placas diretamente em cima da impermeabilização sem qualquer tipo de fixação. Em caso de aderência total entre o isolamento e a impermeabilização recomenda-se a interposição de um feltro sintético não tecido (Dow, 2013). Os elementos isolantes devem ser montados com juntas transversais desencontradas e bem encostadas umas às outras. O ajustamento da planimetria de cada placa em relação às adjacentes deverá ser permanentemente verificado, com o auxílio de régua metálica e nível de bolha de ar (Weber, 2013). Nos pontos singulares onde a cobertura tenha aberturas (clarabóias, ralos, chaminés, etc.) devem-se adaptar as placas mediante o orifício através de corte com ferramentas tradicionais de carpintaria e também deixar uma junta entre a placa e o elemento. A junta deve ser preenchida com uma banda de espuma plástica flexível.
- Solução de cobertura tradicional: Colocação de camada para vapor que impede que os vapores libertados pelo interior do edifício atinjam o isolamento. Aplicação do isolamento térmico em placas, atendendo às disposições consideradas no ponto anterior. Impermeabilização da superfície superior do isolamento térmico considerando as disposições construtivas enumeradas no ponto anterior, sobre sistemas de impermeabilização. Inclusão de camada (geotêxtil) de dessolidarização para separar a impermeabilização e o revestimento.
- Revestimento da laje, composto por camada de betão leve e revestimento cerâmico colado.

4.2.1.4. Laje de cobertura plana – não acessível

**Solução:**

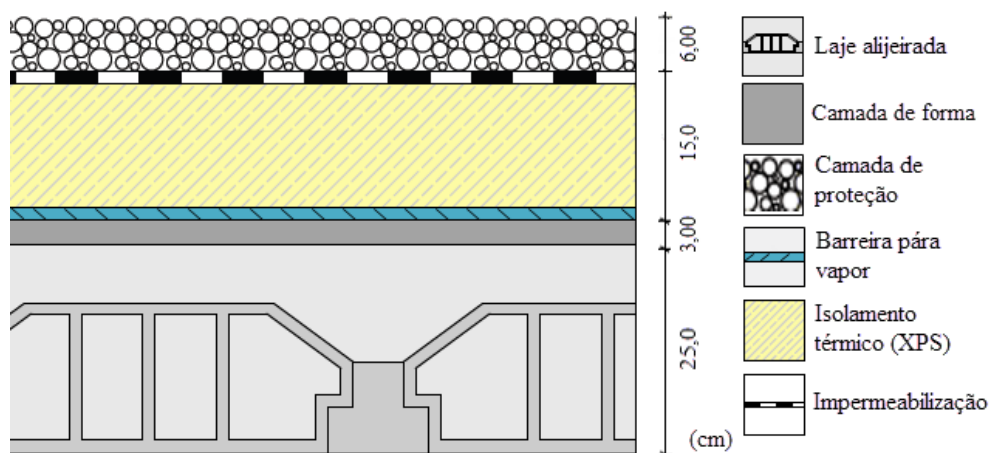


Figura 26. Solução construtiva de laje de cobertura plana – não acessível

**Descrição técnica:**

Laje de cobertura plana - Não acessível		
Heat transfer resistance [m²K/W]		interior R <sub>si</sub> : 0,10
		exterior R <sub>se</sub> : 0,04
Area section 1	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Laje alijeirada	0,833	250
2. Camada de forma	0,000	30
3. Material de impermeabilização ou para vapor	0,000	0
4. Isolamento XPS	0,037	150
5. (Material de impermeabilização ou camada de dessolidarização)	0,000	0
6. Camada de proteção (Godo)	2,000	60
7.		
8.		
U-Value: 0,221 W/(m²K)		Total 49,0 cm

Figura 27. Valor do coeficiente de transmissão térmica da laje de cobertura plana – não acessível

**Processo construtivo:**

- Execução da laje de cobertura.
- Aplicação da camada pendente.
- Solução de cobertura invertida: Impermeabilização da superfície da cobertura. O sistema de impermeabilização deve ser aplicado sobre o suporte seco, limpo e isento de superfícies irregulares e cortantes. Tratamento dos elementos singulares (ângulos, arestas, sobreposições, etc). O sistema de impermeabilização desempenha também o papel de barreira para vapor. Aplicação do isolamento térmico em placas diretamente em cima da impermeabilização sem qualquer tipo de fixação. Em caso de aderência

total entre o isolamento e a impermeabilização recomenda-se a interposição de um feltro sintético não tecido (Dow, 2013). Os elementos isolantes devem ser montados com juntas transversais desencontradas e bem encostadas umas às outras. O ajustamento da planimetria de cada placa em relação às adjacentes deverá ser permanentemente verificado, com o auxílio de régua metálica e nível de bolha de ar (Weber, 2013). Nos pontos singulares onde a cobertura tenha aberturas (clarabóias, ralos, chaminés, etc.) devem-se adaptar as placas mediante o orifício através de corte com ferramentas tradicionais de carpintaria e também deixar uma junta entre a placa e o elemento. A junta deve ser preenchida com uma banda de espuma plástica flexível.

- **Solução de cobertura tradicional:** Colocação de camada para vapor que impede que os vapores libertados pelo interior do edifício atinjam o isolamento. Aplicação do isolamento térmico em placas, atendendo às disposições consideradas no ponto anterior. Impermeabilização da superfície superior do isolamento térmico considerando as disposições construtivas enumeradas no ponto anterior, sobre sistemas de impermeabilização. Inclusão de camada (geotêxtil) de dessolidarização que permite o funcionamento independente da impermeabilização e da camada de proteção (godo).
- Execução de camada de proteção que evita o levantamento do isolamento térmico pelo vento, e protege o sistema de impermeabilização dos raios solares, no caso de solução de cobertura tradicional. Quando previstas zonas de passagem para trabalhos de manutenção, inspeção, etc. deverão ser instaladas lajetas de betão (podendo estar apoiadas sobre distanciadores ou sobre a camada de proteção).

#### 4.2.1.5. Laje de cobertura inclinada

##### **Solução:**

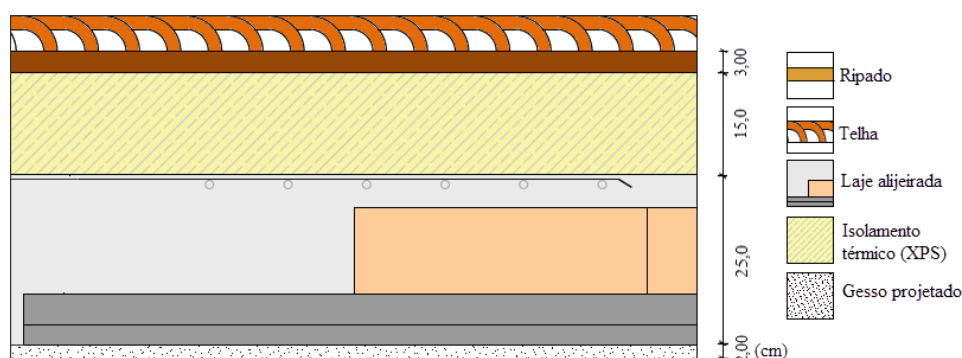


Figura 28. Solução construtiva da laje de cobertura inclinada



**Descrição técnica:**

Laje de cobertura inclinada		
Heat transfer resistance [m <sup>2</sup> K/W]		interior R <sub>si</sub> : 0,10
		exterior R <sub>se</sub> : 0,04
Area section 1	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Gesso projetado	0,300	20
2. Laje alijeirada	0,833	250
3. (Barreira pára vapor)	0,000	0
4. Isolamento XPS	0,037	150
5. Ripado	0,000	30
6. Telha	0,000	0
7.		
8.		
U-Value: 0,219 W/(m <sup>2</sup> K)		Total Thickness: 45,0 cm

Figura 29. Valor do coeficiente de transmissão térmica de laje de cobertura inclinada

**Processo construtivo:**

- Execução da laje de cobertura.
- Se o isolamento térmico não apresentar elevada resistência à difusão de vapor de água deverá ser colocada uma barreira para vapor de modo a reduzir ao mínimo o risco de ocorrência de condensações.
- Execução de dente (argamassa ou madeira) de apoio e travamento na zona dos do beiral e nas zonas periféricas da cobertura de modo a evitar o deslizamento da camada isolante. Aplicação do isolamento térmico em placas diretamente em cima da laje de cobertura, através de fixação mecânica (buchas plásticas). A quantidade de fixadores e a disposição dos mesmos por m<sup>2</sup> deverá respeitar as especificações do próprio fabricante. É recomendável começar a aplicar as placas pela zona do beiral, seguindo a aplicação na direção da pendente até à linha de cumeeira.
- Quando as placas contêm canaletes, elas são dispostas na direção paralela à linha de cumeeira (ripados de apoio à telha executados in-situ) ou com os canaletes na direção perpendicular à linha de cumeeira (ripados de apoio à telha pré-fabricados) e com juntas transversais desencontradas, de forma a existir um bom travamento e distribuição de cargas (Dow, 2013).
- Colocação do ripado sobre o isolamento consoante as disposições referidas no ponto anterior. A telha nunca deverá assentar diretamente sobre o isolamento, o apoio direto implica a inexistência de ventilação sob as telhas causando o envelhecimento precoce e impede também a circulação de ar, fundamental para impedir a sucção provocada

pelo vento. Os ripados ou cordões de argamassa deverão ter dimensões aproximadamente de 30 mm de altura e 100 mm de largura (Dow, 2013).

- Execução do revestimento de telha.

#### 4.2.1.6. Pavimento sobre local não aquecido

##### Solução:

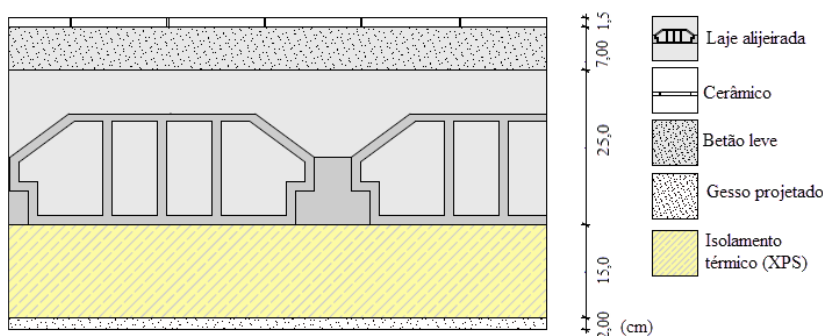


Figura 30. Solução construtiva de pavimento sobre locais não aquecidos

##### Descrição técnica:

Pavimento sobre local não aquecido		
Heat transfer resistance [m²K/W]		interior R <sub>si</sub> : 0,17
		exterior R <sub>se</sub> : 0,17
Area section 1	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Gesso projetado	0,300	20
2. Isolamento XPS	0,037	100
3. Laje alijeirada	0,833	250
4. Camada de betão leve	0,850	70
5. Revestimento cerâmico	1,040	15
6.		
7.		
8.		
U-Value: 0,285 W/(m²K)		Total 45,5 cm

Figura 31. Valor do coeficiente de transmissão térmica de pavimento sobre local não aquecido

##### Processo construtivo:

- Execução do pavimento sobre local não aquecido.
- Aplicação do isolamento térmico em placas através de sistema de colagem na zona inferior do suporte. A colagem destes elementos é realizada com argamassa polimérica especificada pelo fabricante e aplicada no tardo das placas. As placas de isolamento são montadas em fiadas sucessivas e contrafiadas em relação à fiada anterior. O ajustamento da planimetria de cada placa em relação às adjacentes deverá ser

permanentemente verificado, com o auxílio de régua metálica e nível de bolha de ar (Weber, 2013). Se a aplicação do isolamento é feita através de fixação mecânica, por razões de falta de aderência ao suporte (acontece quando a espessura das placas é elevada), a fixação das placas faz-se com buchas específicas. Estas buchas deverão ter comprimento adequado à espessura da placa isolante a fixar. A sua instalação faz-se através da furação do suporte, com broca de diâmetro e comprimento adequado à bucha. De seguida introduz-se a bucha no orifício e esta é apertada com a introdução do prego de expansão, por percussão (ver Figura 23). As cabeças circulares das buchas serão pressionadas de modo a esmagar um pouco a superfície da placa para que não fique saliente em relação ao plano da mesma. As cavidades resultantes do esmagamento deverão ser preenchidas com argamassa de revestimento antes da aplicação do revestimento (Weber, 2013). A quantidade de fixadores e a disposição dos mesmos por m<sup>2</sup> deverá respeitar as especificações do próprio fabricante.

- Revestimento do material isolante com aplicação de argamassas em duas camadas, incorporando armadura de rede de fibra de vidro, após garantida a estabilidade das placas. A espessura da argamassa deve garantir o total recobrimento da rede, não sendo perceptível ao olhar (Weber, 2013).
- Revestimento da parte superior da estrutura de betão composto por camada de betão leve e cerâmico colado.

## 4.2.2. Paredes

### 4.2.2.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

#### Solução:

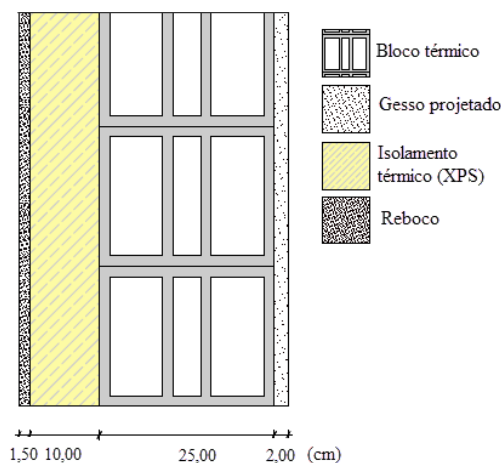


Figura 32. Solução construtiva de parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

**Descrição técnica:**

Parade exterior - Isolamento pelo exterior		
Heat transfer resistance [m <sup>2</sup> K/W]		interior R <sub>si</sub> : 0,13
		exterior R <sub>se</sub> : 0,04
Area section 1	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Gesso projetado	0,300	20
2. Bloco térmico	0,260	250
3. Isolamento XPS	0,037	100
4. Rede de fibra de vidro	0,000	0
5. Reboco	1,300	15
6.		
7.		
8.		
U-Value: 0,256 W/(m <sup>2</sup> K)		Total 38,5 cm

Figura 33. Valor do coeficiente de transmissão térmica de parede exterior (isolamento pelo exterior)

**Processo construtivo:**

- Construção da parede exterior em bloco térmico, incluindo o fecho superior da parede através de material compressível (esferovite ou espuma de poliuretano). Este procedimento permite que haja a dessolidarização da ligação alvenaria/betão armado, evitando fissurações devido à deformação das estruturas de betão armado e consequentemente à compressão das alvenarias.
- Aplicação do isolamento térmico em placas através de sistema de colagem na zona exterior do suporte. A colagem destes elementos é realizada com argamassa polimérica especificada pelo fabricante e aplicada no tardo das placas. As placas de isolamento são montadas na posição horizontal em fiadas sucessivas, da base da parede até ao topo da mesma, e contrafiadas em relação à fiada abaixo. Nas esquinas (cunhais, ombreiras, etc.), os topos das fiadas deverão ser alternados para um melhor travamento do isolamento (ver Figura 34).



Figura 34. Travamento do sistema de isolamento (Fonte: Weber, 2013)

A verticalidade e o ajustamento da planimetria de cada placa em relação às adjacentes deverão ser permanentemente verificados, com o auxílio de régua metálica e nível de bolha de ar (Weber, 2013). Se a aplicação do isolamento é feita através de fixação mecânica, por razões de falta de aderência ao suporte (acontece quando a espessura das placas é elevada), a fixação das placas faz-se com buchas específicas. Estas buchas deverão ter comprimento adequado à espessura da placa isolante a fixar. A sua instalação faz-se através da furação do suporte, com broca de diâmetro e comprimento adequado à bucha. De seguida introduz-se a bucha no orifício e esta é apertada com a introdução do prego de expansão, por percussão (ver Figura 23). As cabeças circulares das buchas serão pressionadas de modo a esmagar um pouco a superfície da placa para que não fique saliente em relação ao plano da mesma. As cavidades resultantes do esmagamento deverão ser preenchidas com argamassa de revestimento antes da aplicação do revestimento (Weber, 2013). A quantidade de fixadores e a disposição dos mesmos por m<sup>2</sup> deverá respeitar as especificações do próprio fabricante.

- Revestimento do material isolante com aplicação de argamassas em duas camadas, após garantida a estabilidade das placas. As camadas incorporam armadura de rede de fibra de vidro respeitando nas emendas da armadura a sobreposição de 10 cm. A espessura da argamassa deve garantir o total recobrimento da rede, não sendo perceptível ao olhar. No revestimento das esquinas (cunhais, ombreiras, etc) deverão ser reforçadas com perfil (PVC perfurado) de esquina com rede de fibra de vidro para aderência das argamassas, colados entre o isolamento e a argamassa de revestimento (ver Figura 35) (Weber, 2013).



Figura 35. Perfil de esquina (Fonte: Weber, 2013)

Nos encontros do isolamento com superfícies rígidas (caixilharias, planos salientes, remates de topo, etc) deverá ser deixada uma junta de aproximadamente 5mm preenchida com material elástico e impermeável do tipo mastique de poliuretano.

- Revestimento da parte interior da parede com gesso projetado.

4.2.2.2. Parede exterior (dupla)

**Solução:**

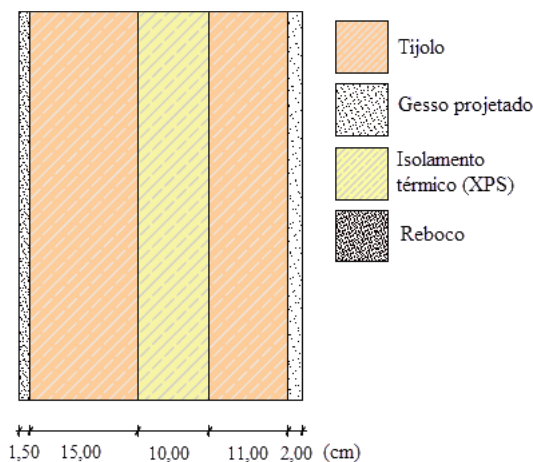


Figura 36. Solução construtiva de parede exterior (dupla)

**Descrição técnica:**

Parede exterior - dupla		
Heat transfer resistance [m²K/W]		interior R <sub>si</sub> : 0,13
		exterior R <sub>se</sub> : 0,04
Area section 1	λ [W/(mK)]	Thickness [mm]
1. Gesso projetado	0,300	20
2. Tijolo cerâmico	0,345	110
3. Isolamento XPS	0,037	100
4. Tijolo cerâmico	0,325	150
5. Reboco	1,300	15
6.		
7.		
8.		
U-Value: 0,268 W/(m²K)		Total 39,5 cm

Figura 37. Valor do coeficiente de transmissão térmica de parede exterior dupla

**Processo construtivo:**

- Assentamento do pano interior de alvenaria (tijolo de 11), assegurando que a sua superfície fica limpa e lisa, de forma a poder receber as placas de isolamento térmico. Na base da cavidade entre panos é criada uma caleira em argamassa (com superfície lisa e arredondada, em meia cana) para recolha e encaminhamento das águas infiltradas – proveniente do pano exterior ou originada pela condensação do vapor de água com origem no interior do edifício – para tubos de drenagem, geralmente em PVC e espaçados de 2 m. A caleira deve ser revestida com produto betuminoso aplicado por pintura. Este procedimento deve ser realizado no assentamento da

primeira fiada de tijolos do pano exterior. O travamento de panos interior e exterior entre si deve ser garantido com grampos não corrosivos (metálicos ou plásticos), contribuindo para o desempenho funcional das paredes (ver Figura 38).

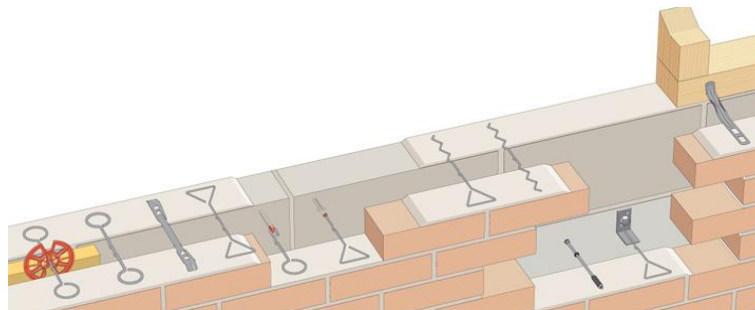


Figura 38. Exemplo de grampos para alvenaria (Fonte: Expamet Construction, 2012)

Este processo implica cuidados de execução relativamente ao espaçamento e densidade de grampos das paredes e o tipo de fixação (argamassas finas, resinas, buchas especiais e por expansão) (ver Figura 39).

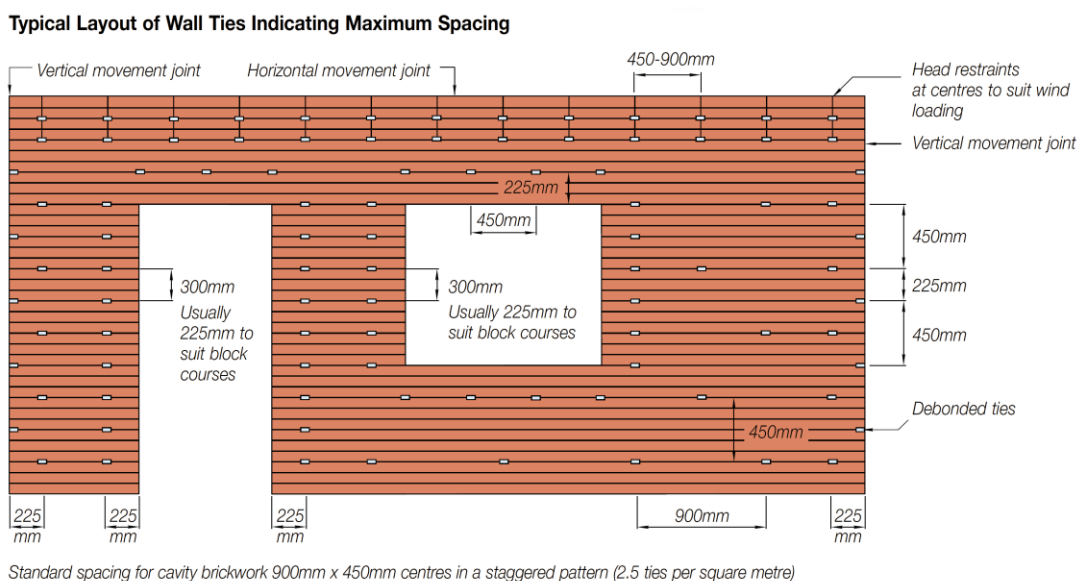


Figura 39. Densidade e posicionamento de grampos (Fonte: Ancon, 2013)

O número mínimo de grampos por metro quadrado é dado pela seguinte equação (7),

$$N = \frac{W_{sd}}{F_t} \tag{7}$$

sendo que,  $W_{sd}$  é o valor de cálculo da ação do vento transferida pelos ligadores ( $\text{kN/m}^2$ ) e  $F_t$  a resistência característica de cada ligador ( $\text{kN}$ ) (Vicente, 2002). Com esta ligação entre os dois panos de parede pretende-se que a resistência do conjunto

venha melhorada. Estes grampos ou ligadores devem localizar-se nas juntas, com uma pequena inclinação para o exterior para evitar escorrências para o pano interior (se foram instalados na horizontal devem dispor de pingadeira que evite qualquer escorrimento para o pano interior), o que complica a sua colocação pois os dois panos de parede são normalmente executados, temporalmente desfasados, o que torna difícil acertar a altura das juntas.

- Aplicação do isolamento térmico, montando-as na posição vertical em fiadas sucessivas, da base da parede até ao topo da mesma, e contrafiadas em relação à fiada abaixo. Certificar-se que os encaixes horizontais sejam realizados com o macho na parte inferior e a fêmea na parte superior. As placas devem ficar bem juntas, não devendo existir qualquer junta aberta.
- Conclusão do pano exterior e revestimento dos dois panos.
- A construção dos panos de alvenaria deve incluir o fecho superior da parede através de material compressível (esferovite ou espuma de poliuretano). Este procedimento permite que haja a dessolidarização da ligação alvenaria/betão armado, evitando fissurações devido à deformação das estruturas de betão armado e consequentemente à compressão das alvenarias.

### 4.2.3. Janelas

#### 4.2.3.1. Caixilharia

Neste trabalho foi usado para a modelação dos elementos de janela o sistema de caixilharia EC VEKASLIDE da Veka. O sistema usado é composto por dois painéis deslizantes e caracterizado com rotura térmica para melhor desempenho ao nível do isolamento. A caixilharia apresenta um valor de transmissão térmica de  $1,56 \text{ W/m}^2\text{K}$ , muito próximo do valor  $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  estimado para Portugal, segundo Schnieders (2009). O pormenor dos cortes e outras informações acerca das características da caixilharia encontram-se no Anexo A.

#### 4.2.3.2. Envidraçado

Os vidros utilizados na caixilharia são da marca Saint-Goban Glass. Estes são do tipo duplo sendo o espaço (16mm) entre eles preenchido com 10% de ar e 90% de argon. O vidro interior do modelo SGG Planitherm Total 1.3 tem de espessura 4mm e o vidro exterior do modelo SGG Planilux tem espessura de 4mm. O fator solar do envidraçado e o valor de



transmissão térmica deste conjunto é de 0,66 e 1,3 W/m<sup>2</sup>.K, respetivamente. Estes valores encontram-se também muito próximos dos valores (0,6 e 1,2 W/m<sup>2</sup>.K, respetivamente) estimados para Portugal por Schnieders (2009). As características dos vidros encontram-se no Anexo B.

#### 4.2.3.3. Caixa de estore

A caixa de estore utilizada neste estudo é composta por uma estrutura de poliuretano revestida por uma camada de argamassa. Este sistema apresenta uma tampa que serve de fecho da caixa com a finalidade de solucionar o problema da entrada de ar pela caixa de estore. Este elemento apresenta um coeficiente de transmissão térmica (U) de 0,75 W/m<sup>2</sup>.°C. A configuração geométrica desta caixa é apresentada no Anexo B. Outras características da caixa de estore podem ser consultadas no documento do fornecedor (Barreirinhas, n.d.).

#### Processo construtivo:

- Nos cantos das zonas da envolvente dos vãos envidraçados, relativamente ao sistema de paredes isoladas pelo exterior, é necessário fazer a correta aplicação do isolamento nessas zonas para impedir a formação de fissuras nesses pontos. Assim as placas de isolamento deverão ser colocadas de forma a evitar que as juntas entre si estejam alinhadas com as arestas dos vãos (ver Figura 40).

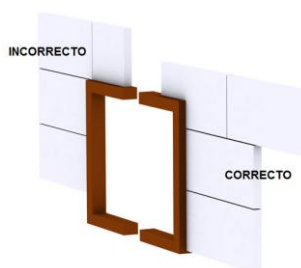


Figura 40. Posição do isolamento nos vãos envidraçados (Fonte: Lena ETICS, 2013)

- O revestimento exterior da parede nos cantos da zona envolvente dos vãos deverá ser reforçado com tiras de rede de fibra de vidro posicionadas a 45°, coladas entre o isolamento e a argamassa de revestimento (ver Figura 41) (Weber, 2013).

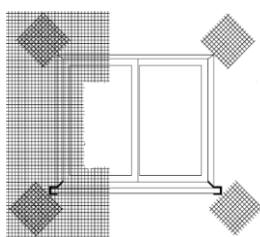


Figura 41. Reforço dos cantos dos vãos (Fonte: Adaptado de MAXIT, 2013)



### 4.3. Modelação de pontes térmicas

#### 4.3.1. Ligação de fachada com laje de piso sobre desvão ventilado

##### 4.3.1.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

##### Representação:

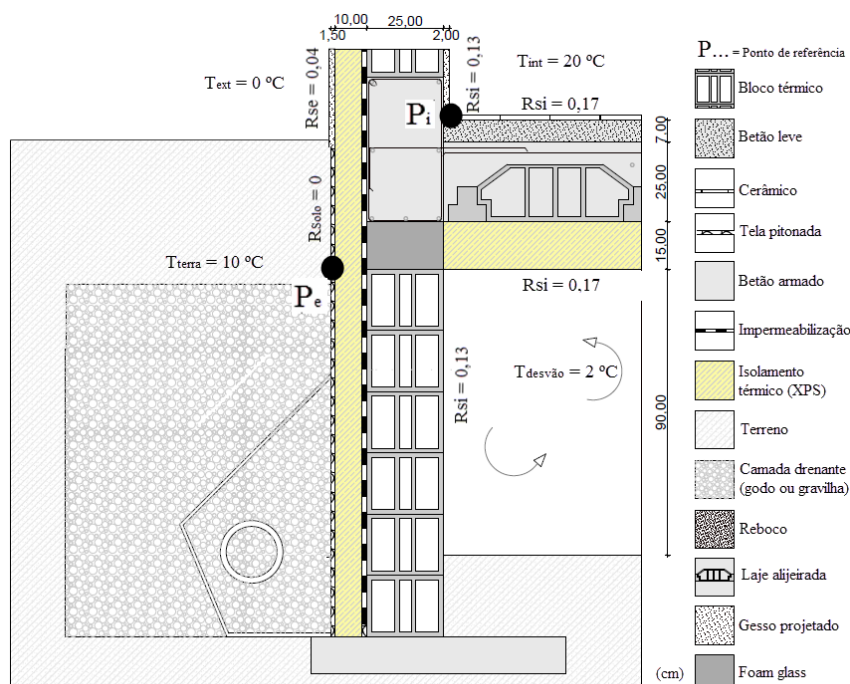


Figura 42. Ligação de fachada (parede simples) com laje de piso sobre desvão ventilado

##### Descrição:

O pormenor representa a ligação de fachada com sistema de isolamento pelo exterior com laje que divide dois espaços. Um espaço é útil (aquecido) e outro é um espaço não útil (sem aquecimento) fortemente ventilado. A modelação numérica conjuga a variação da espessura de isolamento da parede e a variação da espessura de isolamento da laje que separa os dois espaços, estando o isolamento colocado na parte inferior da laje (ver Figura 44). Esta solução construtiva é corrente nos edifícios com piso térreo, materializado com laje sobrelevada do solo.

##### Processo construtivo:

- Cofragem, armação e betonagem de fundações.
- Execução das paredes do desvão.
- Cofragem dos elementos construtivos (vigas e lajes).

- Armação de vigas, lajes e posterior betonagem destes elementos.
- Execução das paredes exteriores com isolamento pelo exterior.
- Revestimento da laje interior, incluindo camada de isolamento sob a laje.
- Em conjunto com o passo anterior deve-se proceder à impermeabilização (com pinturas ou telas asfálticas) da interface entre os blocos térmicos e o isolamento até à altura em que encosta o terreno e a cortina drenante de águas pluviais para evitar o fenómeno de humidade ascensional. Na parte exterior do isolamento é colocada uma tela pitonada (membrana alveolar em PEAD) com dupla funcionalidade de drenagem e de impermeabilização e permite a ventilação da parede, garantindo assim melhor escoamento das águas do terreno e o maior controlo de condensações, respetivamente (Mendes, 2011). Os pitons devem dispor-se virados para a parede e a sobreposição das camadas adjacentes deve ser aproximadamente 7 cm.
- A cortina drenante (godo ou gravilha) de águas pluviais, encostada ao fundo da parede contém um tubo de dreno ligado a coletor, envolvido em manta geotêxtil para facilitar a drenagem das águas junto dos elementos soterrados (ver Figura 42).

### **Resultados:**

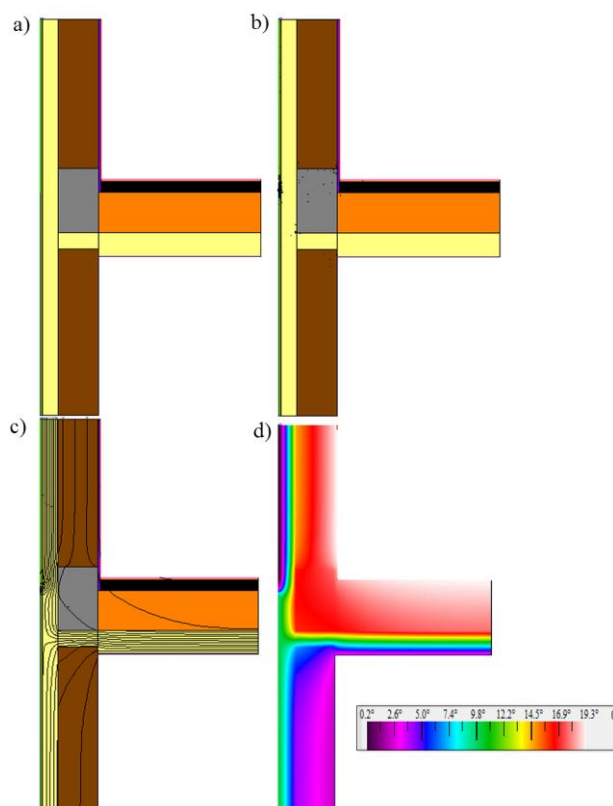


Figura 43. Resultado Therm da ligação de fachada (parede simples) com laje de piso sobre desvão ventilado: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = -0,101 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 0,560 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,099 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 0,560 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

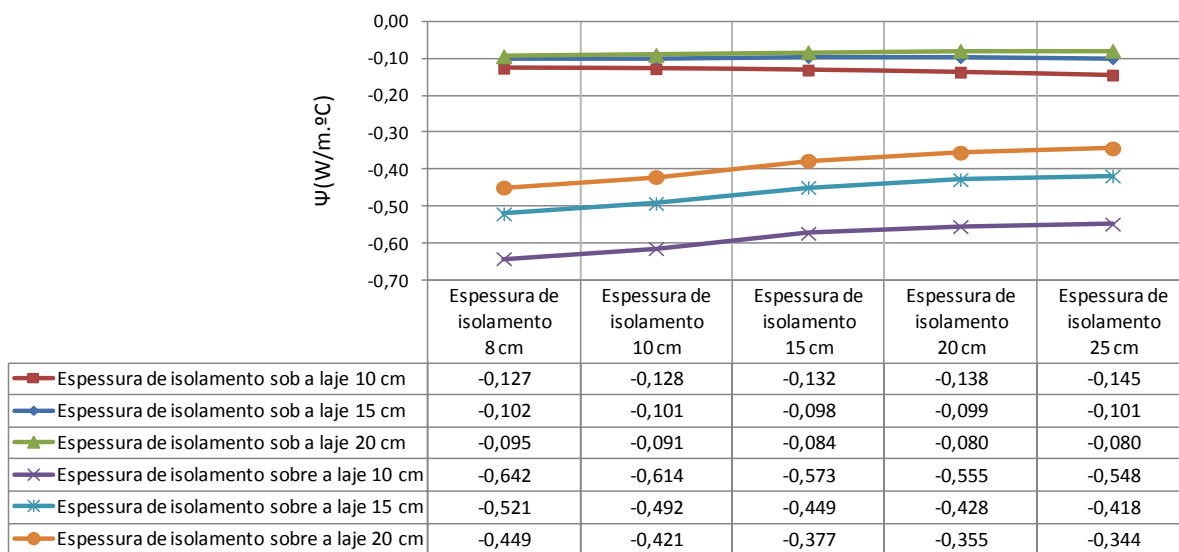


Figura 44. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação de espessura do isolamento de parede exterior e do isolamento da laje

### 4.3.1.2. Parede exterior (dupla)

#### Representação:

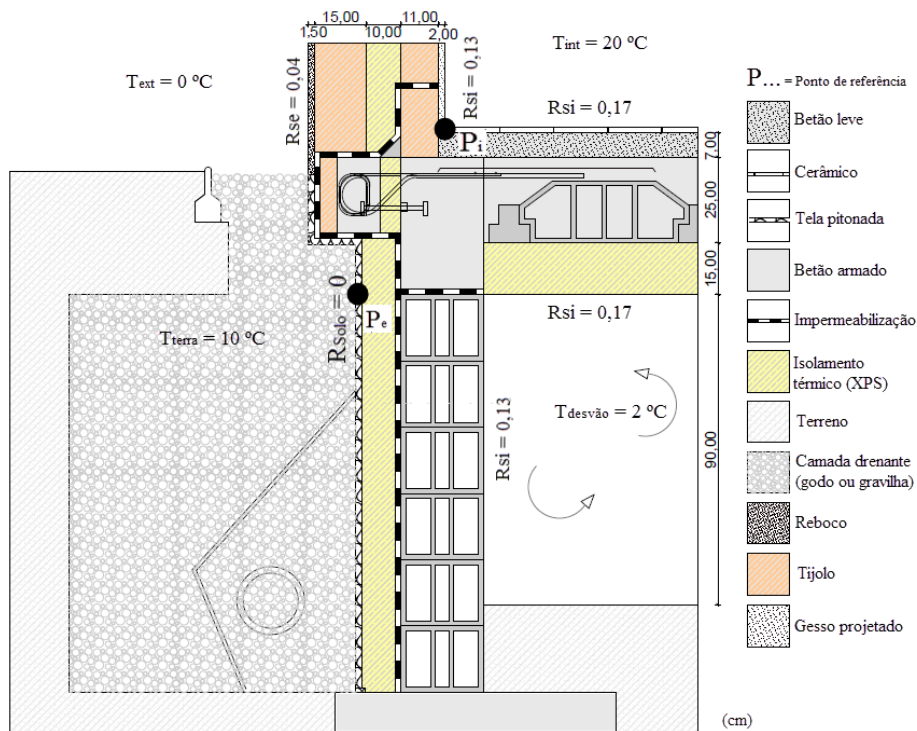


Figura 45. Ligação de fachada (parede dupla) com laje de piso sobre desvão ventilado

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação parede exterior dupla com cavidade totalmente preenchida com isolamento com laje que divide dois espaços. Um espaço é útil (aquecido) e outro é um espaço não útil (sem aquecimento) fortemente ventilado. A modelação numérica conjuga a variação da espessura de isolamento da parede e a variação da espessura de isolamento da laje que separa os dois espaços, estando o isolamento colocado na parte inferior da laje (ver Figura 47). O pormenor apresenta uma solução de corte térmico da Schock Isokorb tipo O (ver Anexo C), conferindo ao detalhe construtivo a continuidade da camada de isolamento no encontro da laje com a parede exterior dupla. Esta solução construtiva é corrente nos edifícios com piso térreo, materializado com laje sobrelevada do solo.

**Processo construtivo:**

- Cofragem, armação e betonagem de fundações.
- Execução das paredes do desvão.
- Cofragem dos elementos construtivos (vigas e lajes).
- Armação de vigas, lajes e em conjunto inclui-se o elemento de corte térmico na laje (ver Anexo C) e consequente betonagem desses elementos.
- Execução de barreiras contra a humidade ascensional com recurso a membranas de impermeabilização ao longo da junta horizontal de argamassa das paredes de alvenaria garantindo o corte hídrico e a ausência de fissuração e adequada estabilidade e durabilidade. A barreira deve-se colocar numa das primeiras fiadas acima do terreno.
- Execução das paredes exteriores sobre os bordos da laje, segundo a solução construtiva, fazendo coincidir o plano do isolamento das paredes com o elemento de corte térmico da laje.
- Isolamento da parede exterior do desvão e impermeabilização prévia (pinturas ou telas asfálticas) na interface entre os blocos térmicos e o isolamento. A zona onde encosta a cortina drenante de águas pluviais para evitar o fenómeno de humidade ascensional é protegida através duma tela pitonada (membrana alveolar em PEAD) com dupla funcionalidade de drenagem e de impermeabilização e permite a ventilação da parede, garantindo assim melhor escoamento das águas do terreno e o maior controlo de condensações internas, respetivamente (Mendes, 2011). Os pitons devem dispor-se virados para a parede e a sobreposição das camadas adjacentes deve ser aproximadamente 7 cm.

- A cortina drenante (godo ou gravilha) de águas pluviais, encostada ao fundo da parede contém um tubo de dreno ligado a coletor, envolvido em manta geotêxtil para facilitar a drenagem das águas junto dos elementos soterrados (ver Figura 45).
- Isolamento da laje segundo as configurações das soluções construtivas.

**Resultados:**

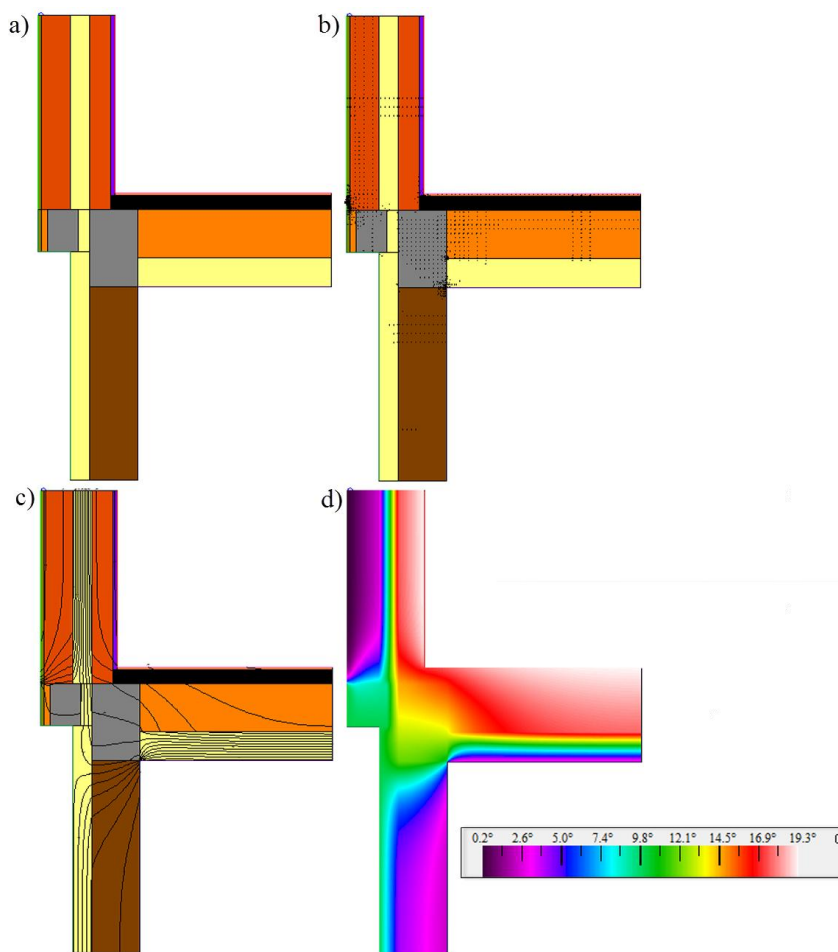


Figura 46. Resultado Therm da ligação de fachada (parede dupla) com laje de piso sobre desvão ventilado: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = - 0,437 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,214 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

$$\Psi_i = - 0,261 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,214 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

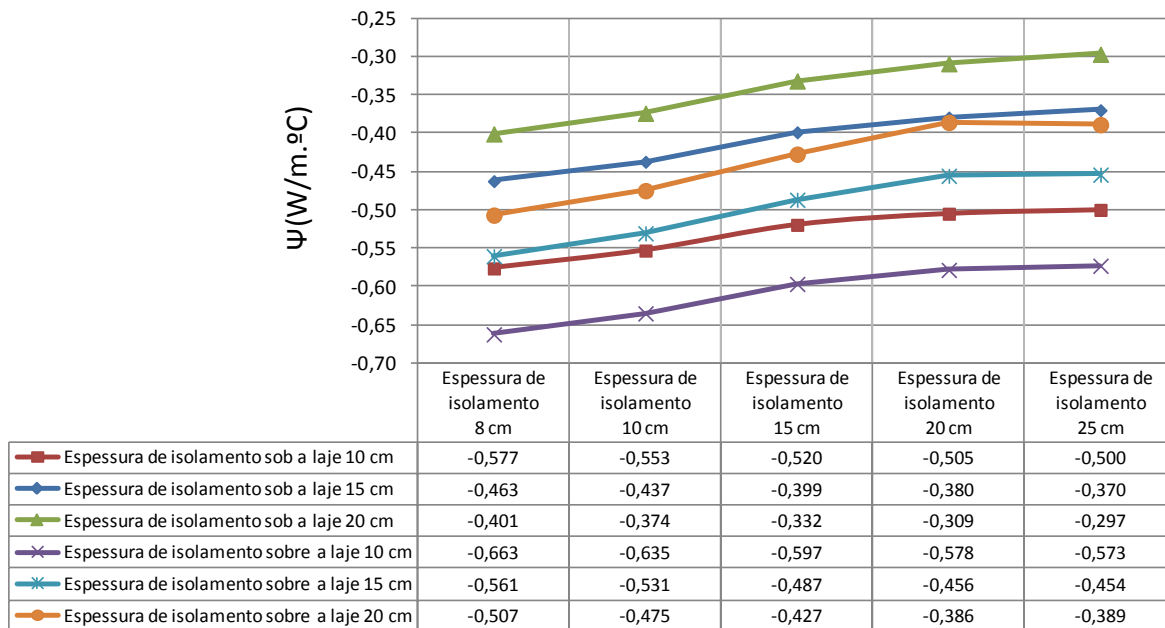


Figura 47. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variaçãõ da espesçsura de isolamento da parede exterior e do isolamento da laje



### 4.3.2. Ligação de fachada com pavimentos térreos (ensoleiramento)

#### 4.3.2.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

##### Representação:

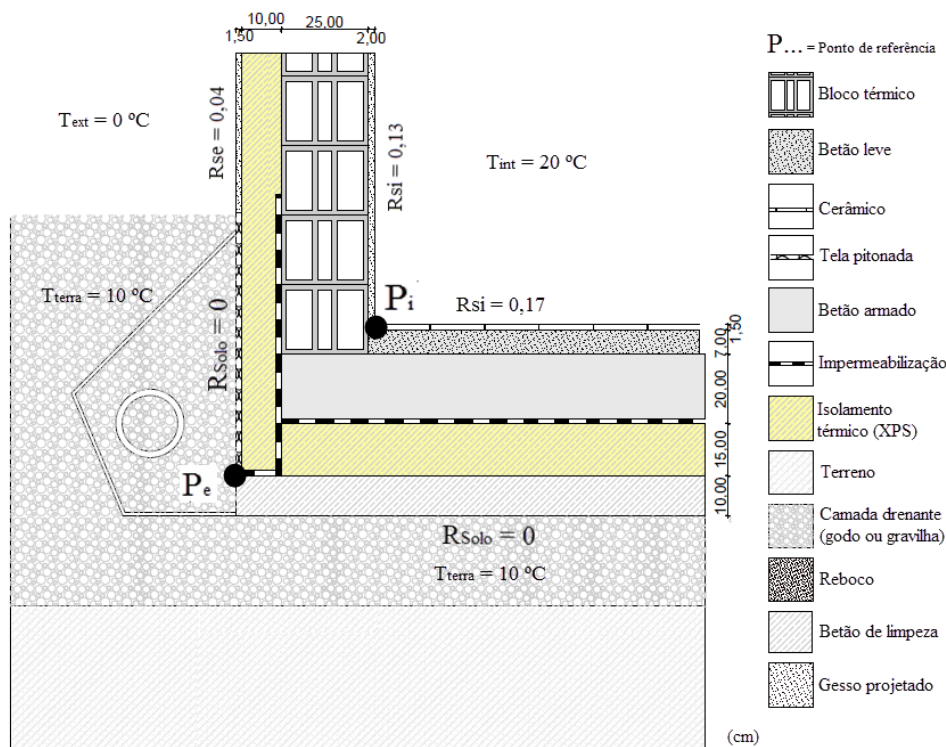


Figura 48. Ligação de fachada (parede simples) com pavimentos térreos (ensoleiramento)

##### Descrição:

O pormenor representa a ligação de uma laje de pavimento (ensoleiramento) diretamente apoiada no terreno com uma parede de fachada com sistema de isolamento pelo exterior. A modelação numérica consiste na conjugação de diferentes espessuras de isolamento na parede e de diferentes espessuras de isolamento sob a laje (ver Figura 50).

##### Processo construtivo:

- Nivelamento do terreno firme e execução das camadas de godo e de betão de limpeza.
- Procedimento de construção de pavimento em contacto com o solo como mencionado anteriormente nas soluções construtivas, envolvendo a cofragem, isolamento térmico, armação da laje e posterior betonagem.
- Execução das paredes exteriores sobre os bordos da laje.
- Proceder ao isolamento das paredes exteriores conforme descrito anteriormente nas soluções construtivas, mas com o detalhe de impermeabilizar primeiramente (pinturas

ou telas asfálticas) a interface entre os blocos térmicos e o isolamento até à altura onde encosta a cortina drenante de águas pluviais para evitar o fenómeno de humidade ascensional e o terreno. Na parte exterior do isolamento é colocada uma tela pitonada (membrana alveolar em PEAD) com dupla funcionalidade de drenagem e de impermeabilização e permite a ventilação da parede, garantindo assim melhor escoamento das águas do terreno e o maior controlo de condensações, respetivamente (Mendes, 2011). Os pitons devem dispor-se virados para a parede e a sobreposição das camadas adjacentes deve ser aproximadamente 7 cm.

- A cortina drenante (godo ou gravilha) de águas pluviais, encostada ao fundo da parede contém um tubo de dreno ligado a coletor, envolvido em manta geotêxtil para facilitar a drenagem das águas junto dos elementos soterrados (ver Figura 48).

### Resultados:

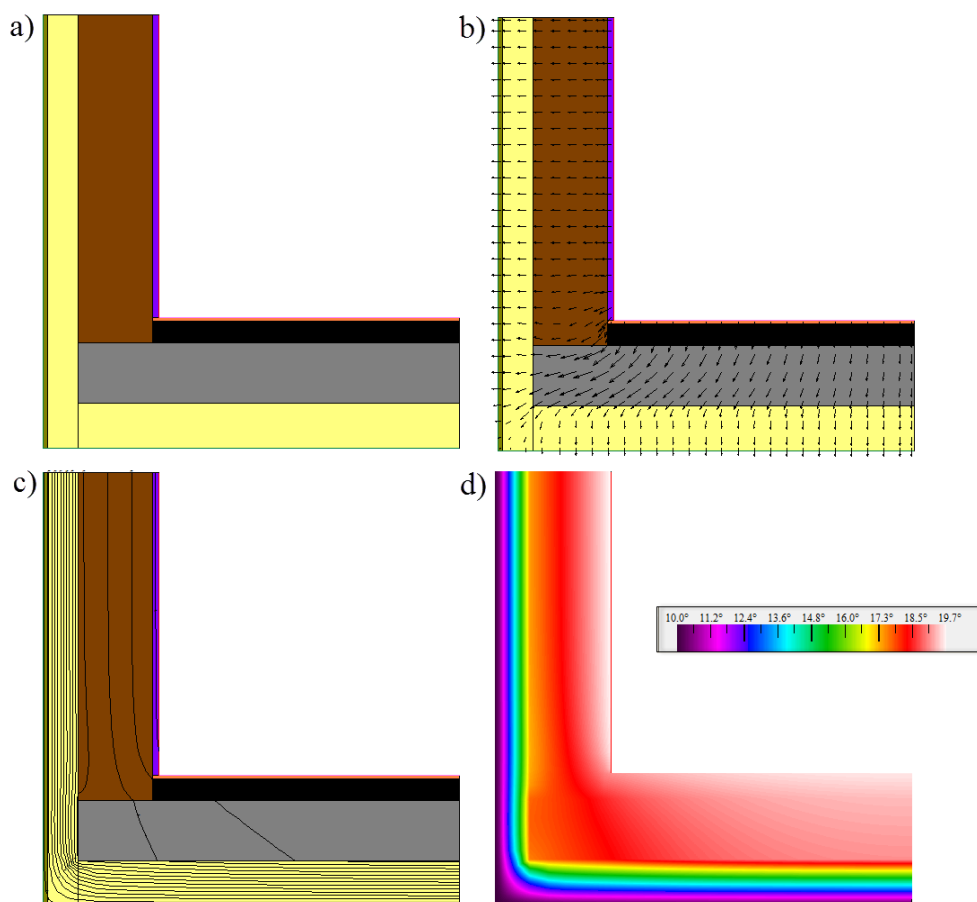


Figura 49. Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com pavimentos térreos (ensoleiramento) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = -0,044 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad L^{2D} = 0,633 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\Psi_i = 0,153 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad L^{2D} = 0,633 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

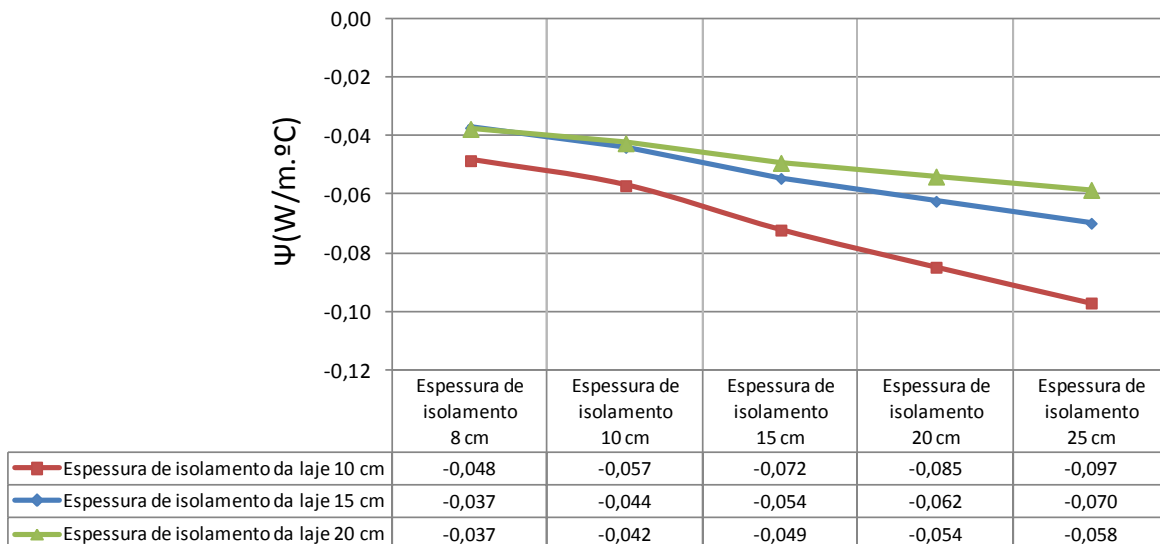


Figura 50. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e do isolamento da laje

4.3.2.2. Parede exterior (dupla)

Representação:

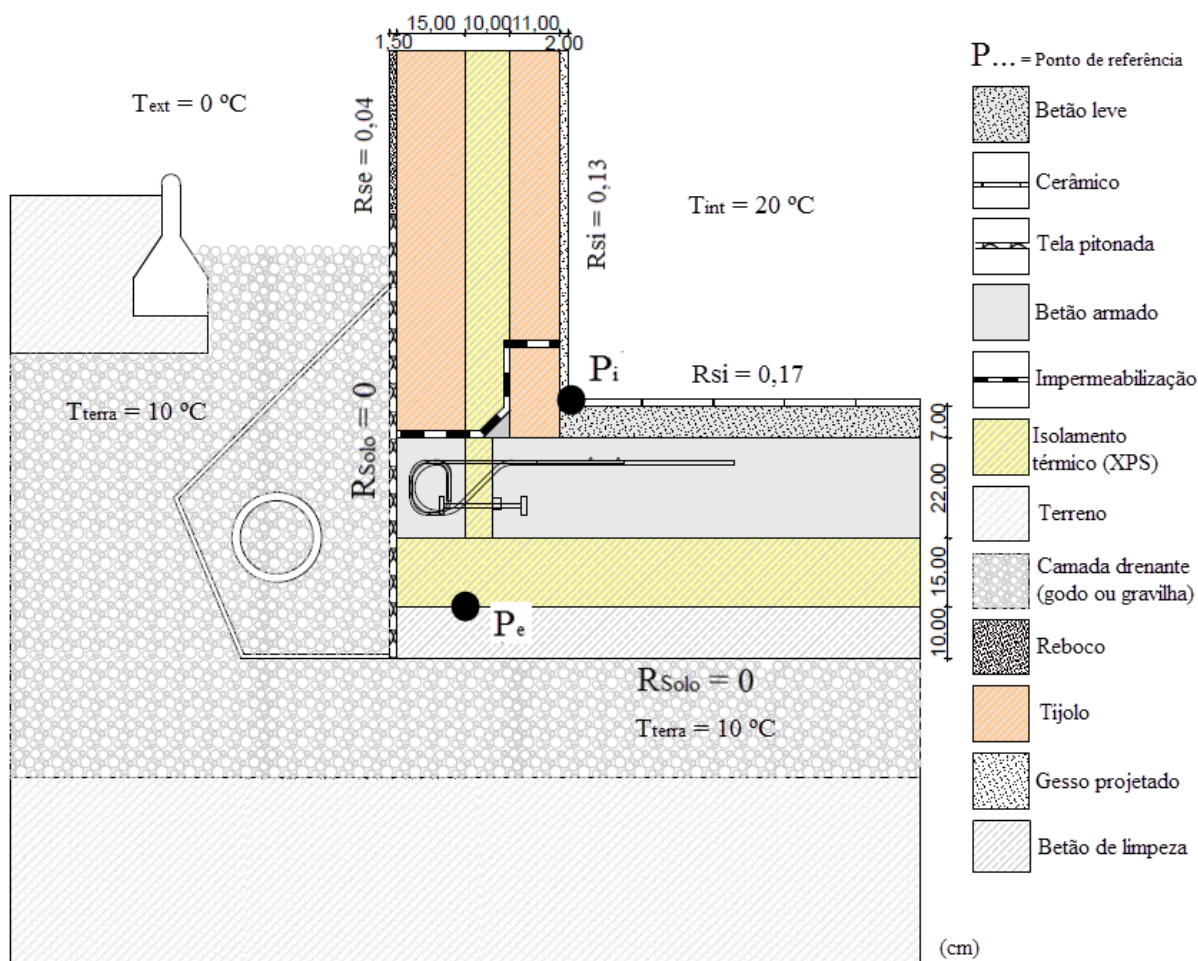


Figura 51. Ligação de fachada (parede dupla) com pavimentos térreos (ensoleiramento)

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação de uma laje de pavimento (ensoleiramento) diretamente apoiada no terreno com uma parede dupla com cavidade totalmente preenchida com isolamento. A modelação numérica consiste na conjugação de diferentes espessuras de isolamento na parede e de diferentes espessuras de isolamento sob a laje (ver Figura 53). O pormenor apresenta uma solução de corte térmico da Schock Isokorb tipo O (ver Anexo C), conferindo ao detalhe construtivo a continuidade da camada de isolamento no encontro da laje com a parede exterior.

**Processo construtivo:**

- Nivelamento do terreno firme.
- Procedimento de construção de laje em contacto com o solo mencionado anteriormente nas soluções construtivas envolvendo a cofragem, isolamento térmico, armação da laje e posterior betonagem. No processo de armação da laje é incluído o elemento de corte térmico (ver Anexo C).
- Execução de barreiras contra a humidade ascensional com recurso a membranas de impermeabilização ao longo da junta horizontal de argamassa das paredes de alvenaria garantindo o corte hídrico e a ausência de fissuração e a adequada estabilidade e durabilidade. A barreira deve-se colocar numa das primeiras fiadas acima do terreno.
- Execução das paredes exteriores sobre os bordos da laje segundo as soluções construtivas fazendo coincidir o plano do isolamento das paredes com o elemento de corte térmico da laje.
- Impermeabilização (pinturas ou telas asfálticas) da interface entre a parede exterior e o terreno, até à altura onde encosta o terreno e a cortina drenante de águas pluviais. Após impermeabilização é colocada uma tela pitonada (membrana alveolar em PEAD) com dupla funcionalidade de drenagem e de impermeabilização e permite a ventilação da parede, garantindo assim melhor escoamento das águas do terreno e o maior controlo das condensações, respetivamente. Esta tela garante ainda a proteção do sistema de impermeabilização do impacto do terreno aquando do aterro das fundações e igualmente o impulso do terreno durante o tempo de vida útil da fundação (Mendes, 2011).
- A cortina drenante (godo ou gravilha) de águas pluviais encostada ao fundo da parede contém um tubo de dreno ligado a coletor, envolvido em manta geotêxtil para facilitar a drenagem das águas junto dos elementos soterrados (ver Figura 51).

**Resultados:**

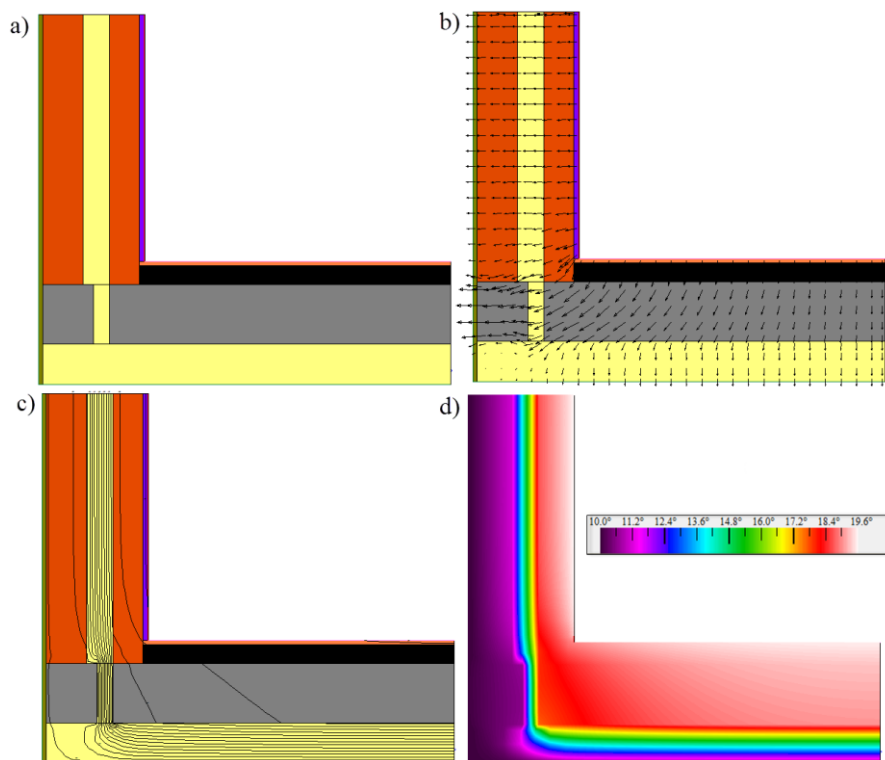


Figura 52. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com pavimentos térreos (ensoleiramento) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,011 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,673 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

$$\Psi_i = 0,174 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,673 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

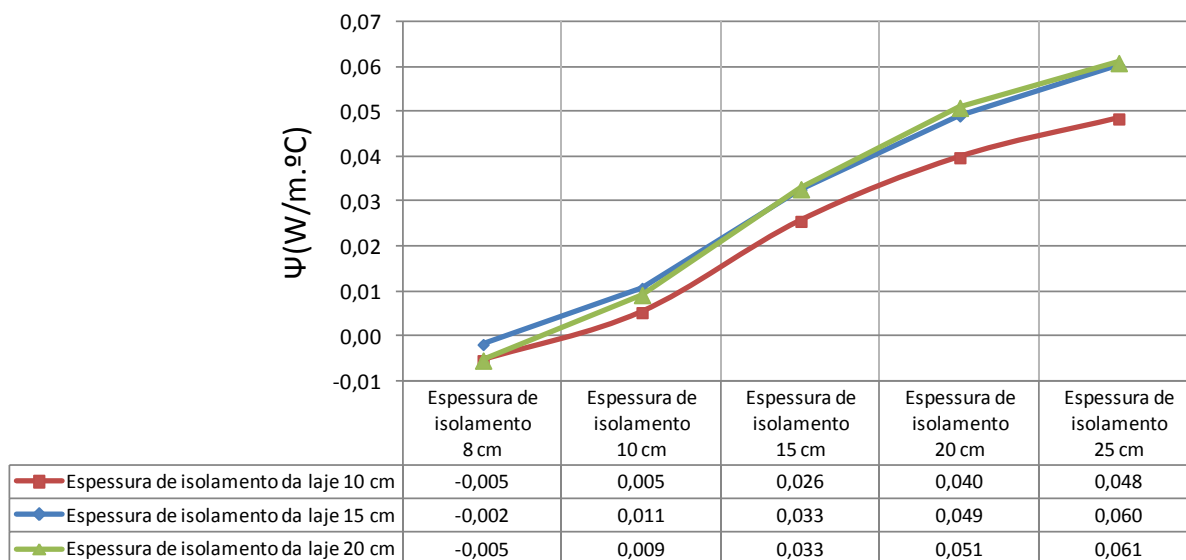


Figura 53. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior dupla e do isolamento da laje

## 4.3.3. Ligação de parede interior com pavimentos térreos (ensoleiramento)

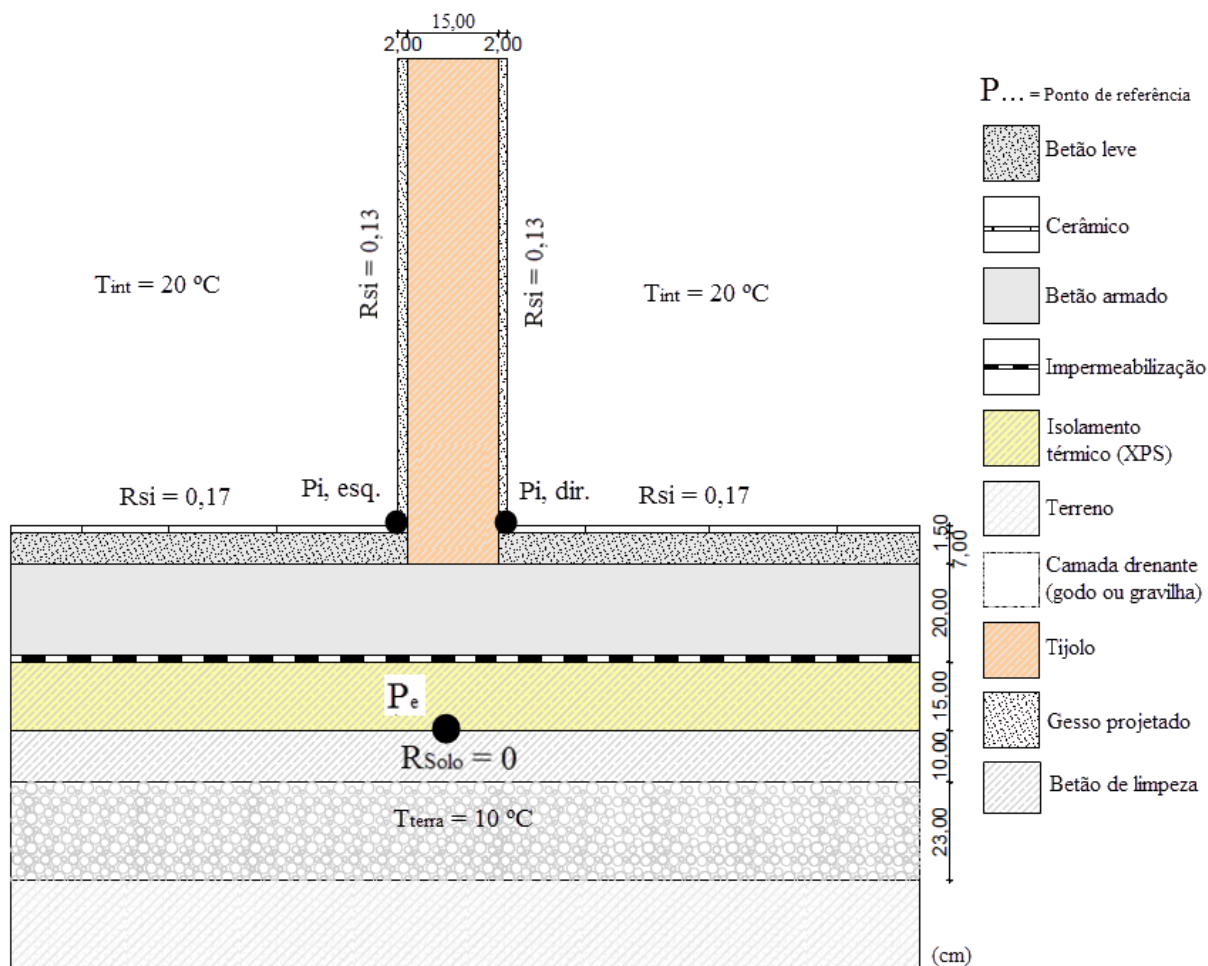
**Representação:**

Figura 54. Ligação de parede interior com pavimentos térreos (ensoleiramento)

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação de uma laje de pavimento térreo (ensoleiramento) diretamente apoiada no terreno com parede interior. A modelação numérica consiste na conjugação de diferentes espessuras de isolamento sob a laje (ver Figura 56).

**Processo construtivo:**

- Nivelamento do terreno firme e execução das camadas de godó e de betão de limpeza.
- Procedimento de construção de laje em contacto com o solo mencionado anteriormente nas soluções construtivas envolvendo a cofragem, isolamento térmico, armação da laje e posterior betonagem.
- Execução da parede interior, diretamente apoiada no pavimento.

**Resultados:**

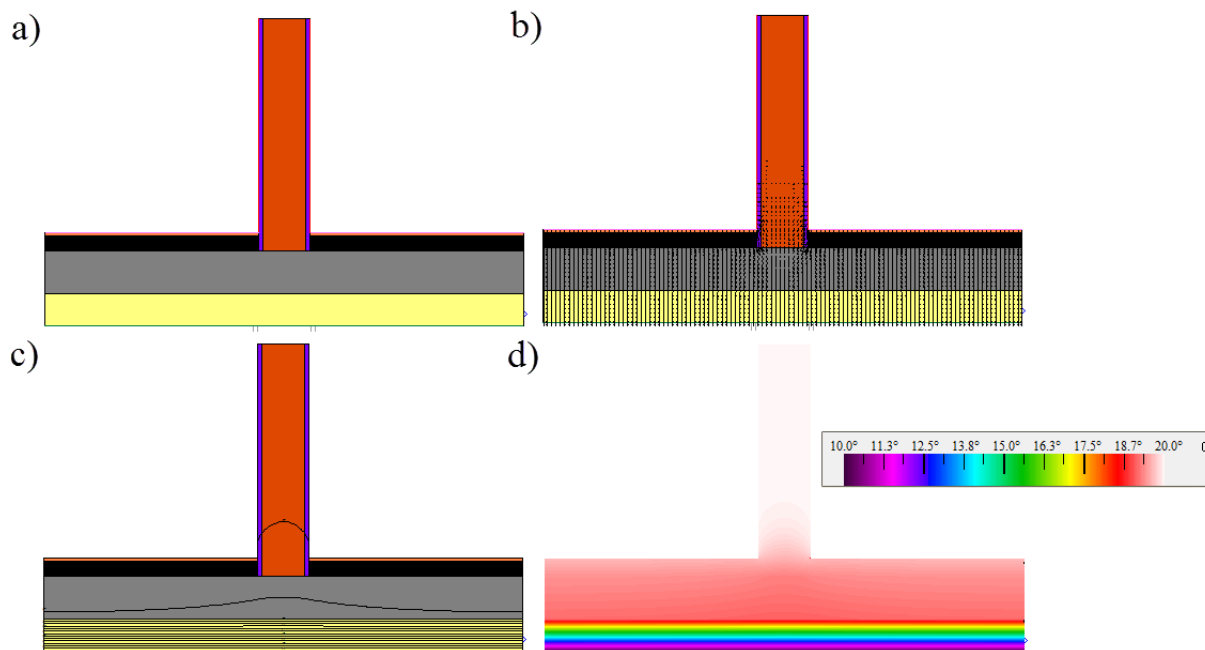


Figura 55. Resultado Therm da ligação de parede interior com pavimentos térreos (ensoleiramento): a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = -0,002 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,505 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

$$\Psi_i = 0,053 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,505 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

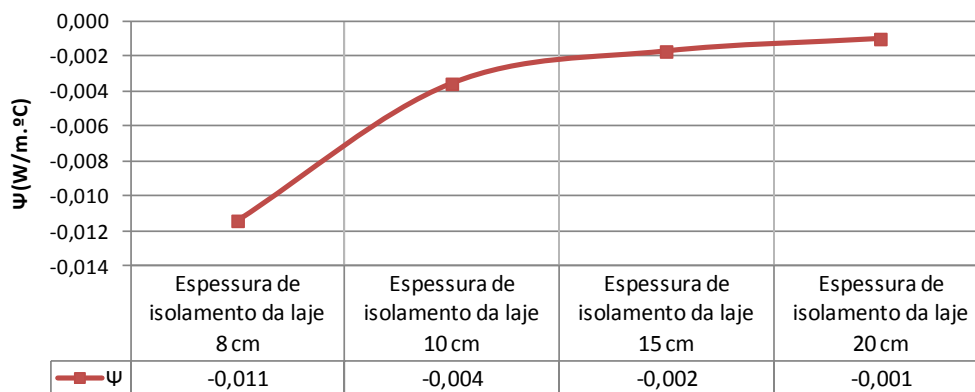


Figura 56. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e do isolamento da laje



#### 4.3.4. Ligação fachada/padieira

##### 4.3.4.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

###### Representação:

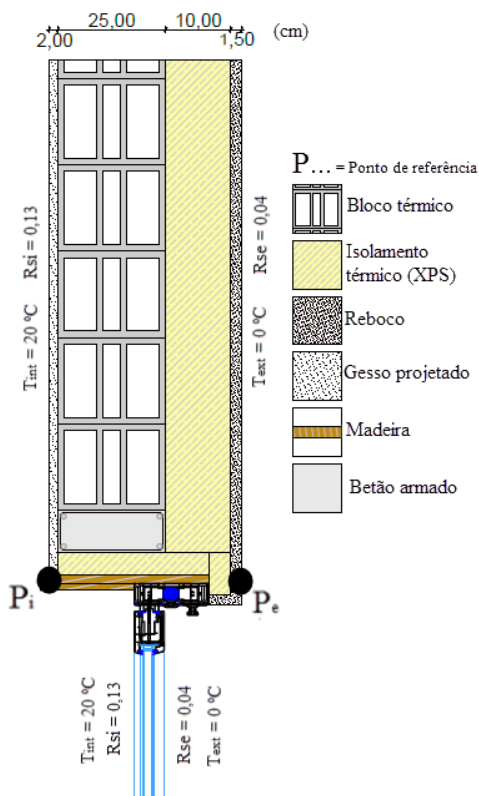


Figura 57. Ligação fachada (parede simples)/padieira

###### Descrição:

O pormenor representa a ligação da padieira com a respetiva janela numa parede de fachada com sistema de isolamento pelo exterior. A modelação numérica conjuga a ligação com ou sem isolamento da caixilharia, podendo-se ver as diferenças entre ambos os casos (ver Figura 59). A construção desta ligação pretende dar continuidade ao isolamento evitando o contacto da caixilharia com a padieira (elemento condutor). A aplicação da caixilharia deve ser o mais próximo possível da posição intermédia e na continuidade do isolamento da parede.

###### Processo construtivo:

- Execução das paredes exteriores deixando a abertura da janela preparada para a colocação da padieira (elemento pré-fabricado) sobre a alvenaria. Colocação do elemento padieira em betão isolante resistente.



- Injeção de espuma isolante na superfície da padieira e posterior fixação do suporte de madeira tendo o cuidado de reduzir ao mínimo a perfuração do isolamento.
- Fixação da caixilharia no suporte de madeira.
- Procedimento de construção de paredes exteriores com isolamento pelo exterior mencionado anteriormente nas soluções construtivas. A colocação do isolamento que sobrepõe a caixilharia não deve ser independente da placa de isolamento que limita a superfície exterior da padieira, pois tornar-se-ia um elemento instável. Então a placa de isolamento de sobreposição deve fazer parte da mesma placa (superior) de isolamento fazendo um corte na ponta da placa (segundo a direção da espessura) de forma a reduzir a espessura do isolamento. Aplicação de perfil de pingadeira com rede envolvendo a aresta do plano da fachada com o plano interior do vão, permitindo o reforço da aresta e evitando o recuo da água que pinga da fachada (Weber, 2013).
- Vedação da junta de encontro da caixilharia com o isolamento de sobreposição para impedir possíveis infiltrações e condensações na interface dos dois elementos com efeitos danosos para o isolamento, através de mástique e cordão de fundo de junta.
- Revestimento interior da padieira.

### Resultados:

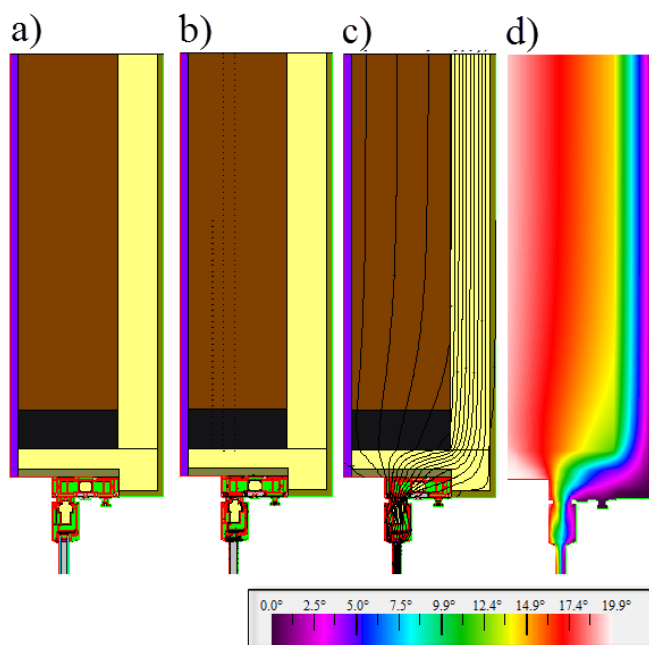


Figura 58. Resultados Therm da ligação fachada (parede simples)/padieira: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,030 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)} \quad L^{2D} = 1,016 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,030 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)} \quad L^{2D} = 1,016 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$$

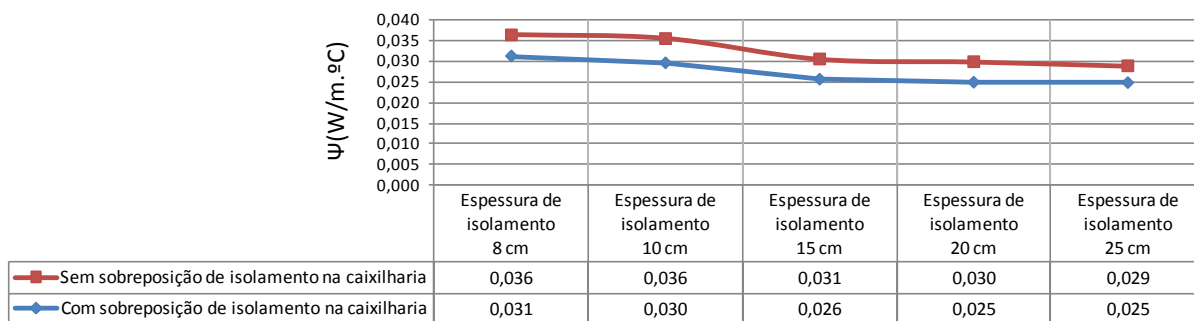


Figura 59. Influência da sobreposição do isolamento na caixilharia e variação da espessura de isolamento da parede no valor de  $\Psi_e$

#### 4.3.4.2. Parede exterior (dupla)

##### Representação:

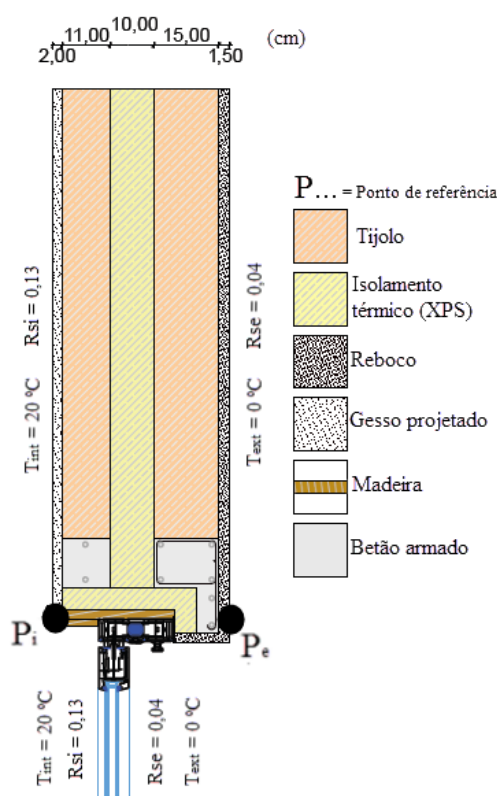


Figura 60. Ligação fachada (parede dupla)/padieira

##### Descrição:

O pormenor representa a ligação da padieira com a respetiva janela numa parede dupla com cavidade totalmente preenchida com isolamento. A modelação numérica conjuga a ligação com ou sem isolamento da caixilharia, podendo-se ver as diferenças de resultados em ambos os casos (ver Figura 62). A construção desta ligação pretende dar continuidade ao isolamento evitando o contacto da caixilharia com a padieira (elemento condutor). A aplicação da

caixilharia deve ser o mais próximo possível da posição intermédia e na continuidade do isolamento da parede.

### **Processo construtivo:**

- Execução das paredes exteriores de acordo com as soluções construtivas deixando a abertura da janela preparada para a colocação da padieira (elementos pré-fabricados) sobre a alvenaria. Colocação do elemento padieira em betão isolante resistente com o detalhe de deixar no elemento de padieira do pano exterior a aba que cobre a caixilharia.
- Injeção de espuma isolante na superfície da padieira e posterior fixação do suporte de madeira tendo o cuidado de reduzir ao mínimo a perfuração do isolamento.
- Fixação da caixilharia no suporte de madeira.
- Procedimento de construção de paredes exteriores com isolamento pelo exterior mencionado anteriormente nas soluções construtivas.
- Vedação da junta de encontro da caixilharia com o isolamento de sobreposição para impedir possíveis infiltrações e condensações na interface dos dois elementos com efeitos danosos para o isolamento, através de mástique e cordão de fundo de junta.
- Revestimento interior da padieira.

### **Resultados:**

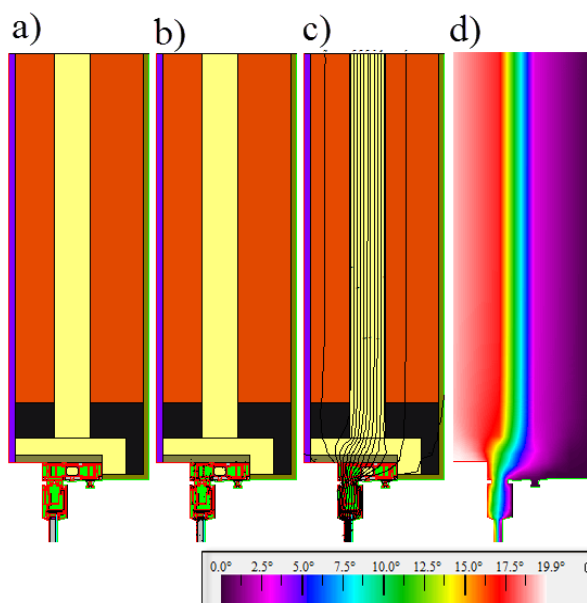


Figura 61. Resultados Therm da ligação fachada (parede dupla)/padieira: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,039 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 1,063 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,039 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 1,063 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

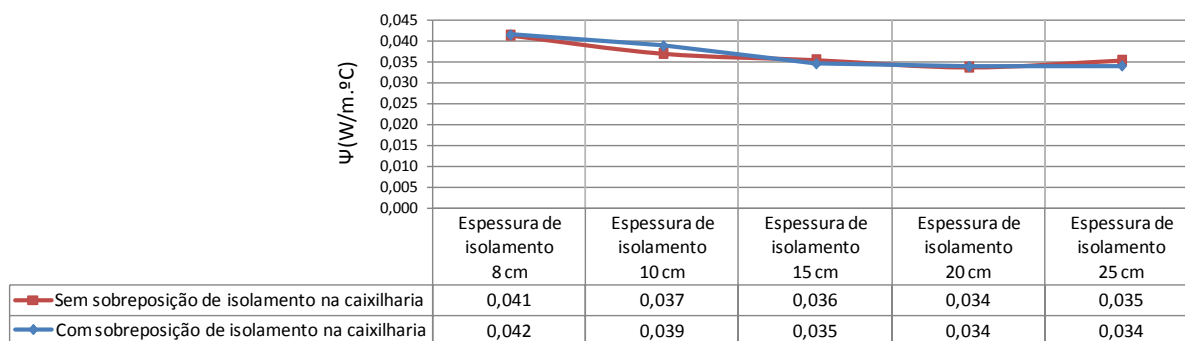


Figura 62. Influência da sobreposição do isolamento na caixilharia e variação da espessura de isolamento da parede no valor de  $\Psi_e$

### 4.3.5. Ligação fachada (caixa de estore)/padieira

#### 4.3.5.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

##### Representação:

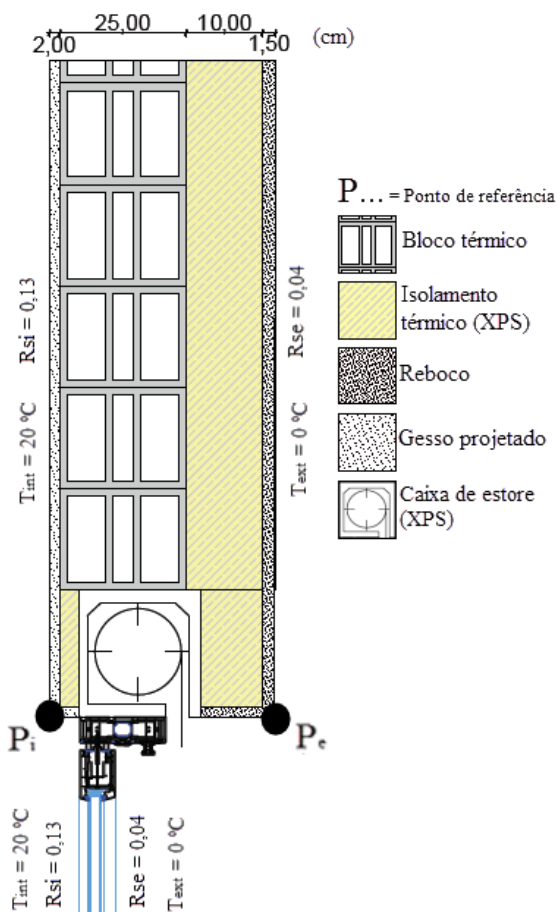


Figura 63. Ligação fachada (parede simples) e caixa de estore/padieira

##### Descrição:

O pormenor representa a ligação do topo da janela com a caixa de estore numa parede de fachada com sistema de isolamento pelo exterior. A modelação numérica conjuga a ligação com ou sem isolamento da caixilharia, podendo-se ver as semelhanças entre ambos os casos (ver Figura 65). A área ocupada pela caixa de estore é considerada como se fosse parede (Cappelletti et al., 2011). De acordo com EN ISO 10211:2007 a modelação numérica teve em conta a secção composta pela parede, caixa de estore e o topo da janela caracterizada pelo valor  $\Psi$  que inclui o efeito da caixa de estore.

**Processo construtivo:**

- Execução das paredes exteriores deixando a abertura da janela preparada para a colocação da caixa de estore (elemento pré-fabricado) sobre a alvenaria.
- Colocação da caixa de estore na zona intermédia da parede e fixação da caixa de estore/parede exterior com suporte metálico.
- Colocação do isolamento das paredes exteriores conforme mencionado anteriormente nas soluções construtivas.
- Aplicação de pedaço de isolamento do lado interior do edifício na superfície da caixa de estore. Aplicação de perfil de pingadeira com rede envolvendo a aresta do plano da fachada com o plano interior do vão, permitindo o reforço da aresta e evitando o recuo da água que pinga da fachada (Weber, 2013).
- Fixação da caixilharia à caixa de estore tendo o cuidado de reduzir ao mínimo a perfuração da caixa de estore.

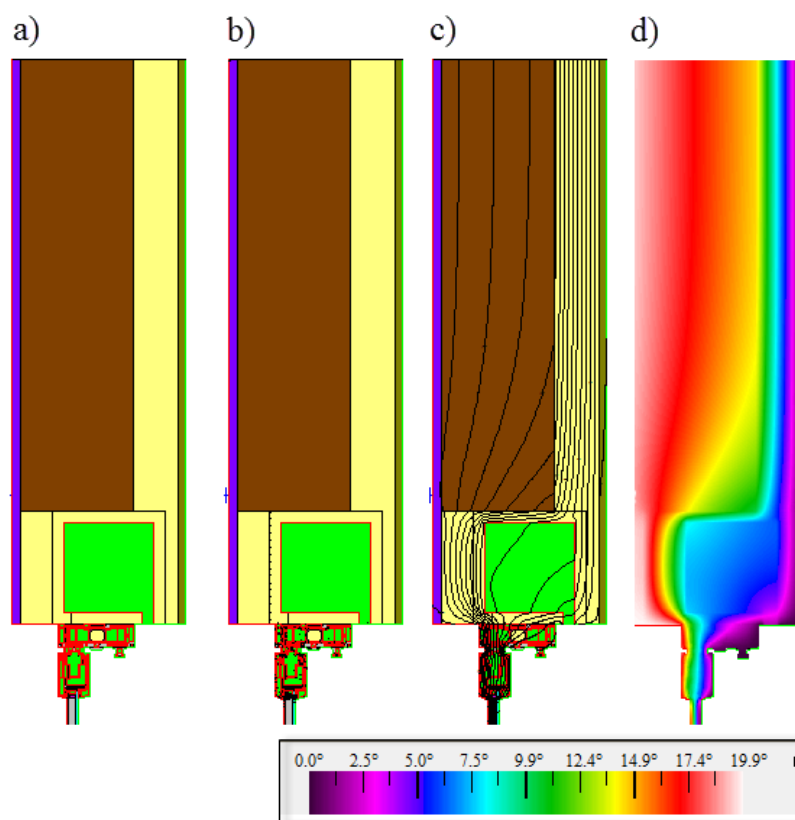
**Resultados:**

Figura 64. Resultados Therm da ligação fachada (parede simples) e caixa de estore/padieira: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,088 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 1,119 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,088 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 1,119 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

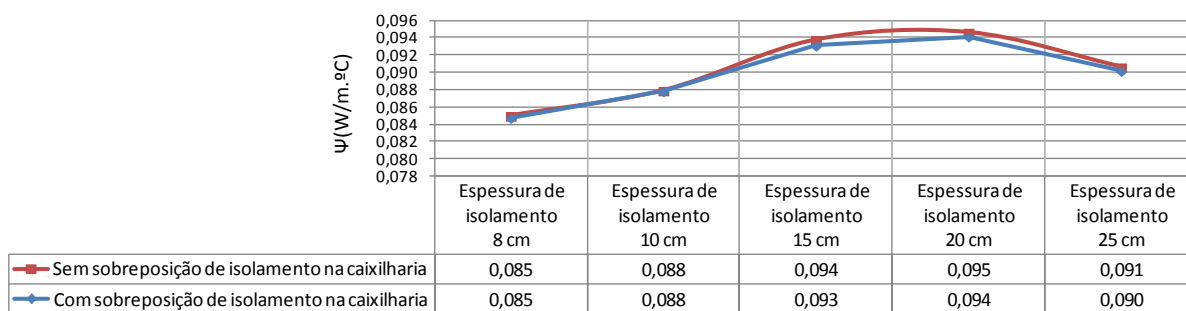


Figura 65. Influência da sobreposição do isolamento na caixilharia e variação da espessura de isolamento da parede no valor de  $\Psi_e$

### 4.3.5.2. Parede exterior (dupla)

#### Representação:

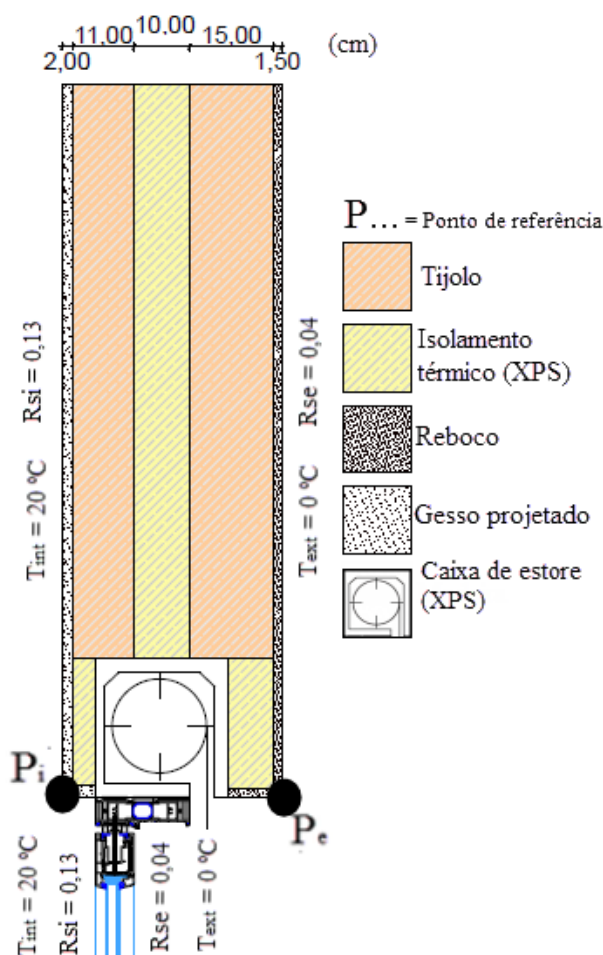


Figura 66. Ligação fachada (parede dupla) e caixa de estore/padieira

#### Descrição:

O pormenor representa a ligação do topo da janela com a caixa de estore numa parede dupla com cavidade totalmente preenchida com isolamento. A modelação numérica conjuga a ligação com ou sem isolamento da caixilharia, podendo-se ver as semelhanças entre ambos os

casos (ver Figura 68). A área ocupada pela caixa de estore é considerada como se fosse parede (Cappelletti et al., 2011). De acordo com EN ISO 10211:2007 a modelação numérica tem em conta a secção composta pela parede, caixa de estore e o topo da janela caracterizada pelo valor  $\Psi$  que inclui o efeito da caixa de estore.

### **Processo construtivo:**

- Execução das paredes exteriores deixando a abertura da janela preparada para a colocação da caixa de estore (elemento pré-fabricado) sobre a alvenaria.
- Colocação da caixa de estore na zona intermédia da parede, apoiada nos dois panos de alvenaria. Quando só é possível apoiar um lado da caixa apenas num dos panos (espessuras de isolamento bastante generosas), deve-se usar um suporte (não metálico) em cantoneira para garantir a sua estabilidade.
- Aplicação dos pedaços de isolamento nas superfícies laterais da caixa de estore por colagem direta ou fixação mecânica.
- Fixação da caixilharia à caixa de estore tendo o cuidado de reduzir ao mínimo a perfuração da caixa de estore.

### **Resultados:**

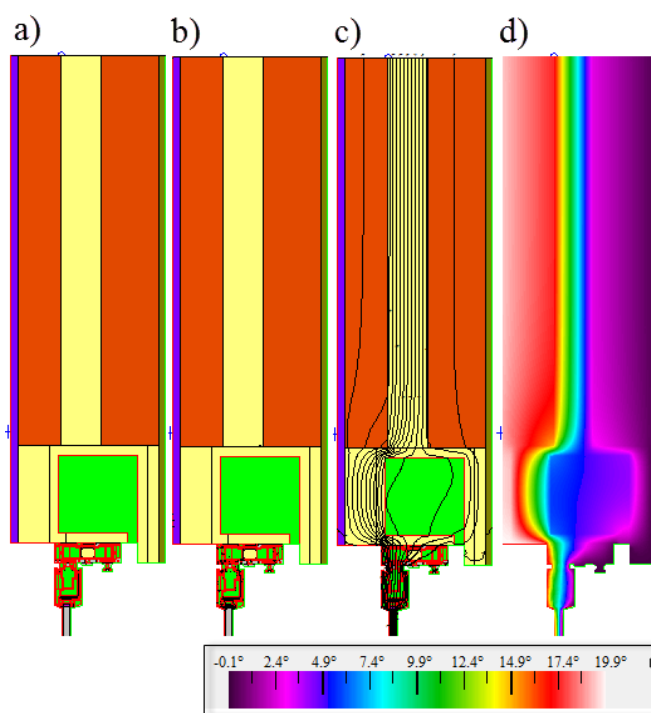


Figura 67. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) e caixa de estore/padieira: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,066 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 1,111 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,066 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 1,111 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$



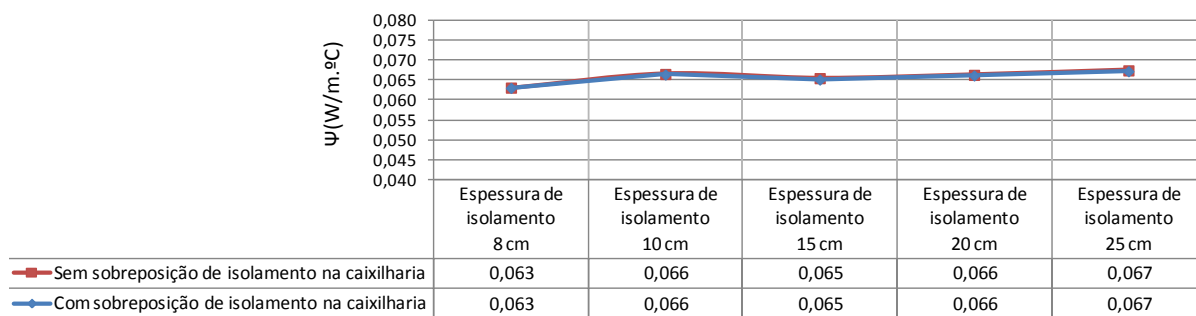


Figura 68. Influência da sobreposição do isolamento na caixilharia e variação da espessura de isolamento da parede no valor de  $\Psi_e$

### 4.3.6. Ligações fachada/peitoril

#### 4.3.6.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

##### Representação:

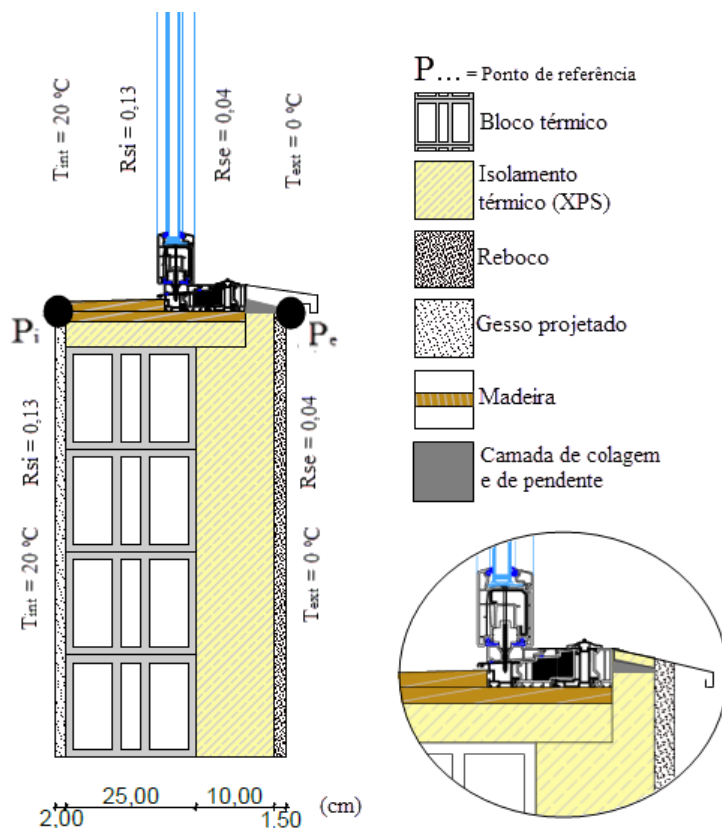


Figura 69. Ligação fachada (parede simples)/peitoril

##### Descrição:

O pormenor representa a ligação do peitoril com a respetiva janela numa parede de fachada com sistema de isolamento pelo exterior. A modelação numérica conjuga diferentes espessuras de isolamento da parede usando o peitoril exterior em pedra natural ou metálico (ver Figura 71). A construção desta ligação pretende dar continuidade ao isolamento evitando o contacto da caixilharia com o peitoril (elemento condutor). A aplicação da caixilharia é o mais próximo possível da posição intermédia e na continuidade do isolamento da parede.

##### Processo construtivo:

- Execução das paredes exteriores deixando a abertura da janela.
- Injeção de espuma isolante na superfície do peitoril e posterior fixação do suporte de madeira tendo o cuidado de reduzir ao mínimo a perfuração do isolamento.

- Fixação da caixilharia no suporte de madeira.
- Procedimento de colocação do isolamento pelo exterior conforme mencionado anteriormente nas soluções construtivas.
- Quando o peitoril é em pedra, executar a camada de colagem e de pendente deixando um espaço entre a caixilharia/peitoril e entre o peitoril/bordo do isolamento exterior, para posterior execução de junta de encontro. Se o peitoril for metálico, acima da camada de colagem e de pendente é aplicada uma placa XPS e posteriormente é aparafusado o peitoril metálico conforme representado na Figura 69.
- Vedação das juntas de encontro das interfaces referidas no último passo, para impedir possíveis infiltrações e condensações, através de mástique e cordão de fundo de junta.
- O bordo de gotejamento do peitoril deve ser afastado pelo menos 30 mm em relação à superfície da parede acabada. O peitoril de pedra deve conter rasgos na parte superior para fazer escoar a água evitando o contacto permanente com a caixilharia.
- Revestimento do peitoril interior.

### Resultados:

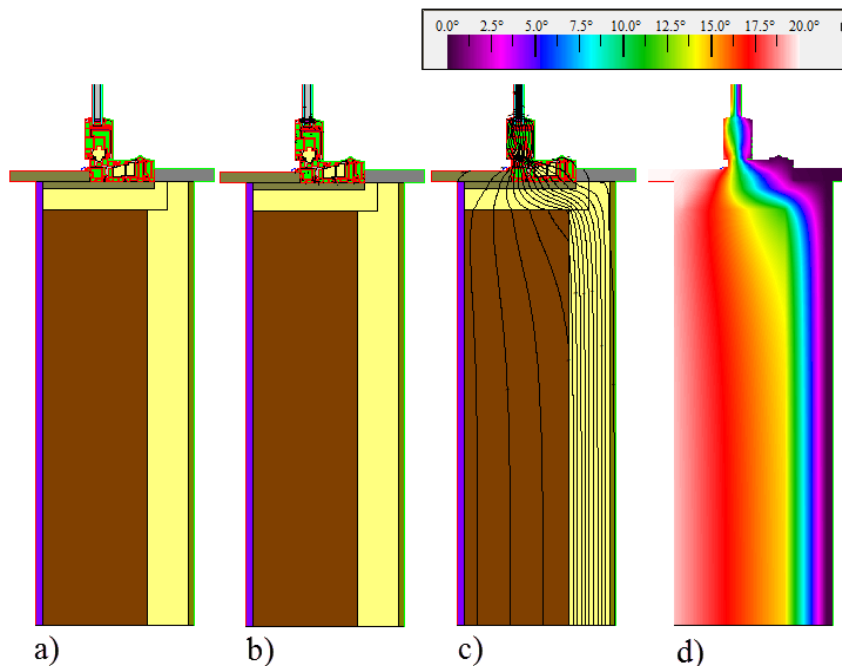


Figura 70. Resultados Therm da ligação fachada (parede simples)/peitoril em pedra: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,035 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad L^{2D} = 1,000 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\Psi_i = 0,035 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad L^{2D} = 1,000 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

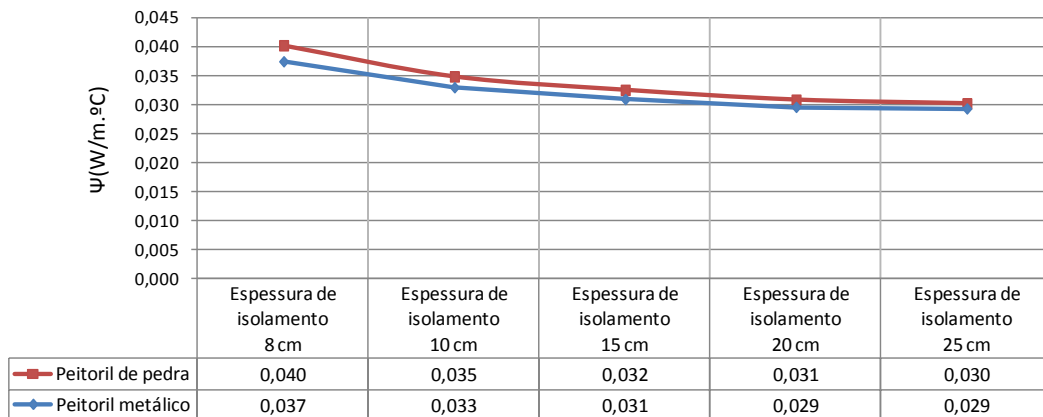


Figura 71. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento térmico da parede exterior e do tipo de peitoril

### 4.3.6.2. Parede exterior (dupla)

#### Representação:

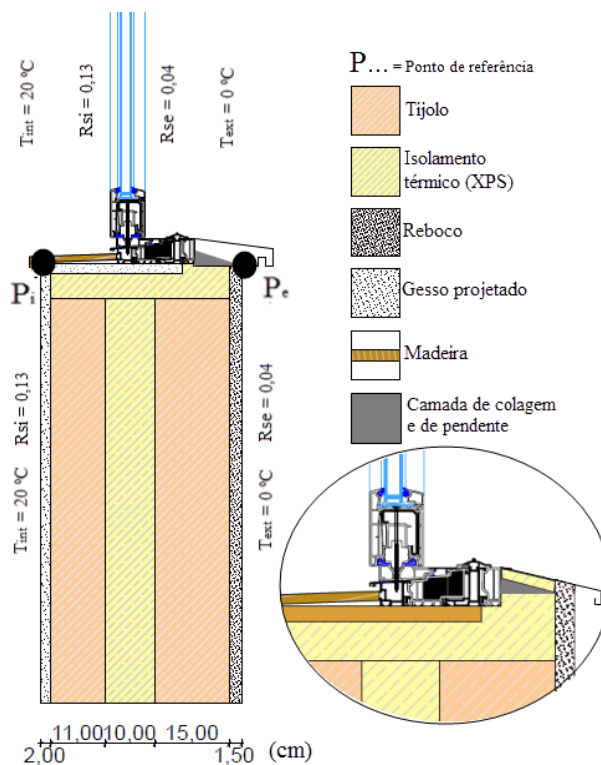


Figura 72. Ligação fachada (parede dupla)/peitoril

#### Descrição:

O pormenor representa a ligação do peitoril com a respetiva janela numa parede dupla com cavidade totalmente preenchida com isolamento. A modelação numérica conjuga diferentes espessuras de isolamento da parede usando o peitoril exterior em pedra natural ou metálico (ver Figura 74). A construção desta ligação pretende dar continuidade ao isolamento evitando

o contacto da caixilharia com o peitoril (elemento condutor). A aplicação da caixilharia é o mais próximo possível da posição intermédia e na continuidade do isolamento da parede.

### **Processo construtivo:**

- Execução das paredes exteriores de acordo com as soluções construtivas de paredes duplas mencionado anteriormente deixando a abertura da janela.
- Injeção de espuma isolante na superfície do peitoril e posterior fixação do suporte de madeira tendo o cuidado de reduzir ao mínimo a perfuração do isolamento.
- Fixação da caixilharia no suporte de madeira na zona intermédia da parede.
- No caso do peitoril ser em pedra natural, executar a camada de colagem e de pendente deixando um espaço entre a caixilharia/peitoril e entre o peitoril/pano exterior para posterior execução da junta de encontro. Se o peitoril for metálico, acima da camada de colagem e de pendente é aplicada uma placa XPS e posteriormente é aparafusado o peitoril à conforme a representação da Figura 72.
- Vedação das juntas de encontro das interfaces referidas no último passo para impedir possíveis infiltrações e condensações, através de mástique e cordão de fundo de junta.
- O bordo de gotejamento do peitoril deve ser afastado pelo menos 30 mm em relação à superfície da parede acabada. O peitoril de pedra deve conter rasgos na parte superior para fazer escoar a água evitando o contacto permanente com a caixilharia.
- Revestimento do peitoril interior.

### **Resultados:**

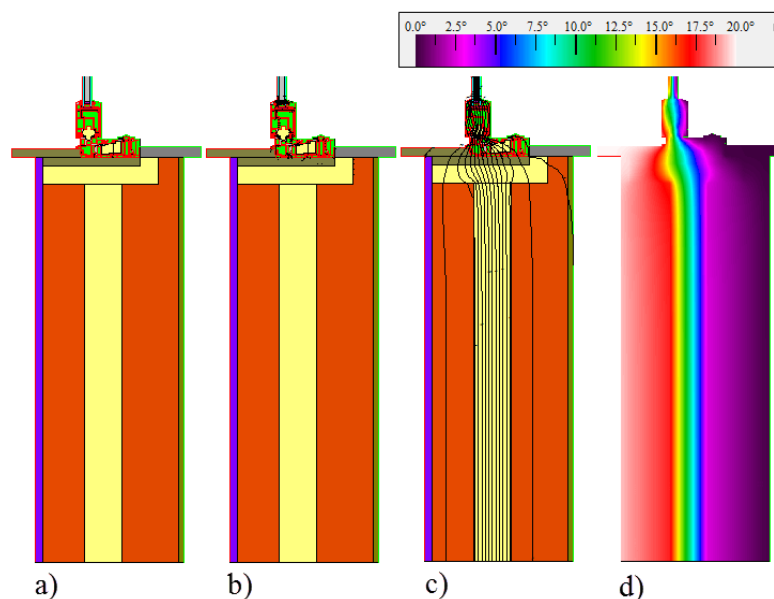


Figura 73. Resultados Therm da ligação fachada (parede dupla)/peitoril em pedra: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,020 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,997 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

$$\Psi_i = 0,020 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,997 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

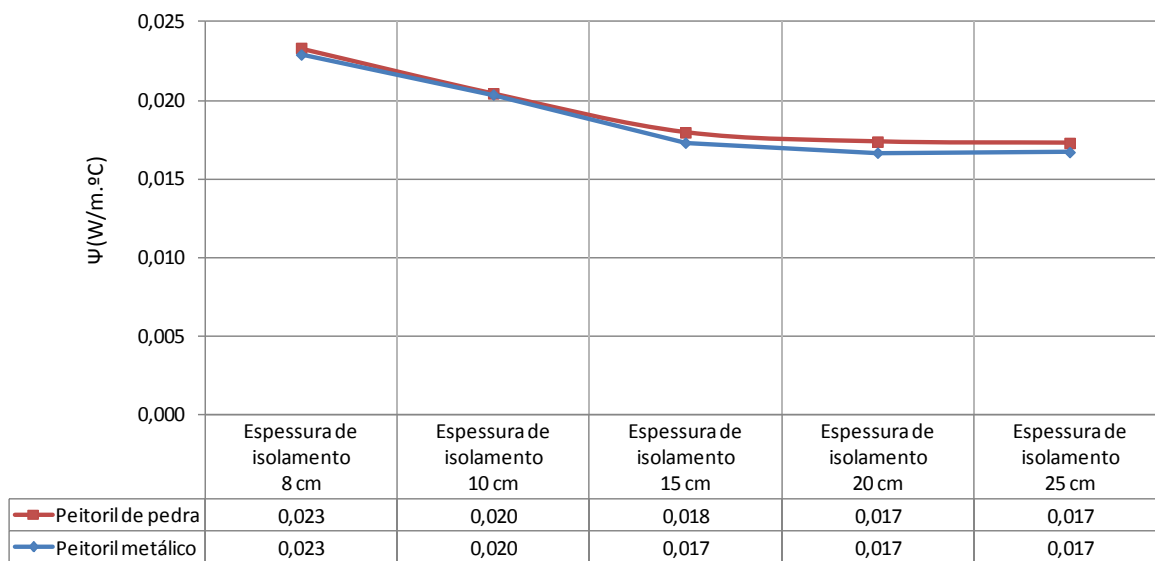


Figura 74. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento térmico da parede exterior dupla e do tipo de peitoril

### 4.3.7. Ligações fachada/ombreira

#### 4.3.7.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

##### Representação:

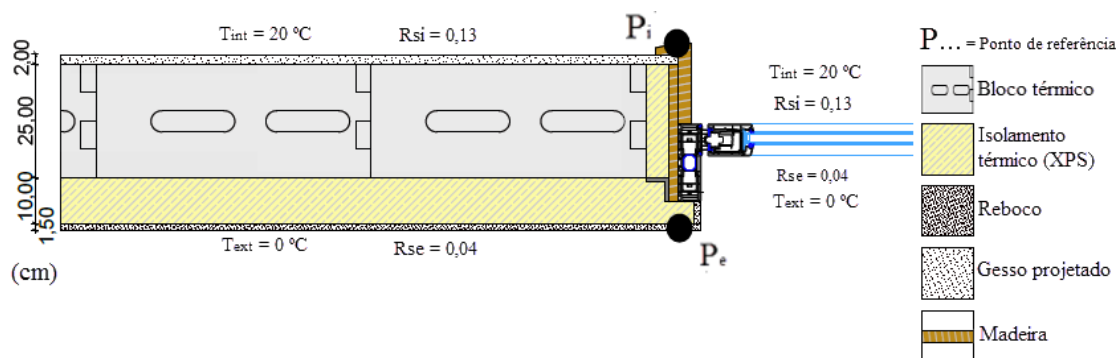


Figura 75. Ligação fachada (parede simples)/ombreira

##### Descrição:

O pormenor representa a ligação da ombreira com a respetiva janela numa parede de fachada com sistema de isolamento pelo exterior. A modelação numérica conjuga a ligação com ou sem isolamento da caixilharia da janela, podendo-se ver as semelhanças entre ambos os casos (ver Figura 78). A construção desta ligação pretende dar continuidade ao isolamento evitando o contacto da caixilharia com a ombreira. A caixilharia é aplicada, o mais próximo possível da posição intermédia e na continuidade do isolamento da parede.

##### Processo construtivo:

- Execução das paredes exteriores seguindo o procedimento de construção nas soluções construtivas deixando a abertura da janela na parede.
- Injeção de espuma isolante na superfície da ombreira da parede e posterior fixação do suporte de madeira tendo o cuidado de reduzir ao mínimo a perfuração do isolamento.
- Fixação da caixilharia no suporte de madeira na posição intermédia.
- Procedimento de execução de isolamento pelo exterior mencionado anteriormente nas soluções construtivas. A colocação do isolamento que sobrepõe a caixilharia deve fazer parte da mesma placa de isolamento da parede, evitando-se assim a instabilidade que ocorreria ao ter-se um elemento de isolamento independente da camada de isolamento da parede.
- Vedação da junta de remate de placa isolante com caixilho em mastique de poliuretano para impedir possíveis infiltrações e condensações na interface da caixilharia e da sobreposição.

- Aplicação de perfil de janela em PVC com rede permitindo um remate perfeito entre os revestimentos e a caixilharia (ver Figura 76) (Weber, 2013).



Figura 76. Perfil de janela (Fonte: Weber, 2013)

- Revestimento da ombreira interior em madeira.

### Resultados:

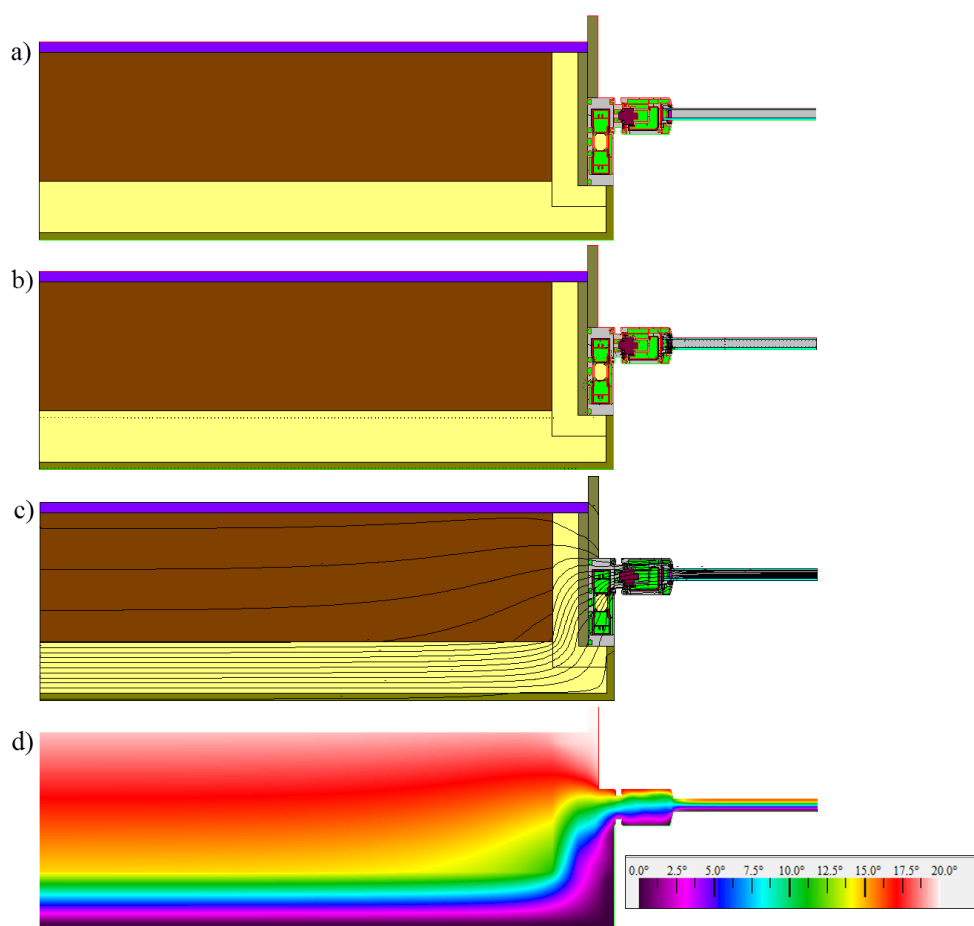


Figura 77. Resultados Therm da ligação fachada (parede simples)/ombreira: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\psi_e = 0,083 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 1,069 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

$$\psi_i = 0,083 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 1,069 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$



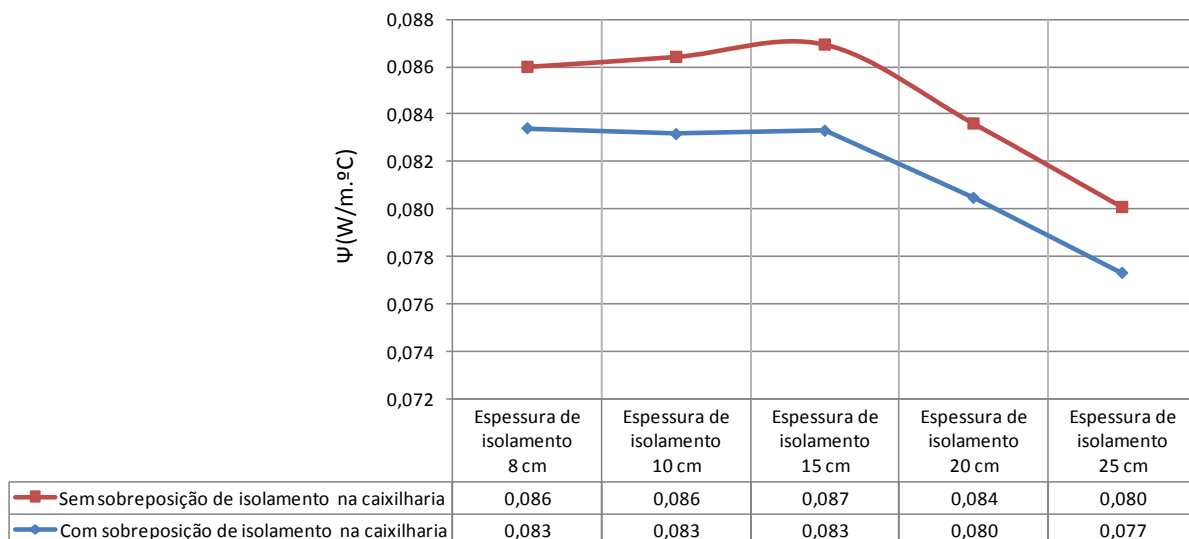


Figura 78. Influência da sobreposição do isolamento na caixilharia e variação da espessura de isolamento da parede no valor de  $\Psi_e$

4.3.7.2. Parede exterior (dupla)

**Representação:**

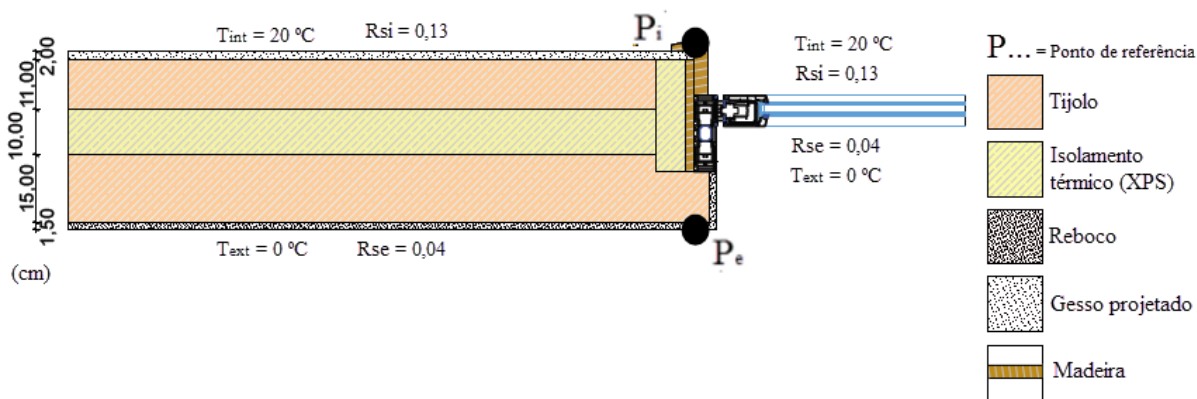


Figura 79. Ligação fachada (parede dupla)/ombreira

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação da ombreira com a respetiva janela numa parede dupla com cavidade totalmente preenchida com isolamento. A modelação numérica conjuga a ligação com ou sem sobreposição da caixilharia, podendo-se ver as semelhanças entre ambos os casos (ver Figura 81). A construção desta ligação pretende dar continuidade ao isolamento evitando o contacto da caixilharia com a ombreira. A caixilharia é aplicada o mais próximo possível da posição intermédia e na continuidade do isolamento da parede.

**Processo construtivo:**

- Execução das paredes exteriores seguindo o procedimento de construção nas soluções construtivas deixando a abertura da janela na parede e abas para sobreposição.
- Injeção de espuma isolante na superfície da ombreira da parede e posterior fixação do suporte de madeira tendo o cuidado de reduzir ao mínimo a perfuração do isolamento.
- Fixação da caixilharia no suporte de madeira na posição intermédia.
- Vedação da junta de remate de placa isolante com caixilho em mastique de poliuretano para impedir possíveis infiltrações e condensações na interface da caixilharia e da sobreposição.
- Revestimento da ombreira interior em madeira.

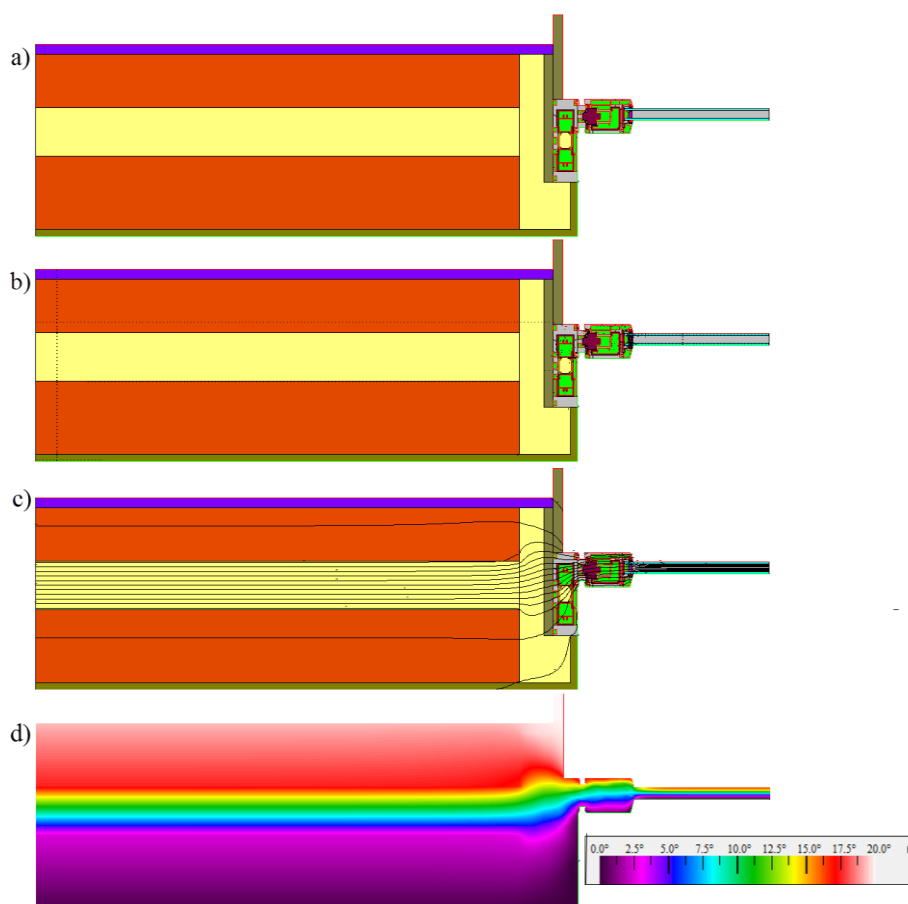
**Resultados:**

Figura 80. Resultados Therm da ligação fachada (parede dupla)/ombreira: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,068 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad L^{2D} = 1,065 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\Psi_i = 0,068 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad L^{2D} = 1,065 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

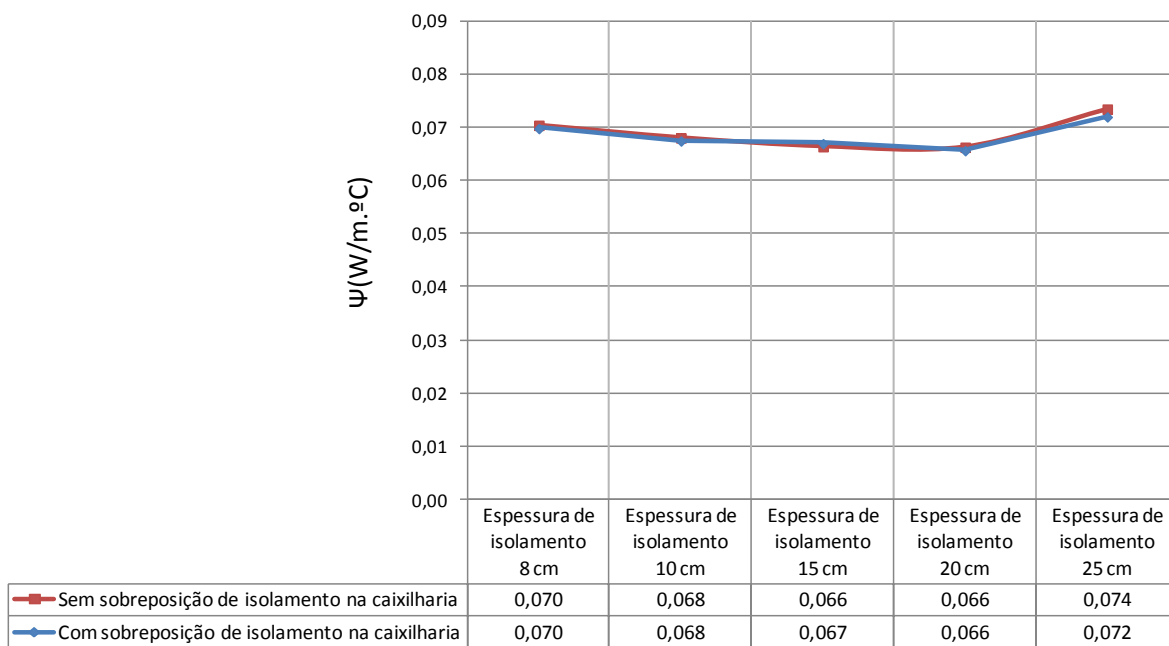


Figura 81. Influência da sobreposição do isolamento na caixilharia e variação da espessura de isolamento da parede dupla no valor de  $\Psi_e$

## 4.3.8. Ligação de fachada com varanda

## 4.3.8.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

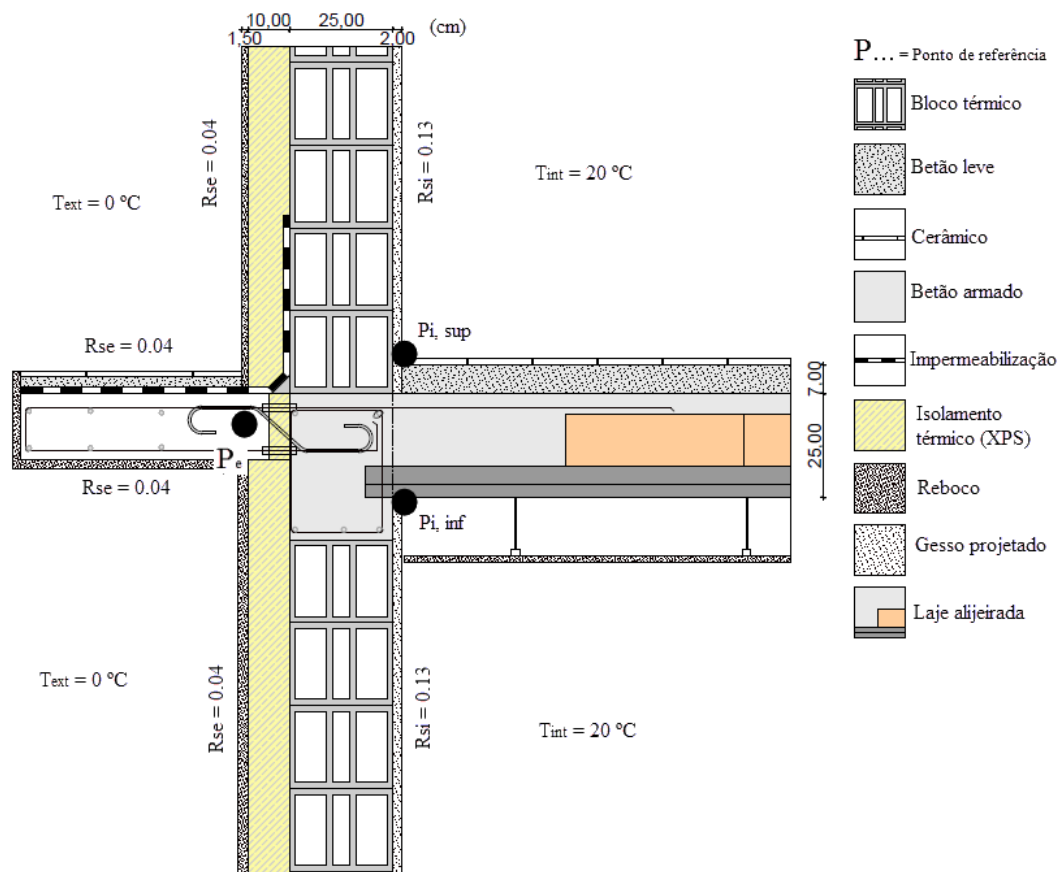
**Representação:**

Figura 82. Ligação de fachada (parede simples) com varanda

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação parede de fachada com sistema de isolamento pelo exterior com uma consola. Este tipo de detalhe é muito comum nos edifícios com varandas e apresenta um dos maiores problemas ao nível das pontes térmicas pela dificuldade de garantir a continuidade da camada de isolamento. O pormenor apresenta a interposição duma solução de corte térmico Isolan MV da Ancon (ver Anexo D), concedendo ao detalhe construtivo a continuidade da camada de isolamento. Apesar deste elemento não apresentar espessuras superiores a 6cm, outro fabricante de materiais oferece soluções de corte térmico com espessura superior (e.g. Schock Isokorb).

A modelação numérica conjuga diferentes espessuras de isolamento da parede com a espessura do elemento de corte térmico (ver Figura 84).

**Processo construtivo:**

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas, lajes e consola).
- Armação de vigas, lajes e consola, inclusive do elemento de corte térmico de acordo com as especificações do fabricante (ver Anexo D).
- Betonagem de todos os elementos estruturais.
- Execução das paredes exteriores.
- Proceder à colocação do isolamento das paredes conforme as instruções referidas anteriormente nas soluções construtivas.
- Aconselha-se a impermeabilização da interface do isolamento e da parede exterior e de todo o comprimento da consola, visando a proteção contra infiltrações de água para dentro do edifício.

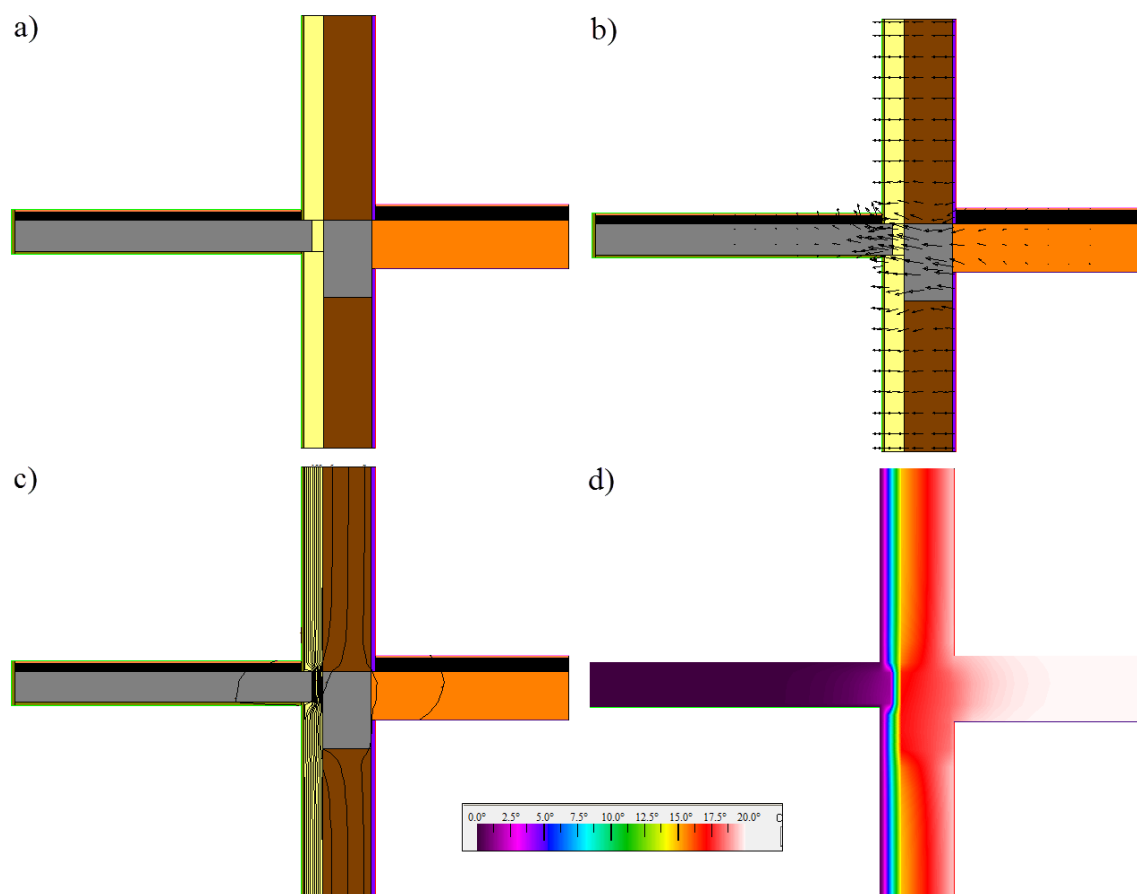
**Resultados:**

Figura 83. Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com varanda: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,092 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)} \quad L^{2D} = 0,656 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,177 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)} \quad L^{2D} = 0,656 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$$

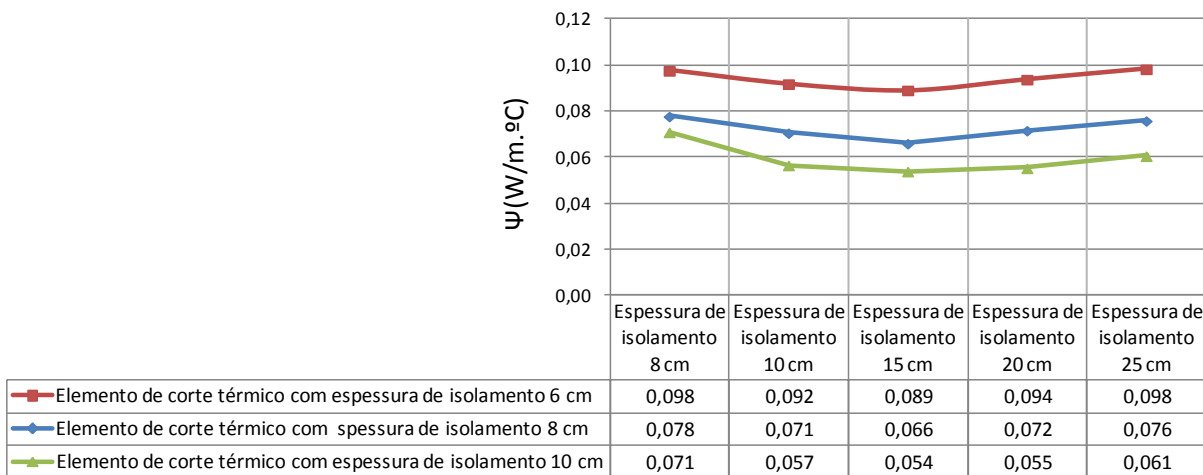


Figura 84. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento térmico da parede exterior e do elemento de corte térmico

### 4.3.8.2. Parede exterior (dupla)

#### Representação:

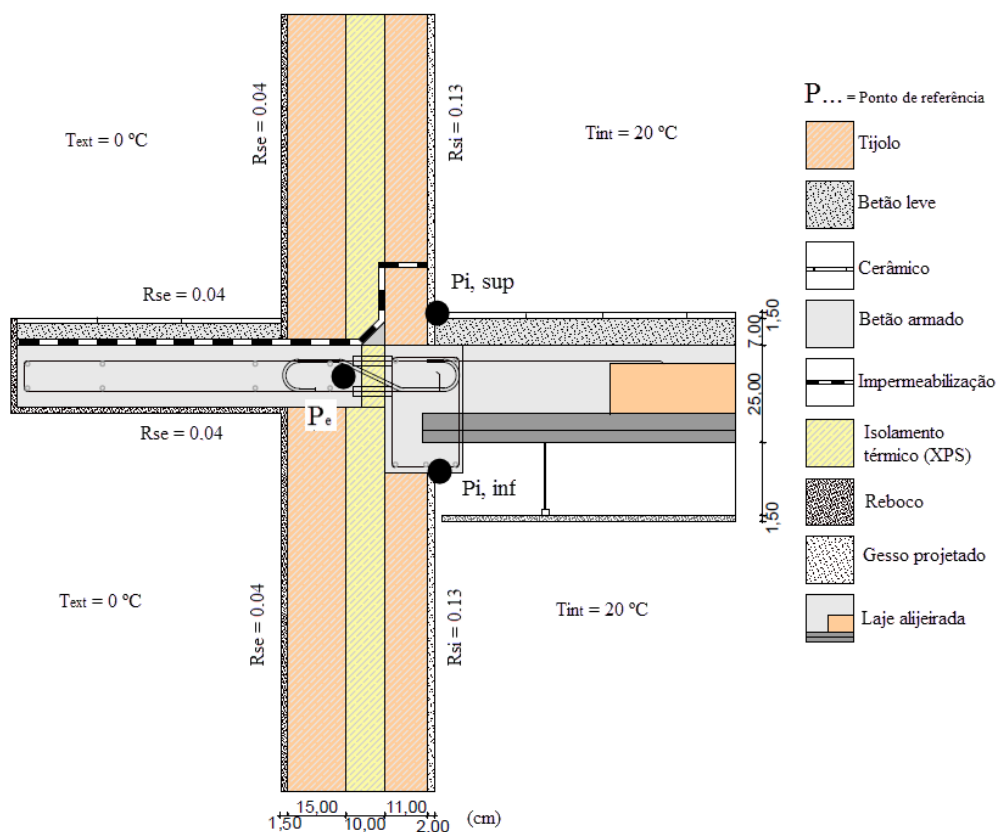


Figura 85. Ligação de fachada (parede dupla) com varanda

#### Descrição:

O pormenor representa a ligação parede de fachada dupla com cavidade totalmente preenchida com isolamento e uma consola. Este tipo de detalhe é muito comum nos edifícios

com varandas e apresenta um dos maiores problemas ao nível das pontes térmico pela dificuldade de garantir a camada de isolamento contínua. O pormenor apresenta a interposição duma solução de corte térmico Isolan MV da Ancon (ver Anexo D), concedendo ao detalhe construtivo a continuidade da camada de isolamento. Apesar deste elemento não apresentar espessuras superiores a 6cm, outro fabricante de materiais oferece soluções de corte térmico com espessura superior (e.g. Schock Isokorb).

A modelação numérica conjuga diferentes espessuras de isolamento da parede com a espessura do elemento de corte térmico (ver Figura 87).

### **Processo construtivo:**

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas, lajes e consola).
- Armação de vigas, lajes e consola, inclusive do elemento de corte térmico de acordo com as especificações do fabricante (ver Anexo D).
- Betonagem de todos os elementos estruturais.
- Execução das paredes exteriores procedendo de acordo as instruções referidas anteriormente nas soluções construtivas para a construção de paredes duplas.
- Aconselha-se a impermeabilização da consola em todo o seu comprimento, visando a proteção contra infiltrações de água para dentro do edifício (ver Figura 85).

### **Resultados:**

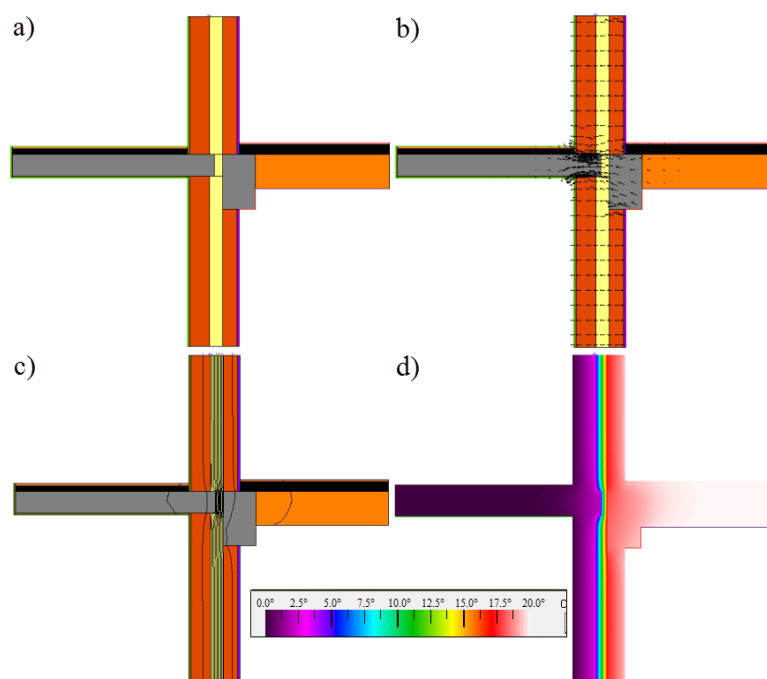


Figura 86. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com varanda: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,083 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,716 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

$$\Psi_i = 0,202 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,716 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

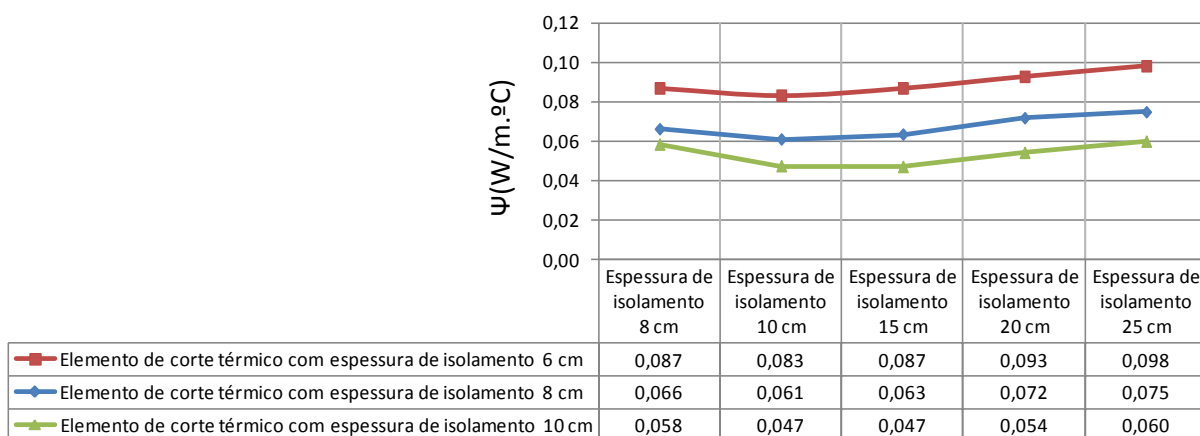


Figura 87. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espeçsura de isolamento térmico da parede exterior dupla e do elemento de corte térmico



### 4.3.9. Ligação de fachada com pavimentos intermédios

#### 4.3.9.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

##### Representação:

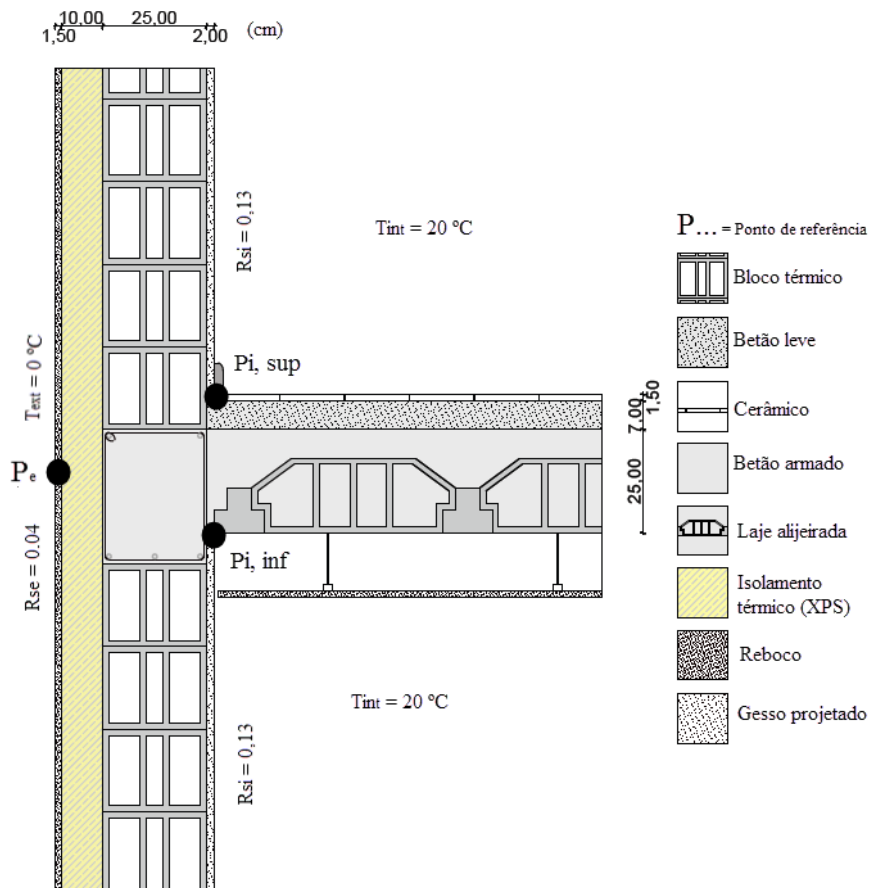


Figura 88. Ligação de fachada (parede simples) com pavimentos intermédios

##### Descrição:

O pormenor representa a ligação parede de fachada com sistema de isolamento pelo exterior com laje que divide dois espaços úteis (aquecidos). Na modelação numérica consta a variação da espessura de isolamento da parede (ver Figura 90).

##### Processo construtivo:

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas e lajes).
- Armação de vigas, lajes e posterior betonagem destes elementos.
- Execução das paredes exteriores com isolamento pelo exterior conforme mencionado anteriormente nas soluções construtivas.
- Revestimento das lajes interiores conforme mencionado anteriormente nas soluções construtivas.

**Resultados:**

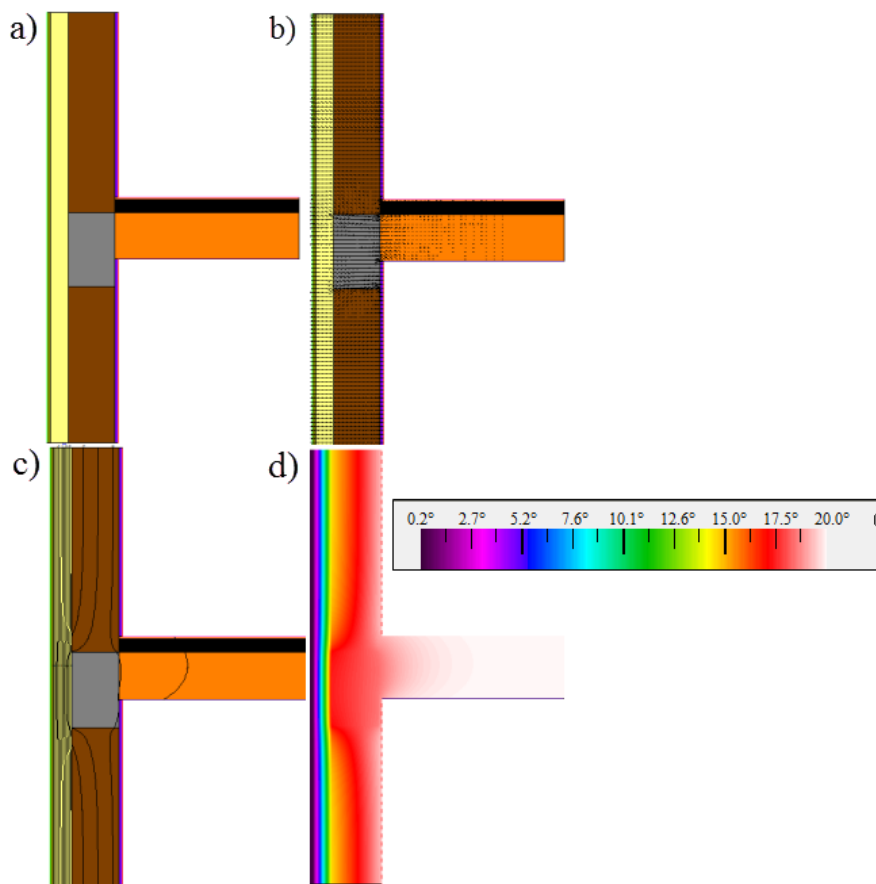


Figura 89. Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com pavimentos intermédios: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,057 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)} \quad L^{2D} = 0,648 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,142 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)} \quad L^{2D} = 0,648 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$$



Figura 90. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior

4.3.9.2. Parede exterior (dupla)

**Representação:**

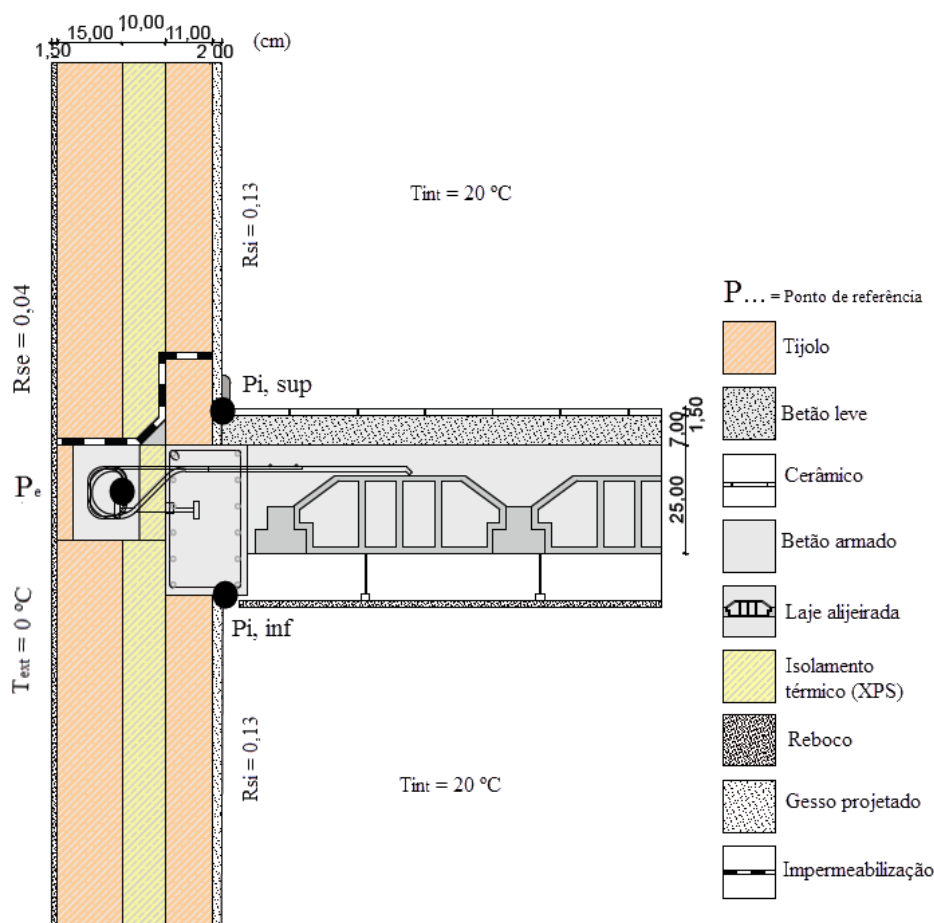


Figura 91. Ligação de fachada (parede dupla) com pavimentos intermédios

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação de parede de fachada dupla com cavidade totalmente preenchida com isolamento e a laje que divide dois espaços úteis (aquecidos). Na modelação numérica efetuou-se a variação da espessura de isolamento da parede e a espessura do elemento de corte térmico (ver Figura 93). O pormenor apresenta uma solução de corte térmico da Schock Isokorb tipo O (ver Anexo C), concedendo ao detalhe construtivo a continuidade da camada de isolamento no encontro da laje com a parede exterior.

**Processo construtivo:**

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas e lajes) tendo em conta a saliência da laje devido ao corte térmico da laje.

- Armação de vigas, lajes e em conjunto inclui-se o elemento de corte térmico (ver Anexo C) e consequente betonagem.
- Execução das paredes exteriores, procedendo à construção de paredes duplas como mencionado anteriormente nas soluções construtivas, garantindo a continuidade do isolamento no encontro do elemento de corte térmico e o isolamento da parede exterior.
- Revestimento das lajes interiores conforme mencionado anteriormente nas soluções construtivas.

### Resultados:

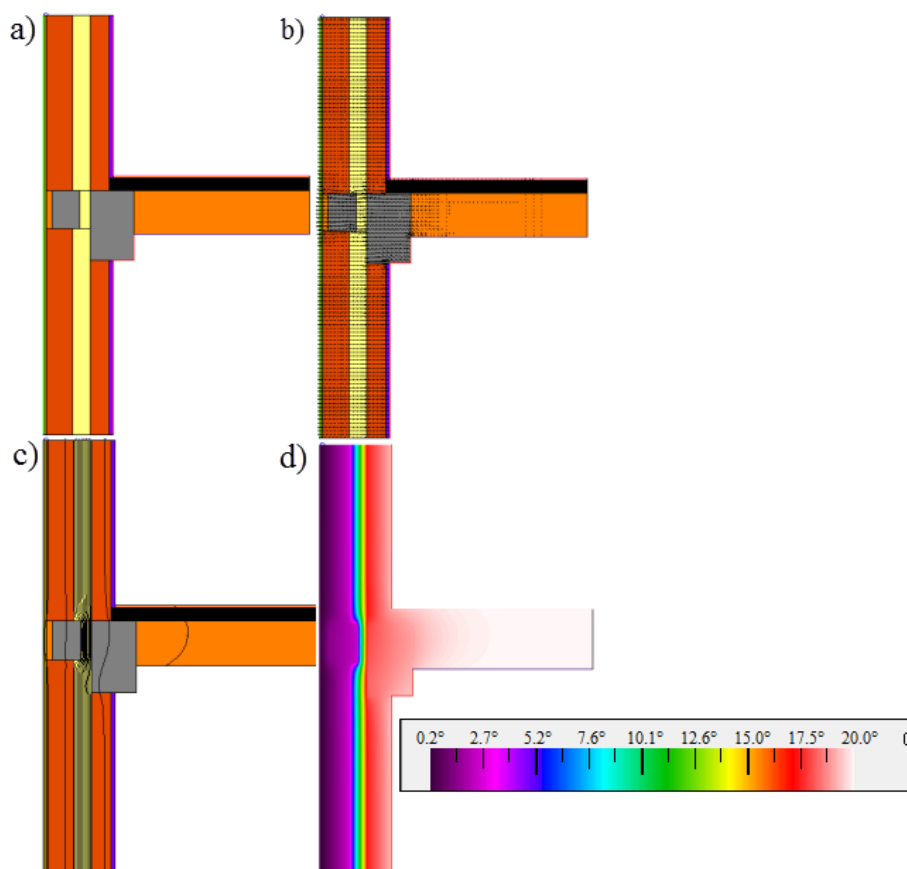


Figura 92. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com pavimentos intermédios: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,091 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)} \quad L^{2D} = 0,724 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,219 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)} \quad L^{2D} = 0,724 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$$

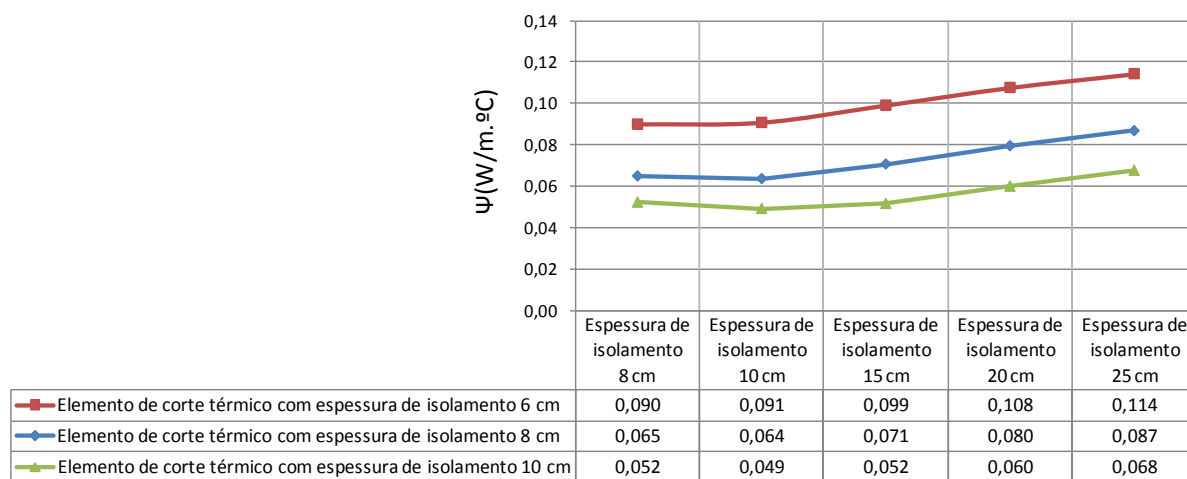


Figura 93. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior (dupla) e do elemento de corte térmico

## 4.3.10. Ligação de fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos

## 4.3.10.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

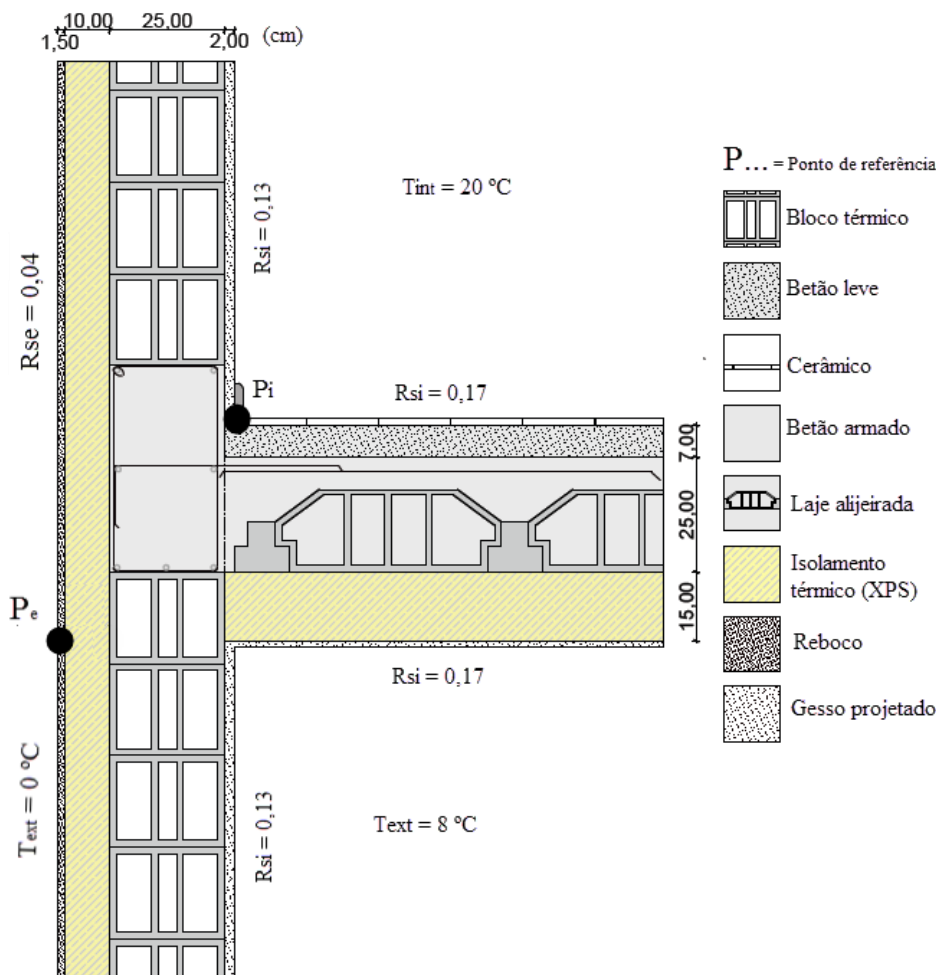
**Representação:**

Figura 94. Ligação de fachada (parede simples) com pavimentos sobre locais não aquecidos

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação parede de fachada com sistema de isolamento pelo exterior com laje interior que divide dois espaços. Um espaço é útil (aquecido) e outro é um espaço não útil (sem aquecimento). A modelação numérica conjuga a variação da espessura de isolamento da parede e a variação da espessura de isolamento da laje que separa os dois espaços, estando o isolamento colocado na parte inferior da laje (ver Figura 96). Este tipo de pormenor é adequado à presença de espaços não aquecidos e geralmente ventilados, e.g. garagem, cave, etc. Estes espaços geralmente não estão localizados dentro da envolvente térmica dos edifícios.

**Processo construtivo:**

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas e lajes).
- Armação de vigas, lajes e posterior betonagem destes elementos.
- Execução das paredes exteriores e proceder à construção das paredes exteriores com isolamento pelo exterior conforme mencionado anteriormente nas soluções construtivas.
- Revestimento das lajes interiores com isolamento conforme mencionado anteriormente nas soluções construtivas.

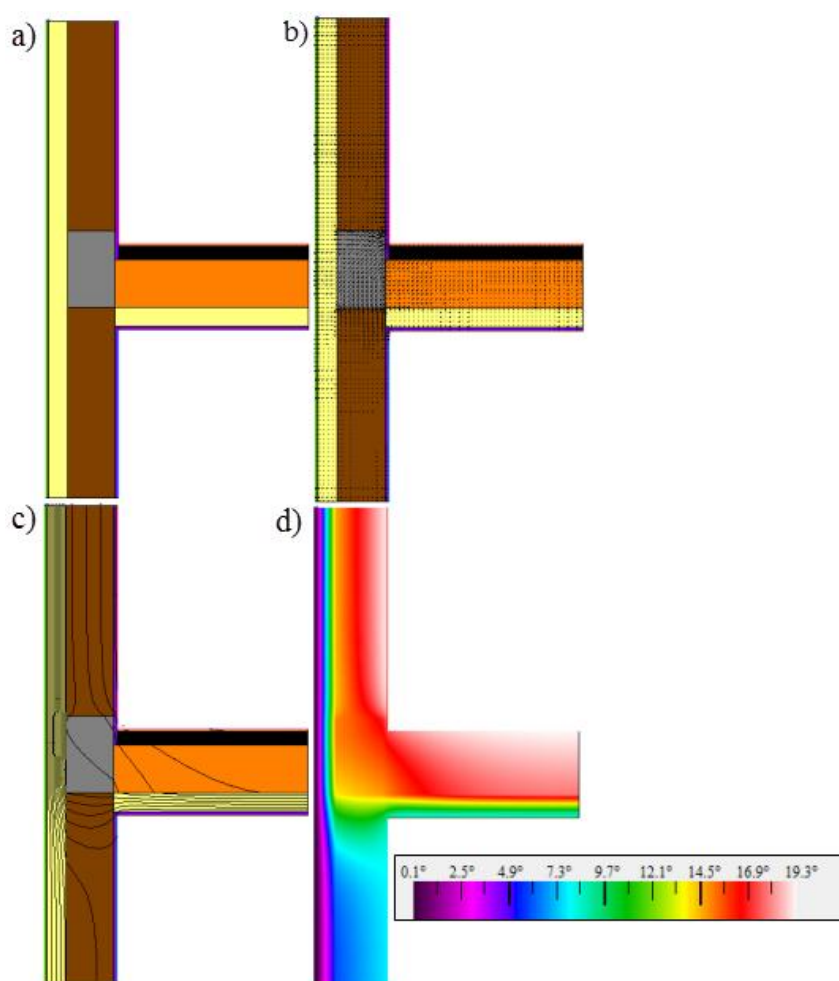
**Resultados:**

Figura 95. Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com pavimentos sobre locais não aquecidos: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = -0,166 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 0,534 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,033 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 0,534 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

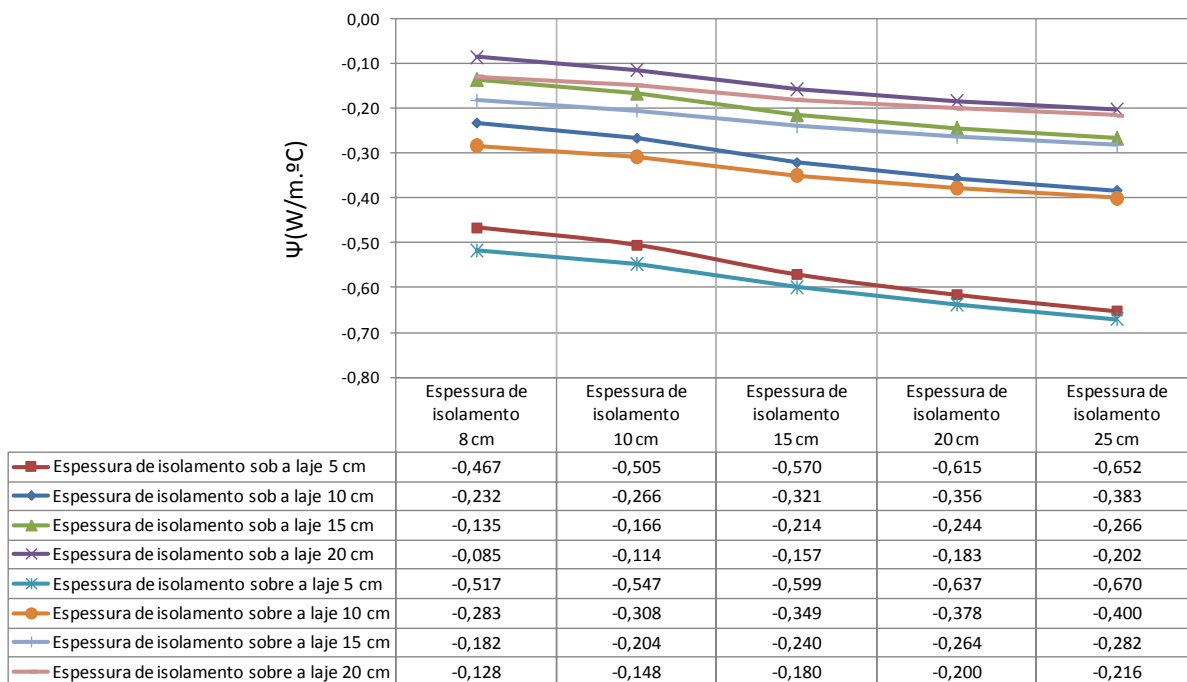


Figura 96. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e da laje interior

4.3.10.2.Parede exterior (dupla)

Representação:

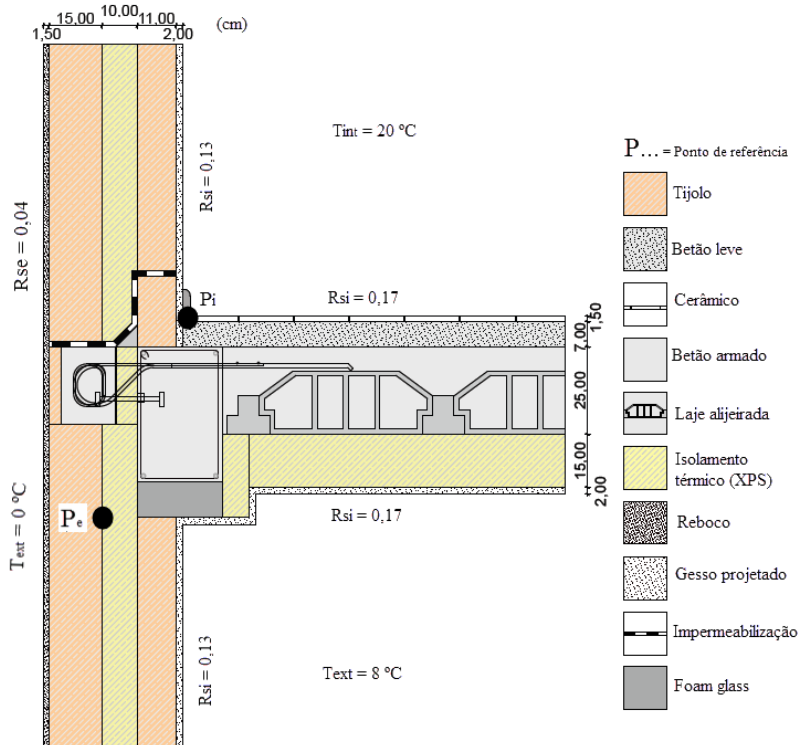


Figura 97. Ligação de fachada (parede dupla) com pavimentos sobre locais não aquecidos



**Descrição:**

O pormenor representa a ligação de parede de fachada dupla com cavidade totalmente preenchida com isolamento e a laje que divide dois espaços. Um espaço é útil (aquecido) e outro é um espaço não útil (sem aquecimento). A modelação numérica conjuga a variação da espessura de isolamento da parede e a variação da espessura de isolamento da laje que separa os dois espaços, estando o isolamento colocado na parte inferior da laje (ver Figura 99). O pormenor apresenta a interposição duma solução de corte térmico da Schock Isokorb tipo O (ver Anexo C), concedendo ao detalhe construtivo a continuidade da camada de isolamento no encontro da laje com a parede exterior. Este tipo de pormenor é adequado à presença de espaços não aquecidos e geralmente ventilados, e.g. garagem, cave, etc. Estes espaços geralmente não estão localizados dentro da envolvente térmica dos edifícios.

**Processo construtivo:**

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas e lajes) tendo em conta a saliência da laje devido ao elemento de corte térmico.
- Armação de vigas, lajes e em conjunto inclui-se o elemento de corte térmico (ver Anexo C) e consequente betonagem.
- Execução das paredes exteriores e proceder à construção de paredes duplas como mencionado anteriormente nas soluções construtivas, garantindo a continuidade do isolamento no encontro do elemento de corte térmico e o isolamento da parede exterior. No fecho superior da parede interior é aplicado na última fiada de tijolo um elemento com resistência à compressão (e.g. foam glass) de continuidade de isolamento da laje.
- Revestimento das lajes interiores com isolamento conforme mencionado anteriormente nas soluções construtivas.

**Resultados:**

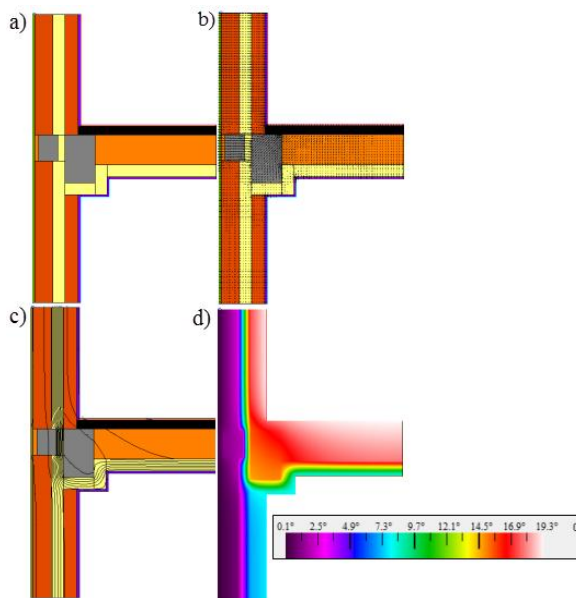


Figura 98. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com pavimentos sobre locais não aquecidos: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = -0,119 \text{ W/(m}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,533 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$$

$$\Psi_i = 0,062 \text{ W/(m}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,533 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$$

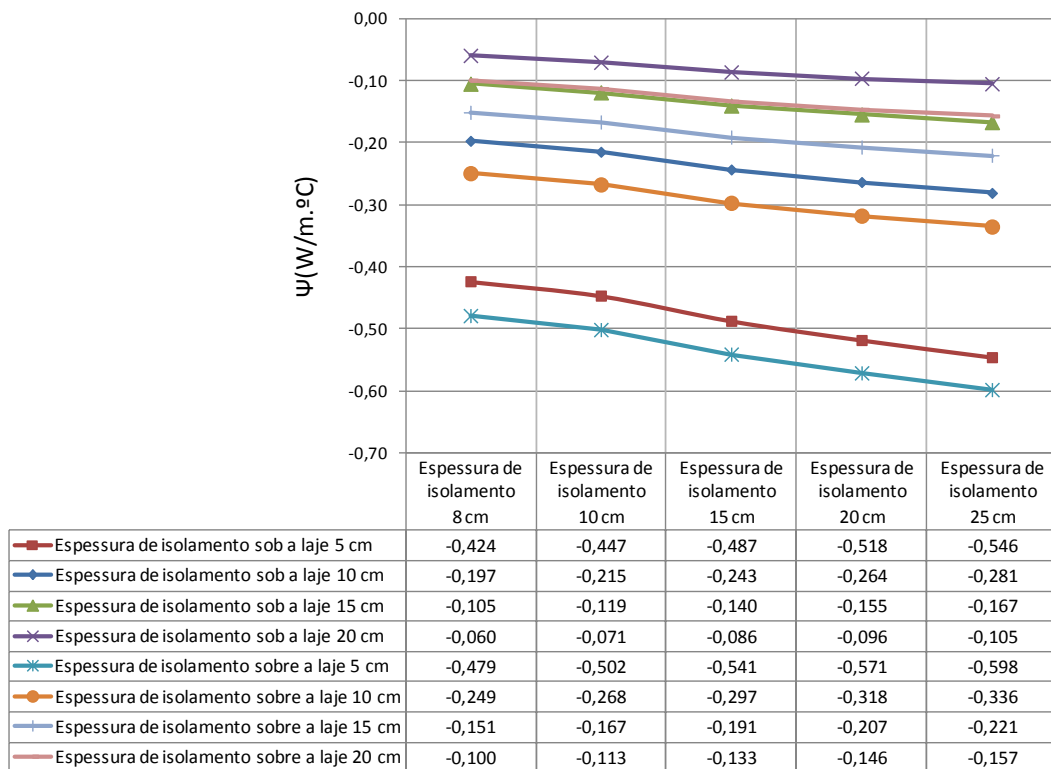


Figura 99. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior (dupla) e da laje interior

### 4.3.11. Ligação de paredes interiores com pavimentos sobre locais não aquecidos

#### Representação:

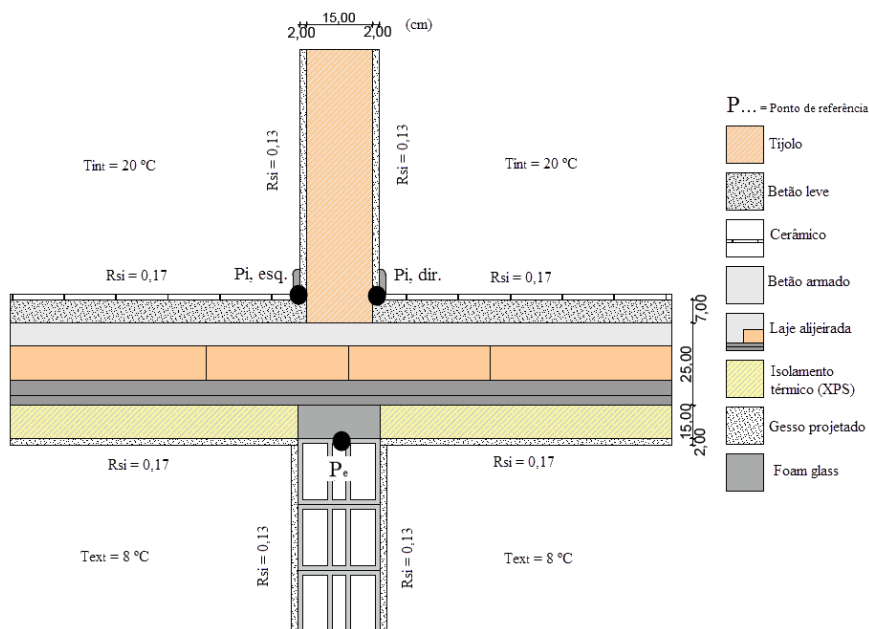


Figura 100. Ligação de paredes interiores com pavimentos sobre locais não aquecidos

#### Descrição:

O pormenor representa a ligação entre paredes interiores e lajes de pavimento que dividem dois espaços. Um espaço é útil (aquecido) e outro é um espaço não útil (sem aquecimento). A modelação numérica conjuga a variação da espessura de isolamento da laje que separa os dois espaços, considerando o isolamento colocado na parte inferior, superior e em ambos os lados da laje (ver Figura 102). Este tipo de pormenor insere-se na presença de espaços não aquecidos e geralmente ventilados, e.g. garagem, cave, etc. Este tipo de espaços geralmente não estão localizados dentro da envolvente térmica dos edifícios.

#### Processo construtivo:

- Quando o isolamento é colocado sob a laje, executam-se as paredes interiores na parte inferior da laje, colocando entre a laje e a última fiada um elemento com resistência à compressão (e.g. foam glass), que concede a continuidade de isolamento da laje (conforme representado na Figura 100). O mesmo é feito quando o isolamento é colocado sobre a laje, mas com o elemento que confere a continuidade de isolamento da laje na primeira fiada da parede interior. Quando o isolamento é aplicado em ambos os lados o processo construtivo será a conjugação de ambas as situações anteriores.

**Resultados:**

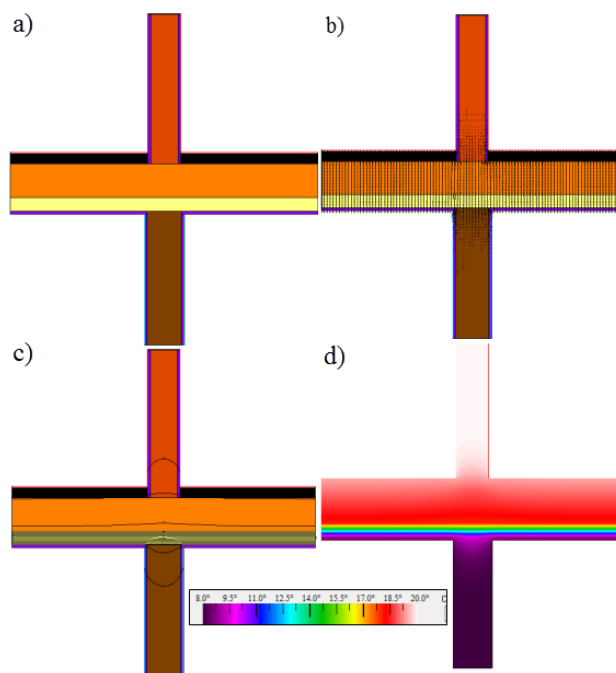


Figura 101. Resultados Therm da ligação de paredes interiores com pavimentos sobre locais não aquecidos: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = -0,004 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,457 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

$$\Psi_i = 0,046 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,457 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

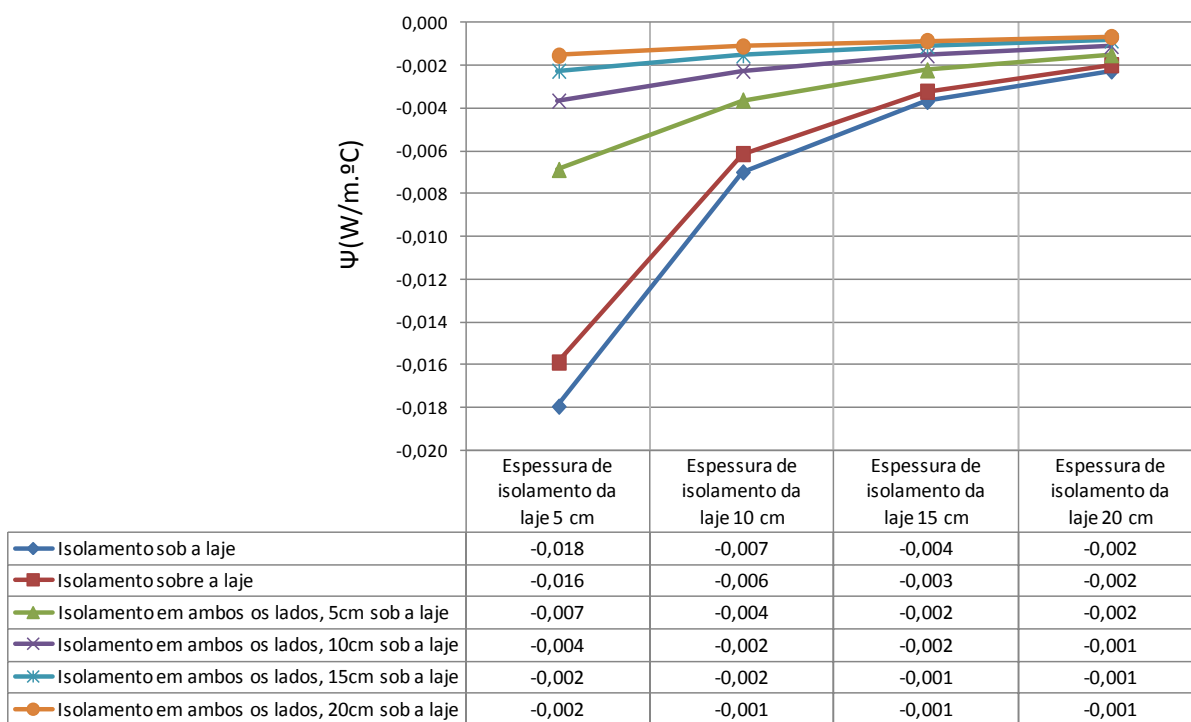


Figura 102. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento na laje interior

## 4.3.12. Ligação entre duas paredes verticais (cunhal)

## 4.3.12.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

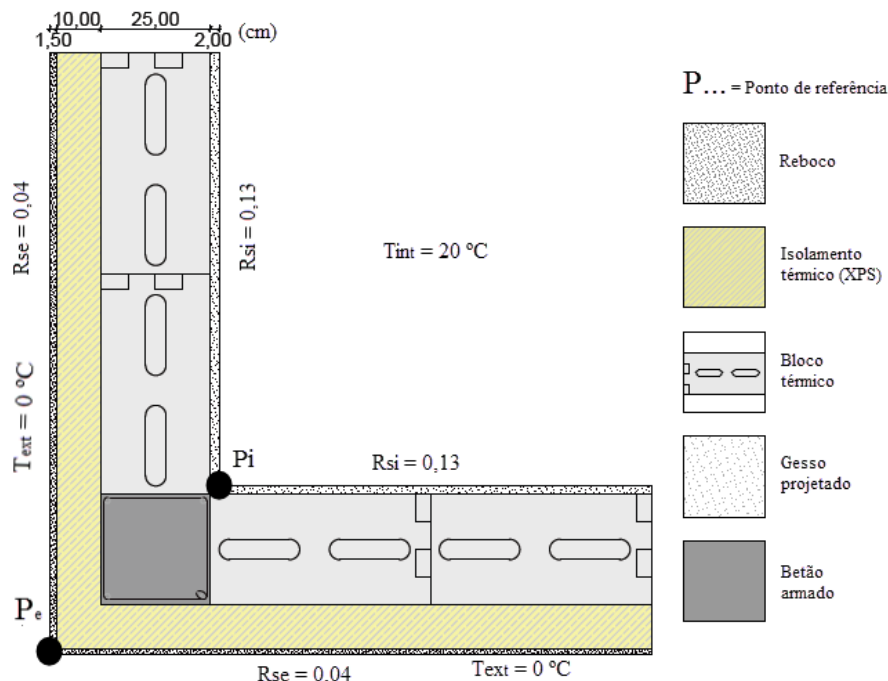
**Representação:**

Figura 103. Ligação entre duas paredes simples verticais (cunhal)

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação entre duas paredes exteriores com isolamento pelo exterior, com a interposição de um pilar de betão armado. Na modelação numérica consta a variação da espessura de isolamento das paredes exteriores (ver Figura 105).

**Processo construtivo:**

- Execução das paredes exteriores fazendo coincidir a face exterior das paredes com as faces exteriores do pilar.
- Aplicação do isolamento exterior seguindo as disposições mencionadas anteriormente nas soluções construtivas para paredes com isolamento pelo exterior, tendo o cuidado no encontro do isolamento na aresta do pilar de garantir o confinamento das placas dispondo as juntas desencontradas (ver Figura 34).

**Resultados:**

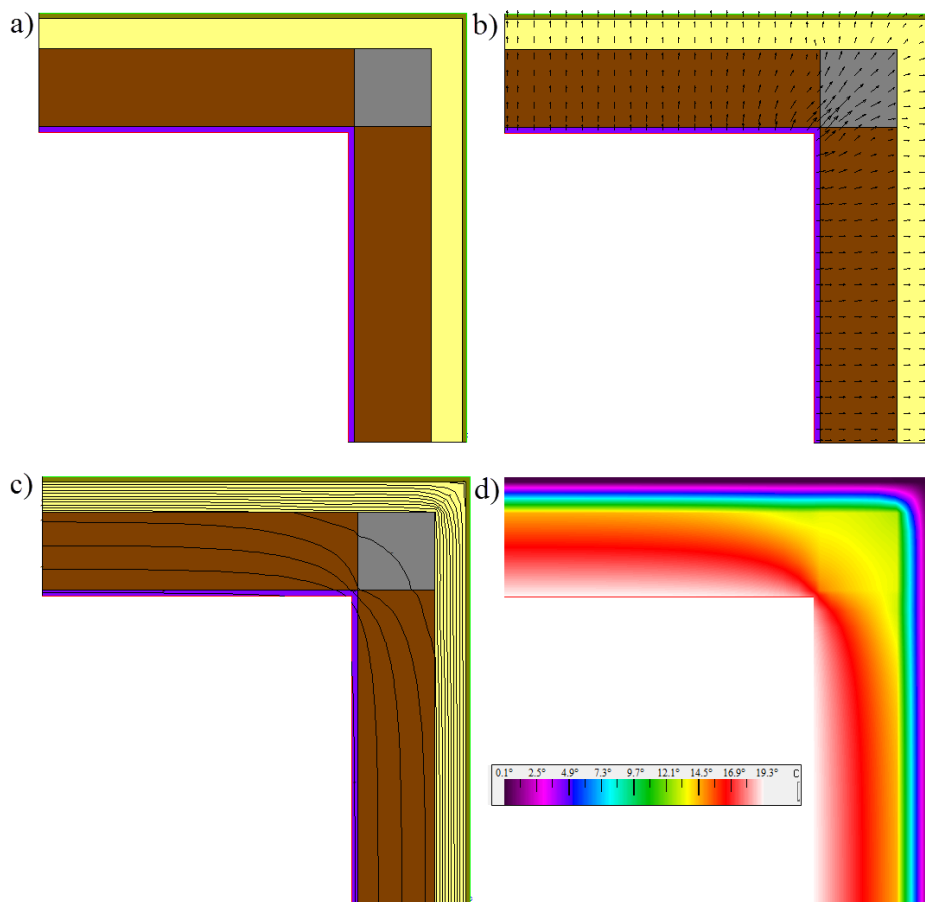


Figura 104. Resultados Therm da ligação entre duas paredes simples verticais (cunhal) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = - 0,042 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,659 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

$$\Psi_i = 0,152 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,659 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

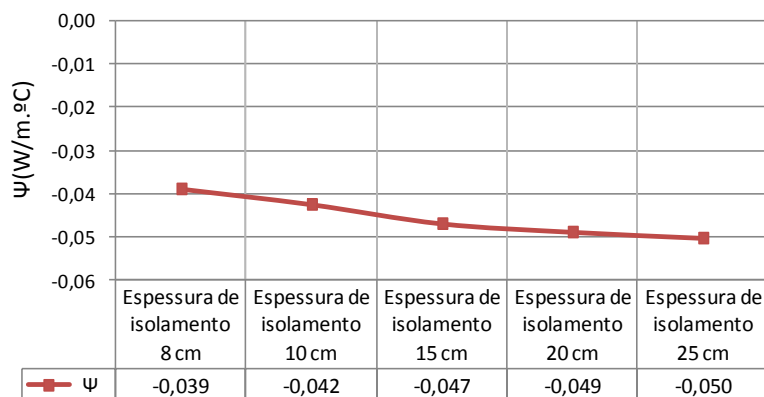


Figura 105. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento das paredes exteriores

## 4.3.12.2. Parede exterior (dupla)

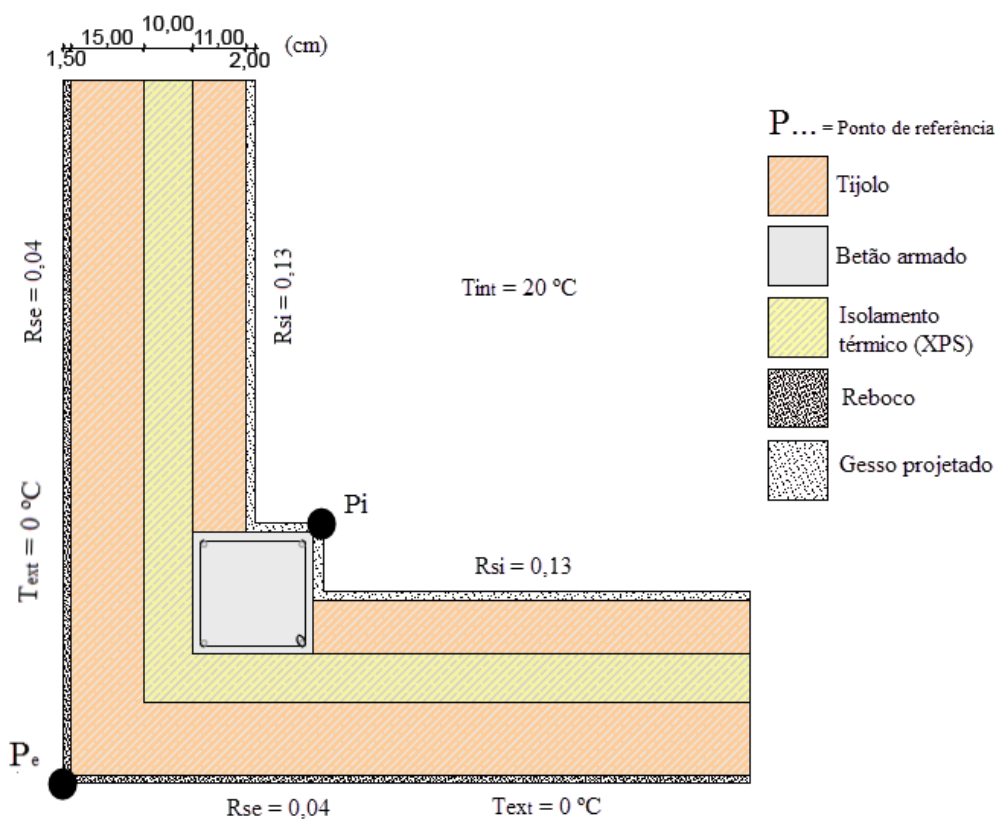
**Representação:**

Figura 106. Ligação entre duas paredes duplas verticais (cunhal)

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação entre duas paredes duplas de fachada com cavidade totalmente preenchida de isolamento e com a interposição de um pilar de betão armado. Na modelação numérica consta a variação da espessura de isolamento das paredes exteriores (ver Figura 108).

**Processo construtivo:**

- Execução das paredes exteriores fazendo coincidir a face exterior do pano interior com as faces exteriores do pilar, garantindo um total recobrimento de isolamento nestas zonas “frias”.
- Execução de paredes seguindo as disposições mencionadas anteriormente nas soluções construtivas para paredes duplas.

**Resultados:**

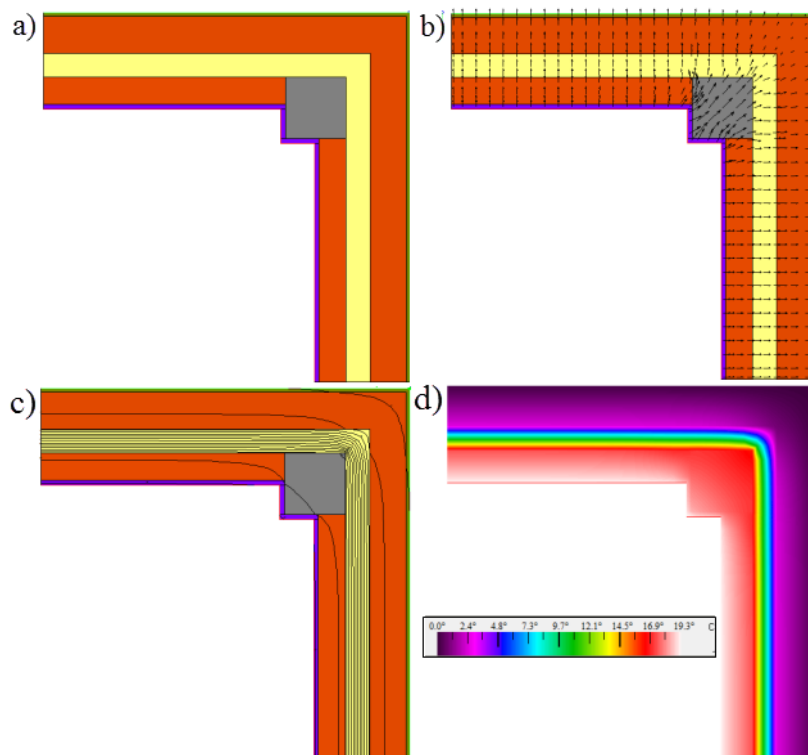


Figura 107. Resultados Therm da ligação entre duas paredes duplas verticais (cunhal) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = -0,094 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 0,705 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,188 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 0,705 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

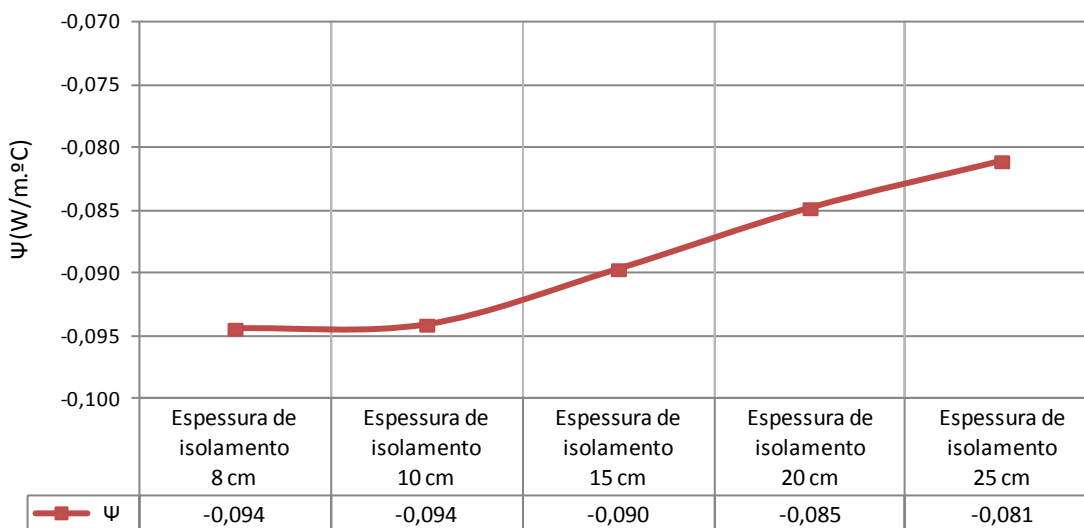


Figura 108. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento das paredes exteriores duplas



## 4.3.13. Ligação de fachada com cobertura plana (sem platibanda)

## 4.3.13.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

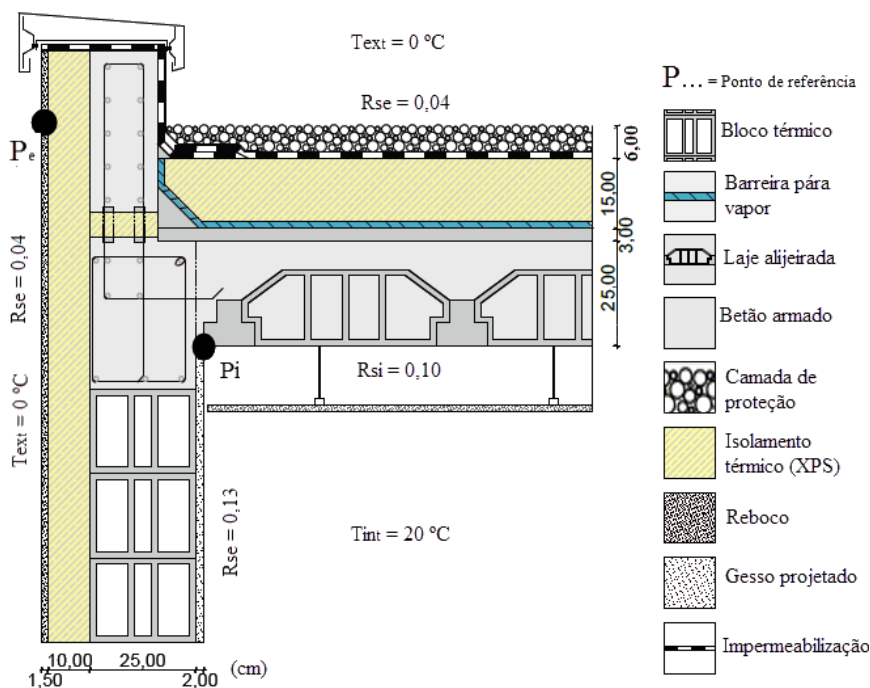
**Representação:**

Figura 109. Ligação de fachada (parede simples) com cobertura plana (sem platibanda)

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação de uma cobertura plana não acessível a uma parede de fachada com sistema de isolamento pelo exterior. A modelação numérica contempla a conjugação de diferentes espessuras de isolamento na parede e na cobertura (ver Figura 111). O pormenor apresenta a interposição duma solução de corte térmico Isolan FD da Ancon (ver Anexo E), concedendo ao detalhe construtivo a continuidade da camada de isolamento.

**Processo construtivo:**

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas e lajes).
- Armação de vigas, lajes e posterior betonagem destes elementos. No processo de betonagem são deixadas armaduras de continuidade para o desenvolvimento do rebordo da laje.
- Colocação do elemento de corte térmico em conjunto com a armação do bordo maciço e conseqüente betonagem.
- Execução das paredes exteriores de acordo com execução de paredes exteriores com isolamento pelo exterior como referido anteriormente nas soluções construtivas.

- Procedimento de construção de cobertura plana invertida ou tradicional (não acessível) como mencionado anteriormente nas soluções construtivas, tendo especial atenção aos cuidados que este processo deve apresentar na colocação das camadas dos elementos que compõem a cobertura, nomeadamente os pontos singulares.
- Nos pontos singulares deve-se prevenir o descolamento, o rasgamento ou fissuração de remates do rebordo maciço. Como solução para estes pontos singulares, o ângulo entre a cobertura e a superfície vertical do rebordo da laje deve ser de 45° concretizado através de talão de mástique ou elementos próprios feitos do mesmo material do isolamento (alguns fabricantes de isolamento oferecem este tipo de soluções para evitar ângulos vivos, e.g. Foamglass). Materiais impermeabilizantes, tais como telas, devem ser aplicados respeitando a sobreposição de telas (mínimo de 15 cm). O material impermeabilizante deve estender-se até ao topo do rebordo da laje, cobrindo-o completamente e, posteriormente, o rebordo deverá ser capeado com pendente para o interior da cobertura através da colocação de um rufo.

### **Resultados:**

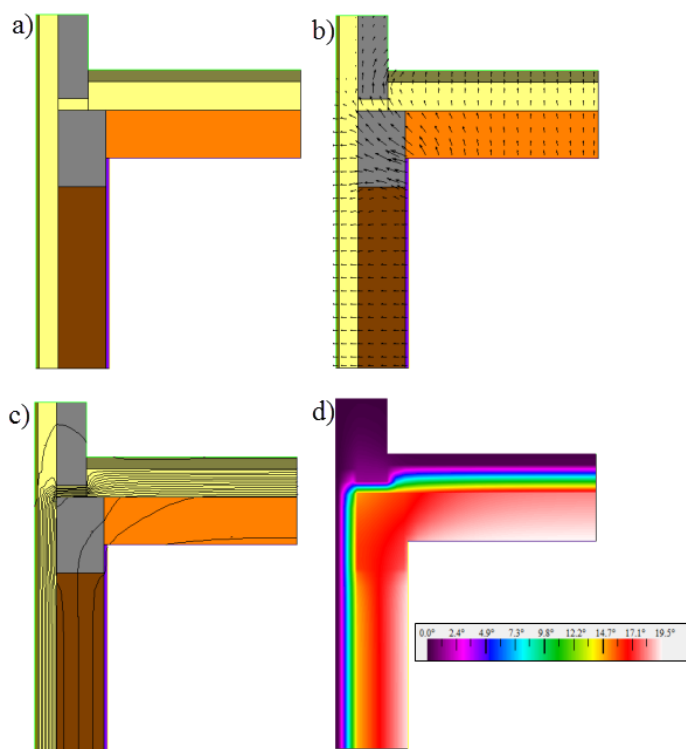


Figura 110. Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com cobertura plana (sem platibanda) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = -0,001 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 0,700 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,200 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 0,700 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

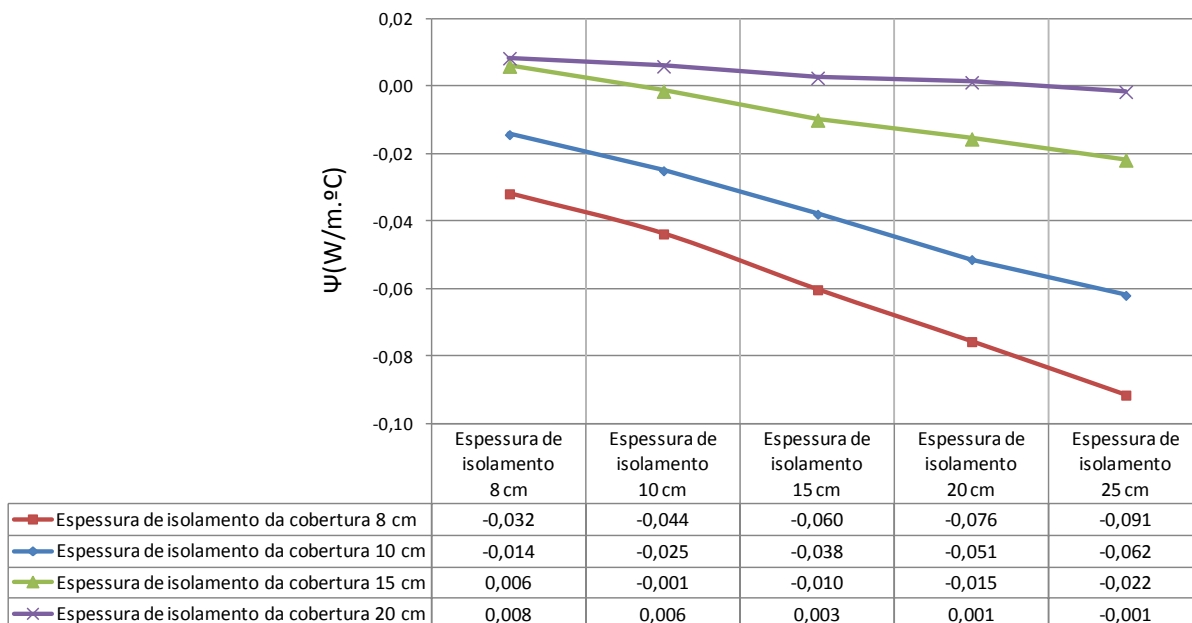


Figura 111. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e da cobertura plana

4.3.13.2. Parede exterior (dupla)

Representação:

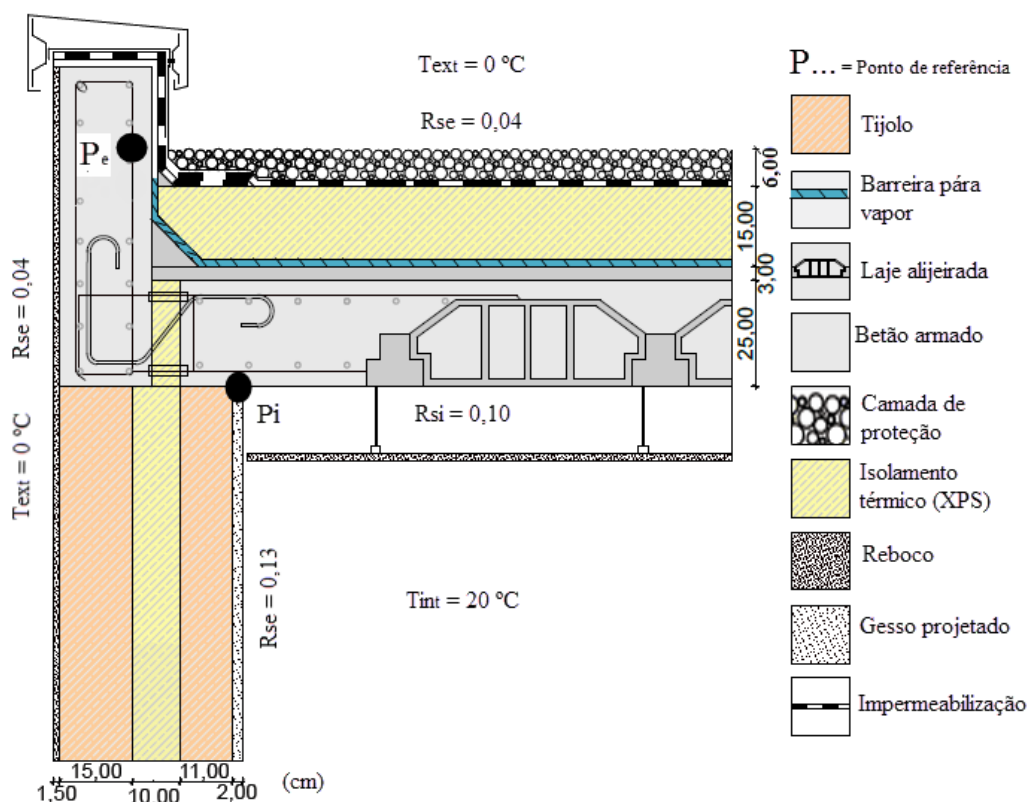


Figura 112. Ligação de fachada (parede dupla) com cobertura plana (sem platibanda)

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação de uma cobertura plana não acessível a uma parede dupla de fachada com cavidade totalmente preenchida com isolamento. A modelação numérica considera a conjugação de diferentes espessuras de isolamento entre panos de alvenaria e da cobertura (ver Figura 114). O pormenor apresenta a interposição duma solução de corte térmico da Schock Isokorb tipo F (ver Anexo F), concedendo ao detalhe construtivo a continuidade da camada de isolamento no encontro da laje com a parede exterior.

**Processo construtivo:**

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas e lajes).
- Armação de vigas, lajes e em conjunto inclui-se o elemento de corte térmico no encontro da laje com o rebordo da laje (ver Anexo F).
- Betonagem da laje e após secagem cofrar e betonar o rebordo da laje.
- Execução das paredes exteriores.
- Procedimento de construção de paredes duplas como mencionado anteriormente nas soluções construtivas, garantindo a continuidade entre o isolamento da laje e da parede.
- Procedimento de construção de cobertura plana invertida ou tradicional (não acessível) como mencionado anteriormente nas soluções construtivas, tendo especial atenção aos cuidados que este processo deve apresentar na colocação das camadas dos elementos que compõem a cobertura, nomeadamente os pontos singulares.
- Nos pontos singulares deve-se prevenir o descolamento, o rasgamento ou fissuração de remates do rebordo maciço. Como solução para estes pontos singulares, o ângulo entre a cobertura e a superfície vertical do rebordo da laje deve ser de 45° concretizado através de talão de mástique ou elementos próprios feitos do mesmo material do isolamento (alguns fabricantes de isolamento oferecem este tipo de soluções para evitar ângulos vivos, e.g. Foamglass). Materiais impermeabilizantes como telas devem ser aplicadas respeitando a sobreposição de telas (mínimo de 15 cm). O material impermeabilizante deve estender-se até ao topo do rebordo da laje, cobrindo-o completamente e, posteriormente, o rebordo deverá ser capeado com pendente para o interior da cobertura com um rufo.

**Resultados:**

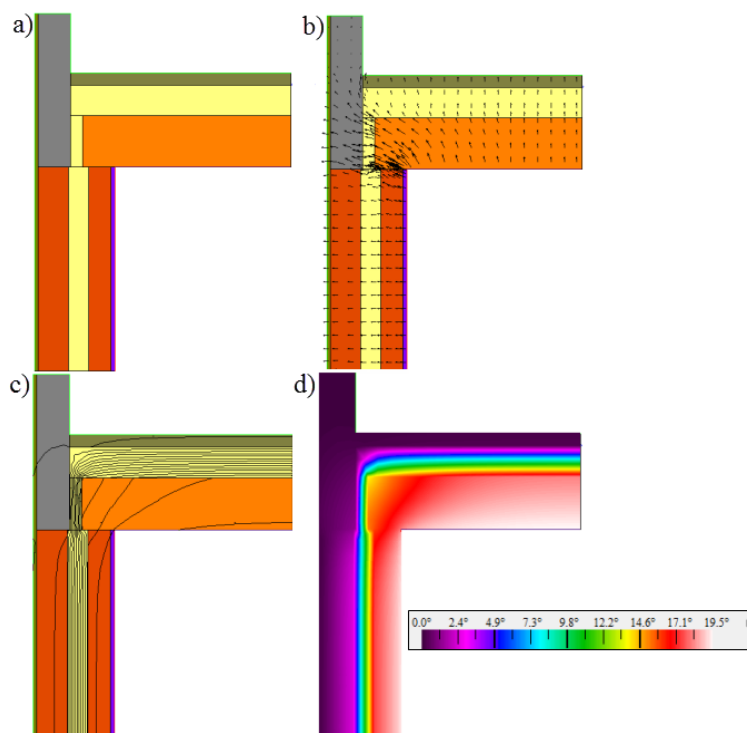


Figura 113. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com cobertura plana (sem platibanda) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = - 0,009 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,617 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

$$\Psi_i = 0,163 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,617 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

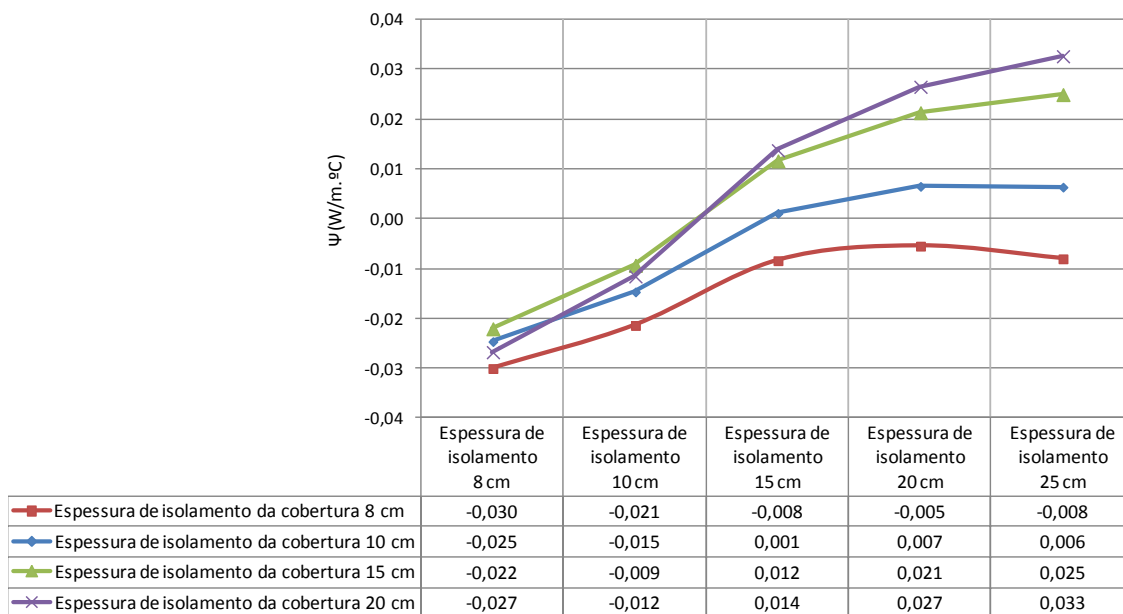


Figura 114. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior (dupla) e da cobertura plana

## 4.3.14. Ligação de fachada com terraço (com platibanda)

## 4.3.14.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

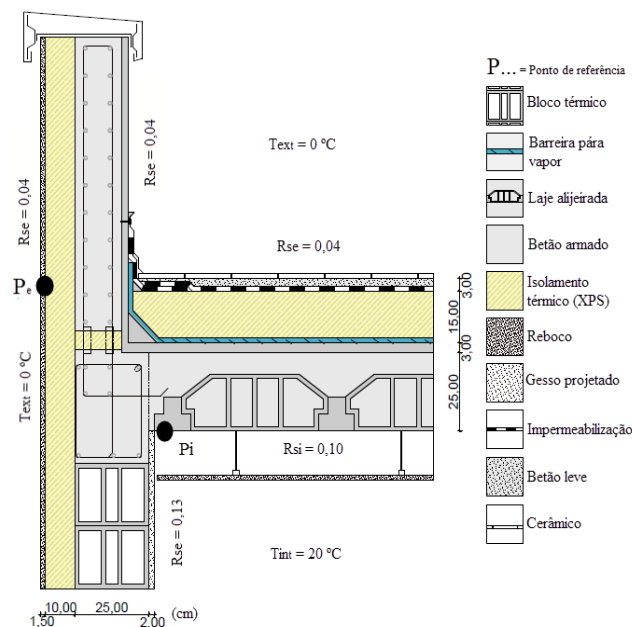
**Representação:**

Figura 115. Ligação de fachada (parede simples) com terraço (com platibanda)

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação duma cobertura plana acessível com uma parede de fachada com sistema de isolamento pelo exterior. A modelação numérica contempla a conjugação de diferentes espessuras de isolamento na parede e na cobertura (ver Figura 117). O pormenor apresenta uma solução de corte térmico Isolan FD da Ancon (ver Anexo E), concedendo ao detalhe construtivo a continuidade da camada de isolamento.

**Processo construtivo:**

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas e lajes).
- Armação de vigas, lajes e posterior betonagem destes elementos. No processo de betonagem são deixadas armaduras de continuidade para o desenvolvimento da platibanda (ver Anexo E).
- Colocação do elemento de corte térmico em conjunto com a armação da platibanda e consequente betonagem.
- Execução das paredes exteriores.
- Procedimento de construção de paredes exteriores com isolamento pelo exterior como mencionado anteriormente nas soluções construtivas.

- Procedimento de construção de cobertura plana invertida ou tradicional (acessível), tendo especial atenção quanto aos cuidados que este processo deve apresentar na colocação das camadas dos elementos que compõem a cobertura, nomeadamente os pontos singulares.
- Nos pontos singulares deve-se prevenir o descolamento, o rasgamento ou fissuração de remates da ligação cobertura/platibanda. Como solução para estes pontos singulares, o ângulo entre a cobertura e a superfície vertical da platibanda deve ser de 45°, concretizado através de talão de mástique ou elementos próprios feitos do mesmo material do isolamento (alguns fabricantes de isolamento oferecem este tipo de soluções para evitar ângulos vivos, e.g. Foamglass). Materiais impermeabilizantes como telas, devem ser aplicados respeitando a sobreposição de telas (mínimo de 15 cm). O material impermeabilizante deve estender-se no mínimo 10 cm acima da superfície da cobertura. Fixação dum rufo à platibanda, acima do ponto onde finalizou a impermeabilização para evitar a penetração de água entre a superfície da platibanda e o material impermeabilizante. Com o mesmo objetivo é aplicado mástique ou um vedante aderente na zona acima da fixação. O topo da platibanda deverá ser capeado com pendente para o interior da cobertura com rufo servindo de impedimento para a infiltração de água na interface do isolamento exterior e da platibanda.

### **Resultados:**

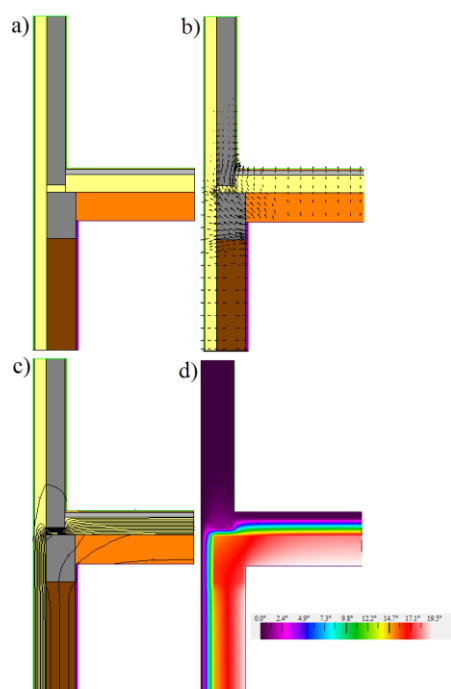


Figura 116. Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com terraço (com platibanda) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = -0,002 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad L^{2D} = 0,698 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\Psi_i = 0,198 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad L^{2D} = 0,698 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

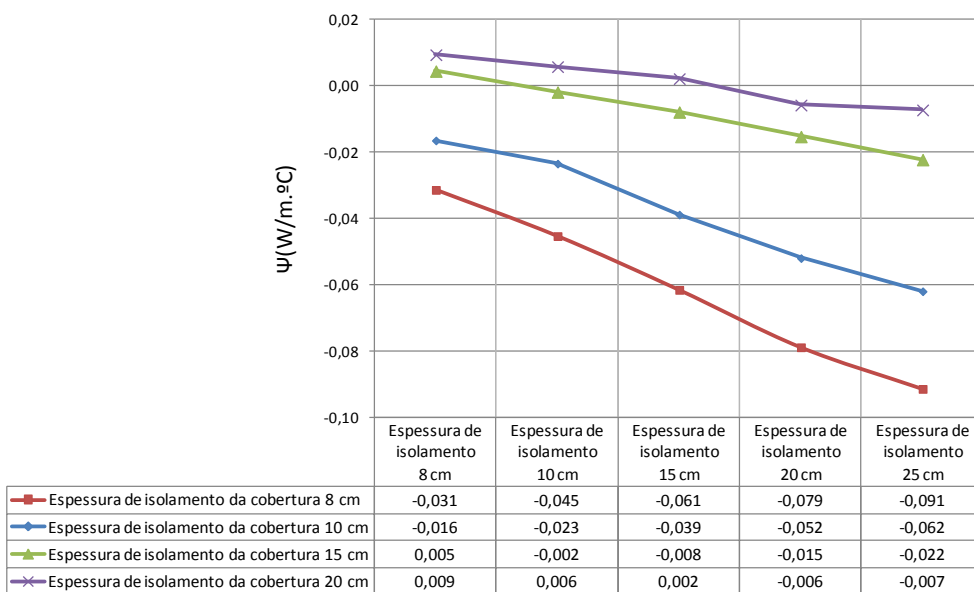


Figura 117. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e da cobertura plana

### 4.3.14.2. Parede exterior (dupla)

#### Representação:

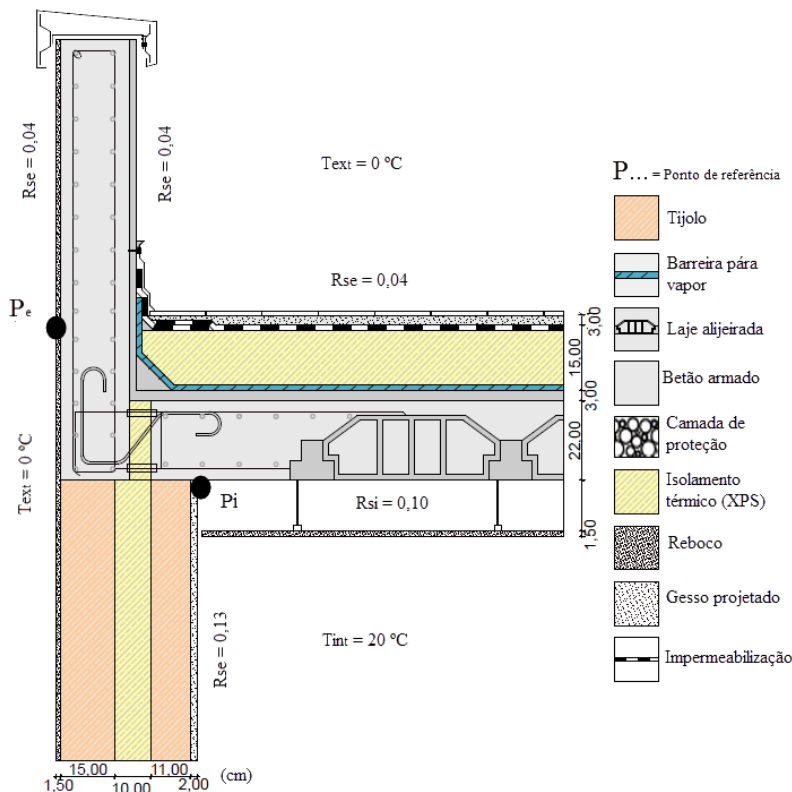


Figura 118. Ligação de fachada (parede dupla) com terraço (com platibanda)



**Descrição:**

O pormenor representa a ligação de uma cobertura plana acessível a uma parede dupla de fachada com cavidade totalmente preenchida com isolamento. A modelação numérica considera a conjugação de diferentes espessuras de isolamento entre panos de alvenaria e da cobertura (ver Figura 120). O pormenor apresenta a interposição duma solução de corte térmico da Schock Isokorb tipo F (ver Anexo F), concedendo ao detalhe construtivo a continuidade da camada de isolamento no encontro da laje com a parede exterior.

**Processo construtivo:**

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas e lajes).
- Armação de vigas, lajes e em conjunto inclui-se o elemento de corte térmico no encontro da laje com a platibanda (ver Anexo F).
- Betonagem da laje e após secagem, cofrar e betonar platibanda.
- Execução das paredes exteriores.
- Procedimento de construção de paredes duplas como mencionado anteriormente nas soluções construtivas, garantindo a continuidade entre o isolamento da laje e da parede, fazendo coincidir o isolamento entre panos e o elemento de corte térmico.
- Procedimento de construção de cobertura plana invertida ou tradicional (não acessível) como referido anteriormente nas soluções construtivas, tendo especial atenção com os cuidados que este processo deve apresentar na colocação das camadas dos elementos que compõem a cobertura, nomeadamente os pontos singulares.
- Nos pontos singulares deve-se prevenir o descolamento, o rasgamento ou fissuração de remates do rebordo maciço. Como solução para estes pontos singulares, o ângulo entre a cobertura e a superfície vertical do rebordo da laje deve ser de 45° concretizado através de talão de mástique ou elementos próprios feitos do mesmo material do isolamento (alguns fabricantes de isolamento oferecem este tipo de soluções para evitar ângulos vivos, e.g. Foamglass). Materiais impermeabilizantes como telas devem ser aplicadas respeitando a sobreposição de telas (mínimo de 15 cm). Estes materiais devem estender-se no mínimo 10 cm acima da superfície da cobertura. Fixação dum rufo à platibanda, acima do ponto onde finalizou a impermeabilização para evitar a penetração de água entre a superfície da platibanda e o material impermeabilizante. Com o mesmo objetivo é aplicado mástique ou um vedante aderente na zona acima da fixação. O topo da platibanda deverá ser capeado com pendente para o interior da

cobertura com rufo servindo de impedimento para a infiltração de água na interface do isolamento exterior e da platibanda.

**Resultados:**

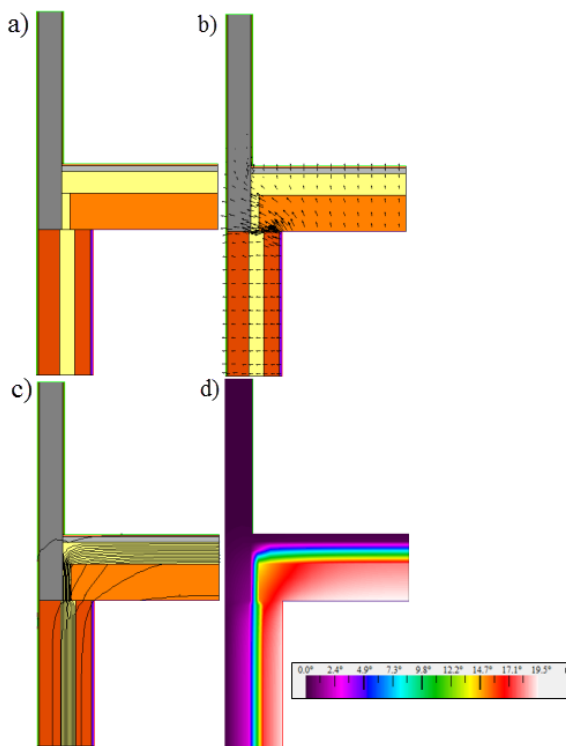


Figura 119. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com terraço (com platibanda) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = -0,007 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,618 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

$$\Psi_i = 0,164 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,618 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

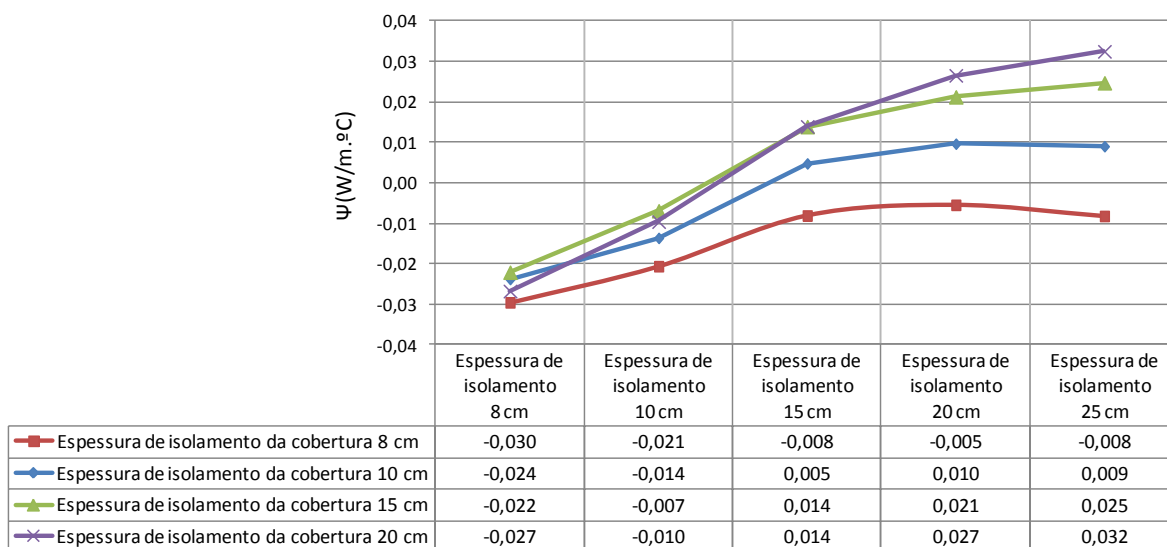


Figura 120. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e da cobertura plana

### 4.3.15. Ligação de fachada com cobertura inclinada (Bordo lateral ou de empena)

#### 4.3.15.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

##### Representação:

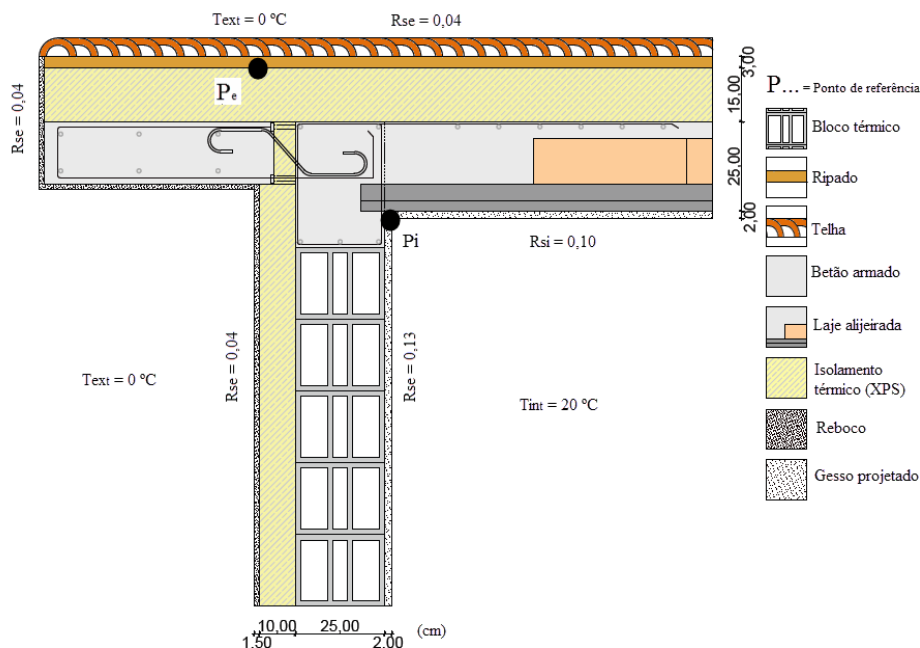


Figura 121. Ligação de fachada (parede simples) com cobertura inclinada (bordo lateral ou de empena)

##### Descrição:

O pormenor representa a ligação de uma cobertura inclinada e uma parede de fachada com sistema de isolamento pelo exterior. A modelação numérica considera a conjugação de diferentes espessuras de isolamento na parede e na cobertura inclinada (ver Figura 123). O pormenor apresenta a interposição duma solução de corte térmico Isolan MV da Ancon (ver Anexo D). Este elemento confere a continuidade da camada de isolamento na conexão. A correção da ponte térmica associada a esta ligação adequa-se a edifícios em que o espaço sob a cobertura é uma zona útil (aquecida).

##### Processo construtivo:

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas, lajes e bordo lateral).
- Armação dos elementos construtivos, inclusive do elemento de corte térmico de acordo com as especificações do fabricante (ver Anexo D) e posterior betonagem destes elementos.
- Execução das paredes exteriores.

- Procedimento de solução construtiva de paredes exteriores e de cobertura inclinada com isolamento pelo exterior e sobre a laje, respetivamente, conforme mencionado anteriormente nas soluções construtivas.

**Resultados:**

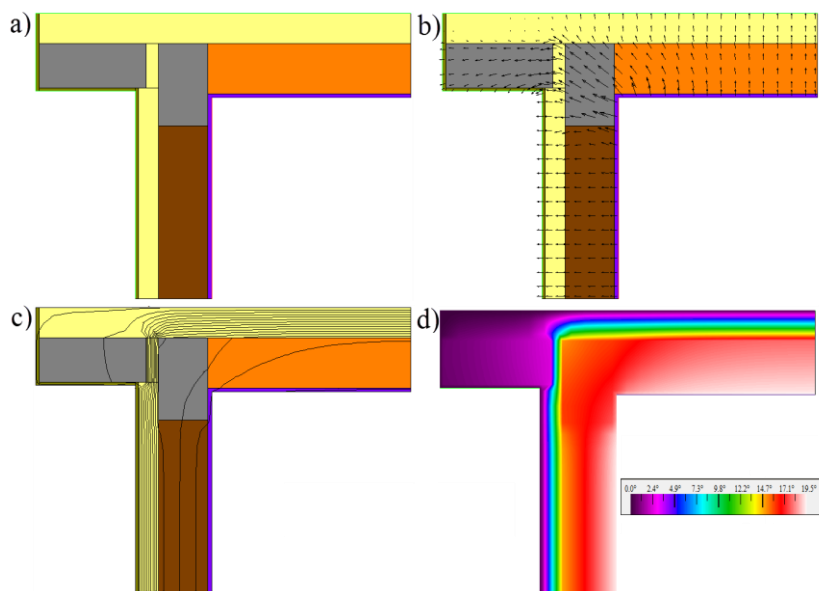


Figura 122. Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com cobertura inclinada (bordo lateral ou de empena) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,006 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)} \quad L^{2D} = 0,665 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,193 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)} \quad L^{2D} = 0,665 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$$

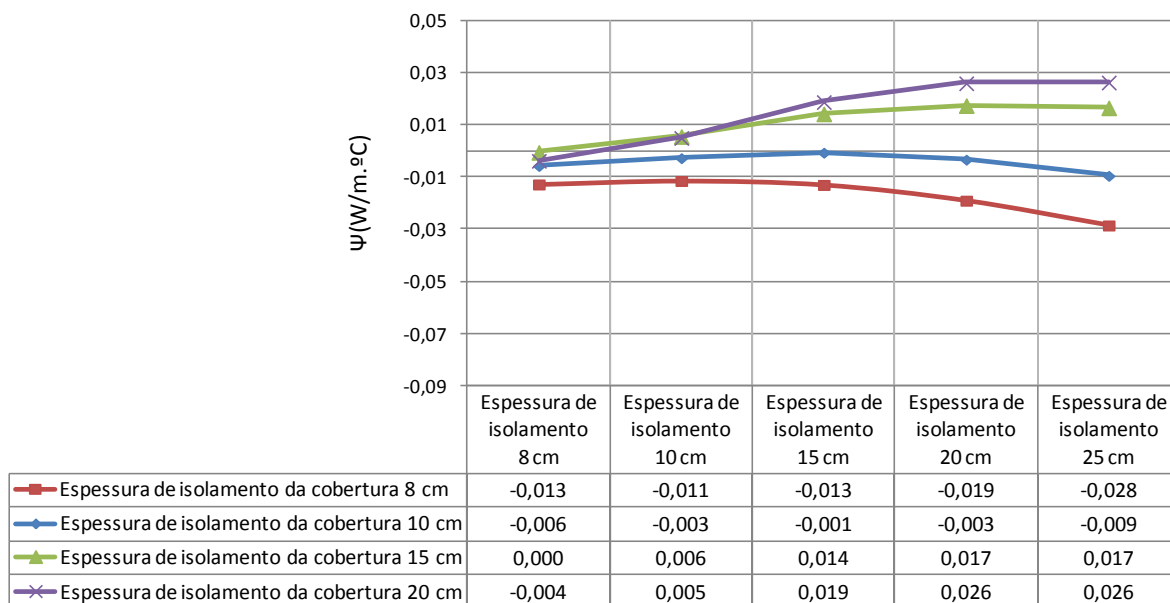


Figura 123. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espeçura de isolamento da parede exterior e da cobertura inclinada

## 4.3.15.2. Parede exterior (dupla)

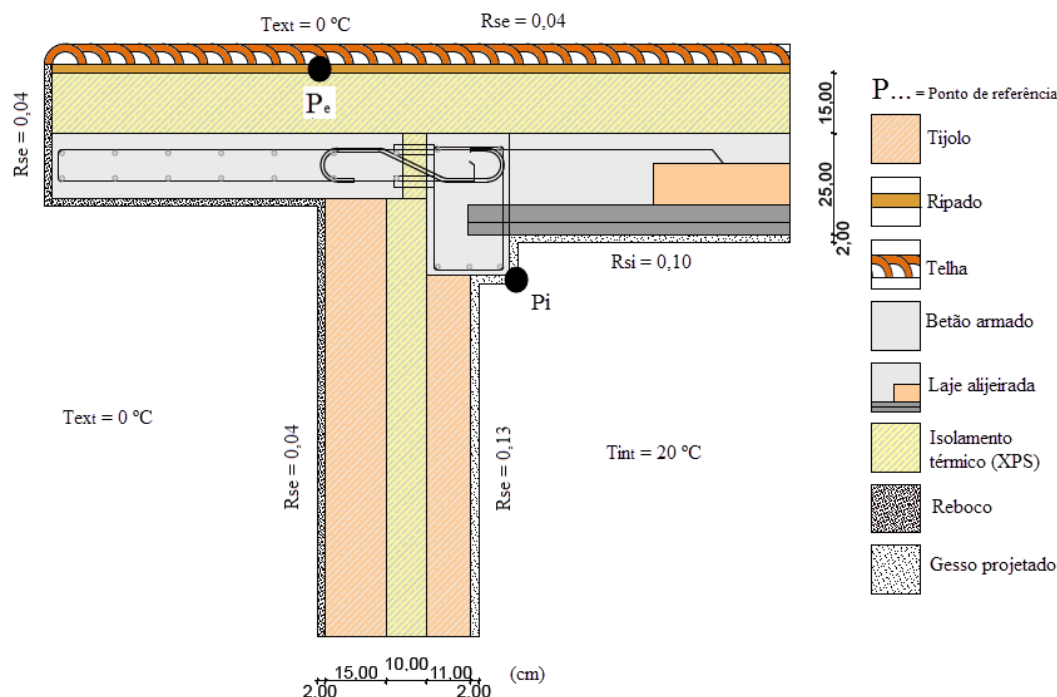
**Representação:**

Figura 124. Ligação de fachada (parede dupla) com cobertura inclinada (bordo lateral ou de empena)

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação de uma cobertura inclinada e uma parede de fachada dupla com cavidade totalmente preenchida com isolamento. A modelação numérica considera a conjugação de diferentes espessuras de isolamento na parede e na cobertura inclinada (ver Figura 126). O pormenor apresenta a interposição duma solução de corte térmico Isolan MV da Ancon (ver Anexo D). Este elemento confere a continuidade da camada de isolamento na conexão. A correção da ponte térmica associada a esta ligação adequa-se a edifícios em que o espaço sob a cobertura é uma zona útil (aquecida).

**Processo construtivo:**

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas, lajes e bordo lateral).
- Armação dos elementos construtivos, inclusive do elemento de corte térmico de acordo com as especificações do fabricante (ver Anexo D) e posterior betonagem destes elementos.
- Execução das paredes exteriores de acordo com procedimento de construção de paredes duplas apresentado nas soluções construtivas.

- Execução da cobertura inclinada com isolamento pelo exterior sobre a laje conforme referido nas soluções construtivas.

**Resultados:**

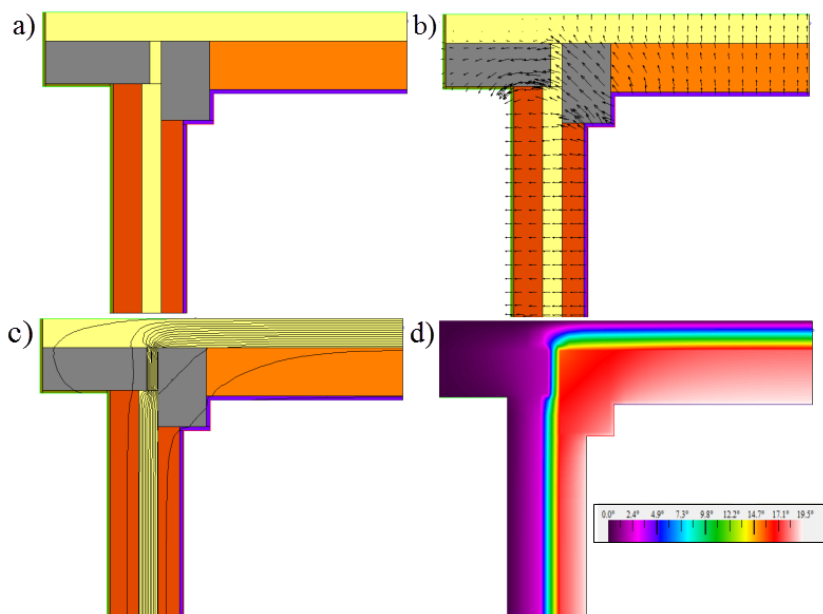


Figura 125. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com cobertura inclinada (bordo lateral ou de empena) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,012 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,715 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

$$\Psi_i = 0,237 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,715 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

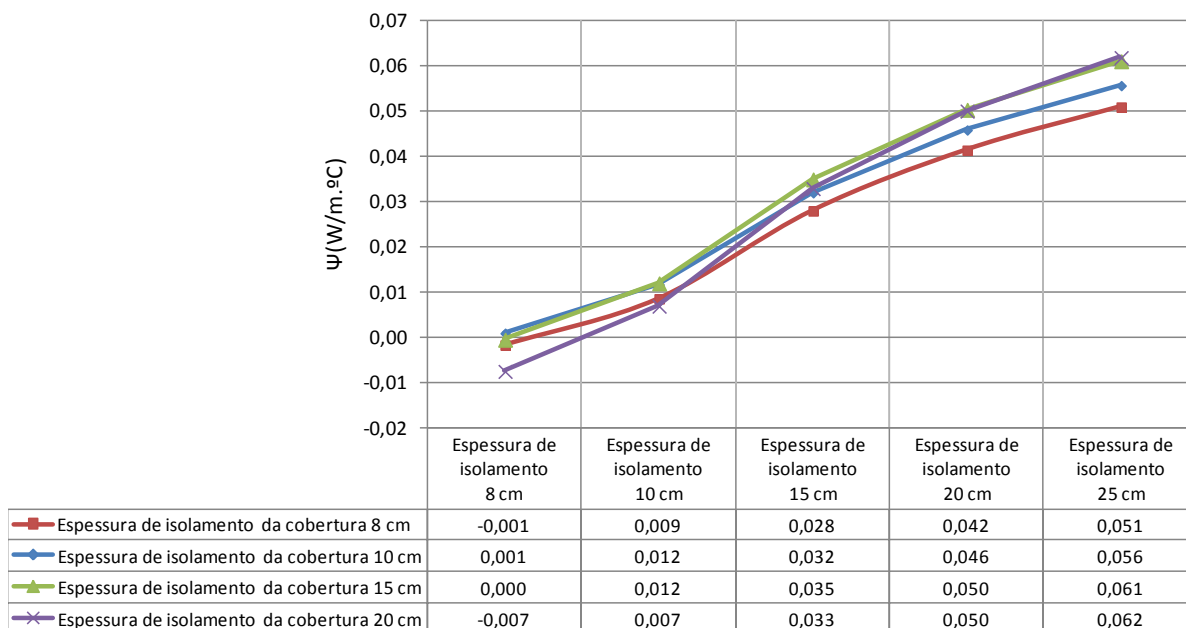


Figura 126. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior dupla e da cobertura inclinada

## 4.3.16. Ligação de fachada com cobertura inclinada (beiral)

## 4.3.16.1. Parede exterior simples (isolamento pelo exterior)

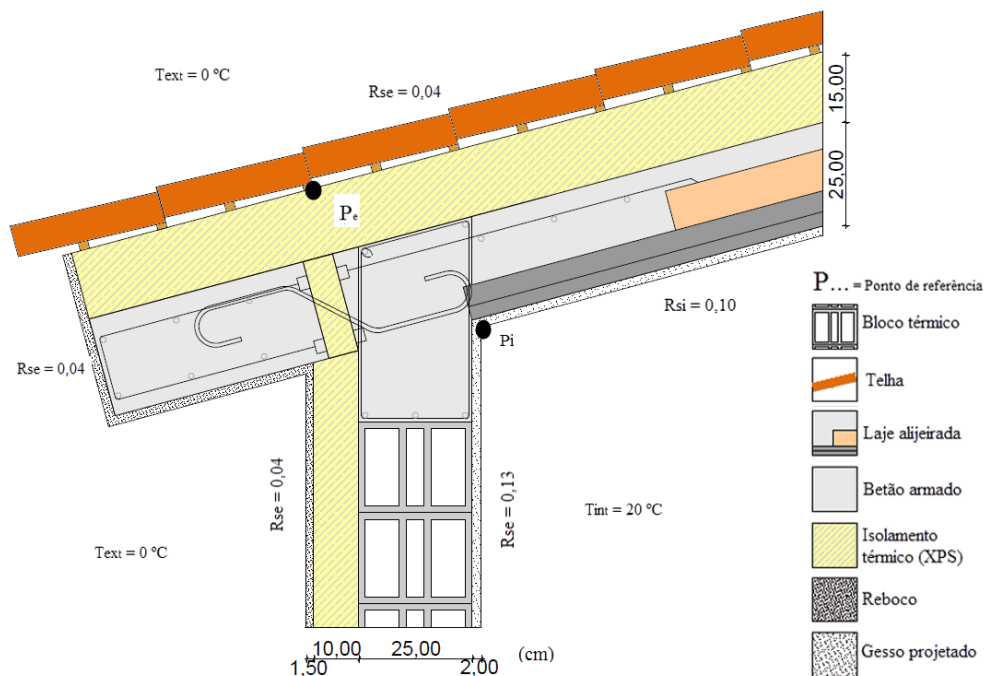
**Representação:**

Figura 127. Ligação de fachada (parede simples) com cobertura inclinada (beiral)

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação entre a cobertura inclinada e parede de fachada com sistema de isolamento pelo exterior. A modelação numérica considera a conjugação de diferentes espessuras de isolamento na parede e na cobertura inclinada (ver Figura 123). O pormenor apresenta a interposição duma solução de corte térmico Isolan MV da Ancon (ver Anexo D). Este elemento confere a continuidade da camada de isolamento na conexão. A correção da ponte térmica associada a esta ligação adequa-se a edifícios em que o espaço sob a cobertura é uma zona útil (aquecida).

**Processo construtivo:**

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas, lajes e beiral).
- Armação dos elementos construtivos, inclusive do elemento de corte térmico de acordo com as especificações do fabricante (ver Anexo D) e posterior betonagem destes elementos.
- Execução das paredes exteriores.

- Procedimento de construção de paredes exteriores e de cobertura inclinada com isolamento pelo exterior e isolamento sobre a laje, respetivamente, conforme mencionado anteriormente nas soluções construtivas.

**Resultados:**

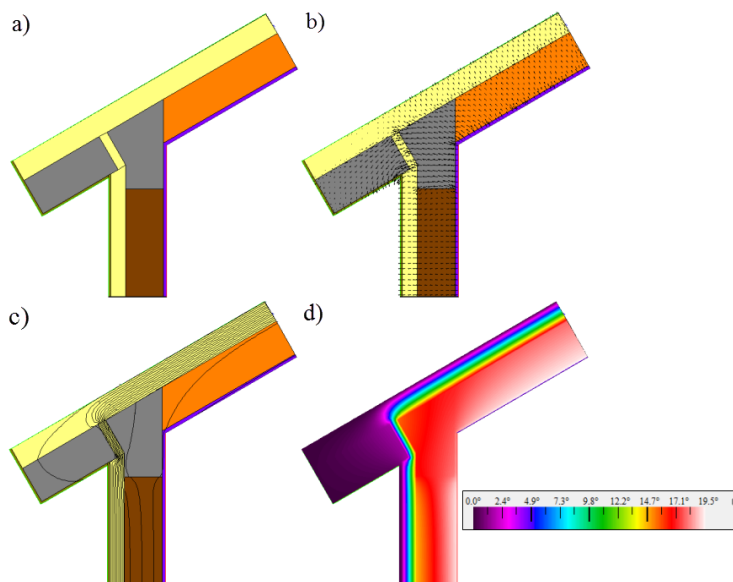


Figura 128. Resultados Therm da ligação de fachada (parede simples) com cobertura inclinada (beiral) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = 0,011 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 0,646 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,174 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 0,646 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

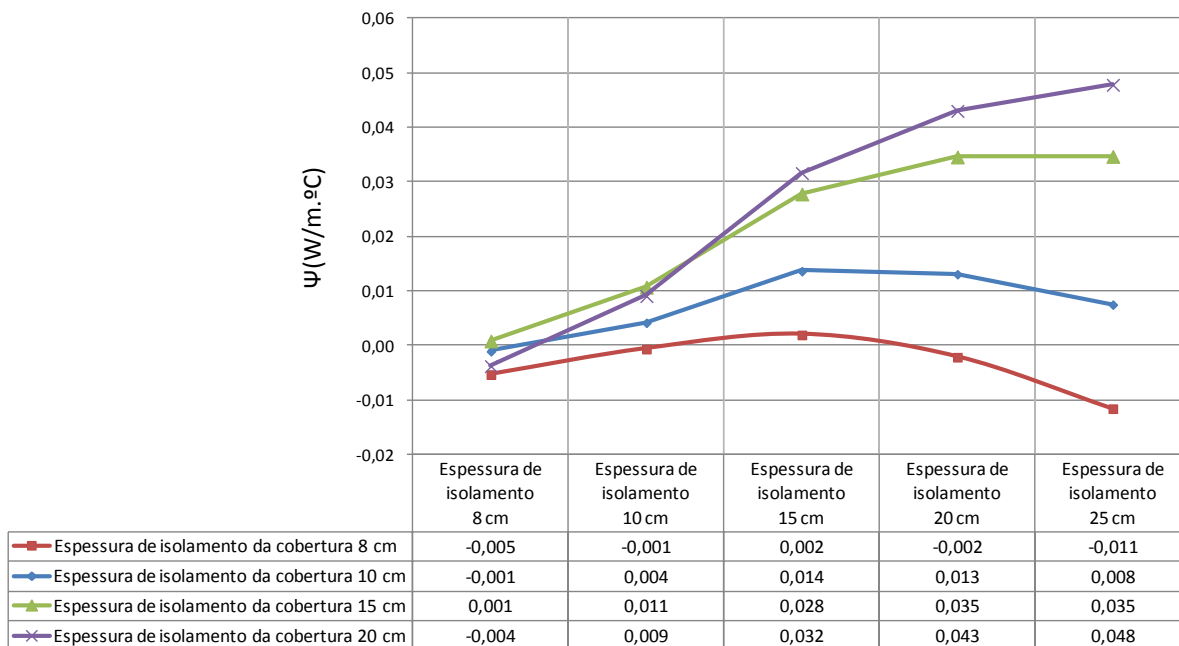


Figura 129. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento da parede exterior e da cobertura inclinada



## 4.3.16.2. Parede exterior (dupla)

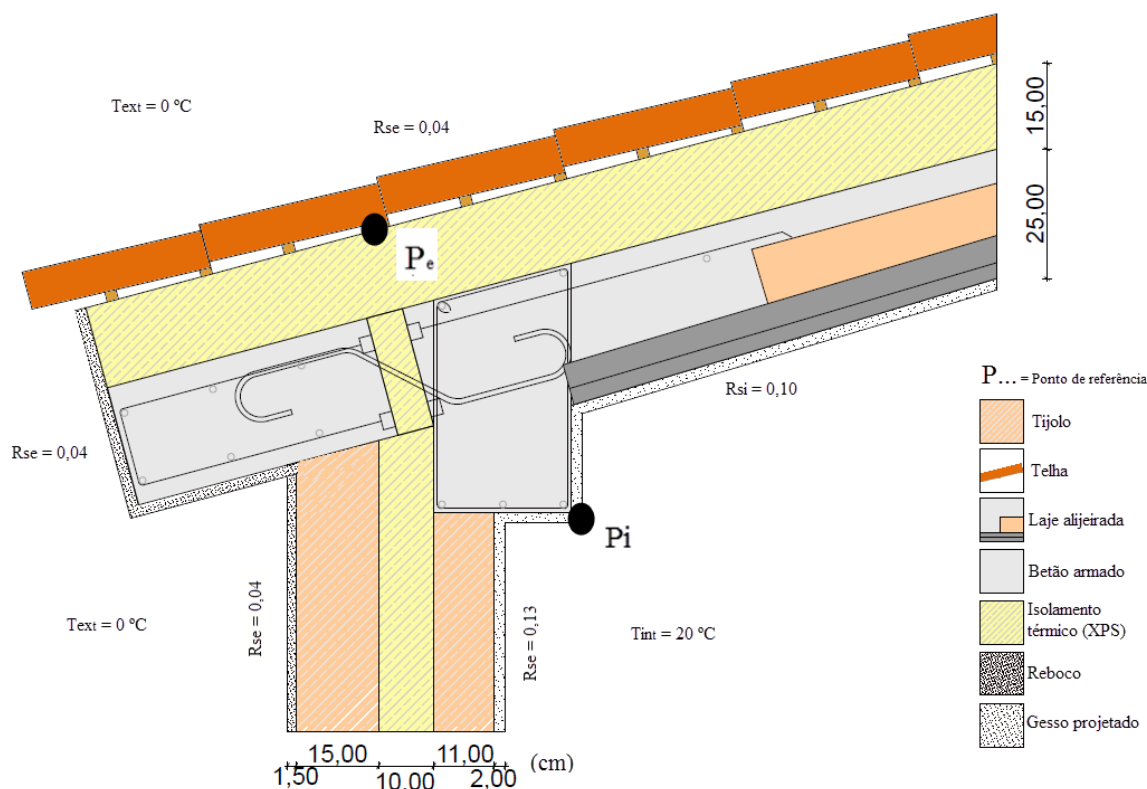
**Representação:**

Figura 130. Ligação de fachada (parede dupla) com cobertura inclinada (beiral)

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação entre a cobertura inclinada e uma parede de fachada dupla com cavidade totalmente preenchida com isolamento. A modelação numérica considera a conjugação de diferentes espessuras de isolamento na parede e na cobertura inclinada (ver Figura 126). O pormenor apresenta a interposição duma solução de corte térmico Isolan MV da Ancon (ver Anexo D). Este elemento confere a continuidade da camada de isolamento na conexão. A correção da ponte térmica associada a esta ligação adequa-se a edifícios em que o espaço sob a cobertura é uma zona útil (aquecida).

**Processo construtivo:**

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas, lajes e beiral).
- Armação dos elementos construtivos, inclusive do elemento de corte térmico de acordo com as especificações do fabricante (ver Anexo D) e posterior betonagem destes elementos.
- Execução das paredes exteriores de acordo com o procedimento de construção de paredes duplas apresentado nas soluções construtivas.

- Execução da cobertura inclinada com isolamento pelo exterior sobre a laje, conforme referido nas soluções construtivas.

**Resultados:**

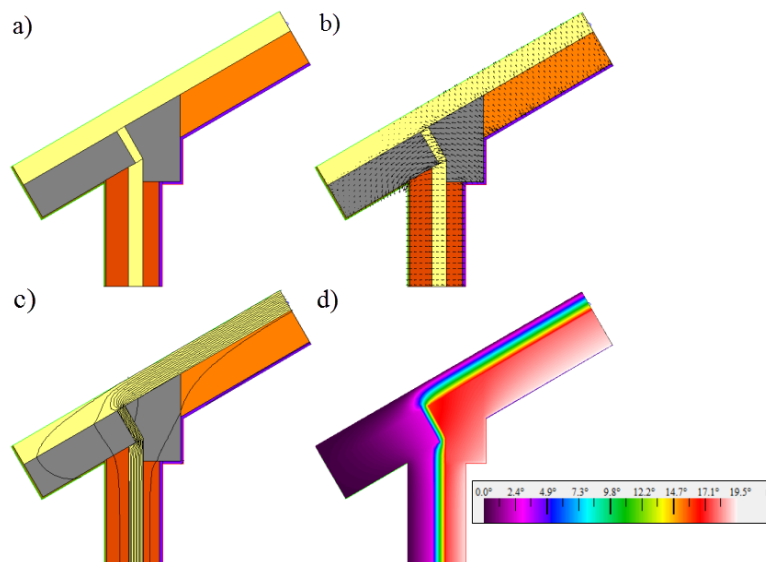


Figura 131. Resultados Therm da ligação de fachada (parede dupla) com cobertura inclinada (beiral) : a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = -0,017 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 0,648 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

$$\Psi_i = 0,246 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)} \quad L^{2D} = 0,648 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

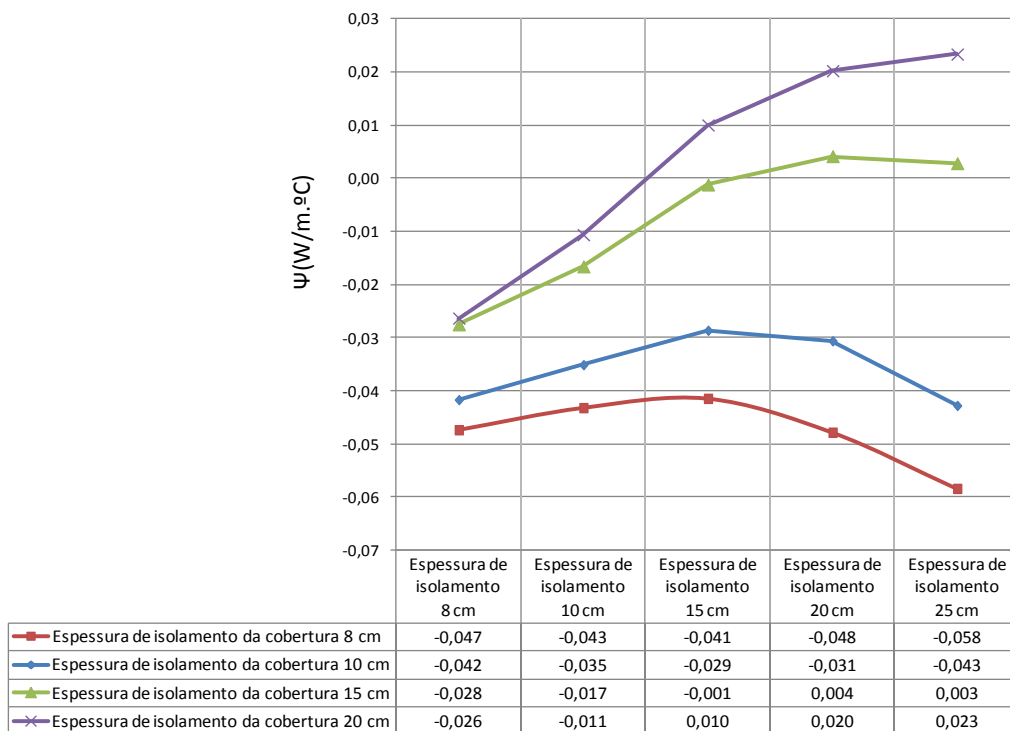


Figura 132. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espeçura de isolamento da parede exterior dupla e da cobertura inclinada

## 4.3.17. Ligação entre duas lajes de cobertura inclinadas (cumeeira)

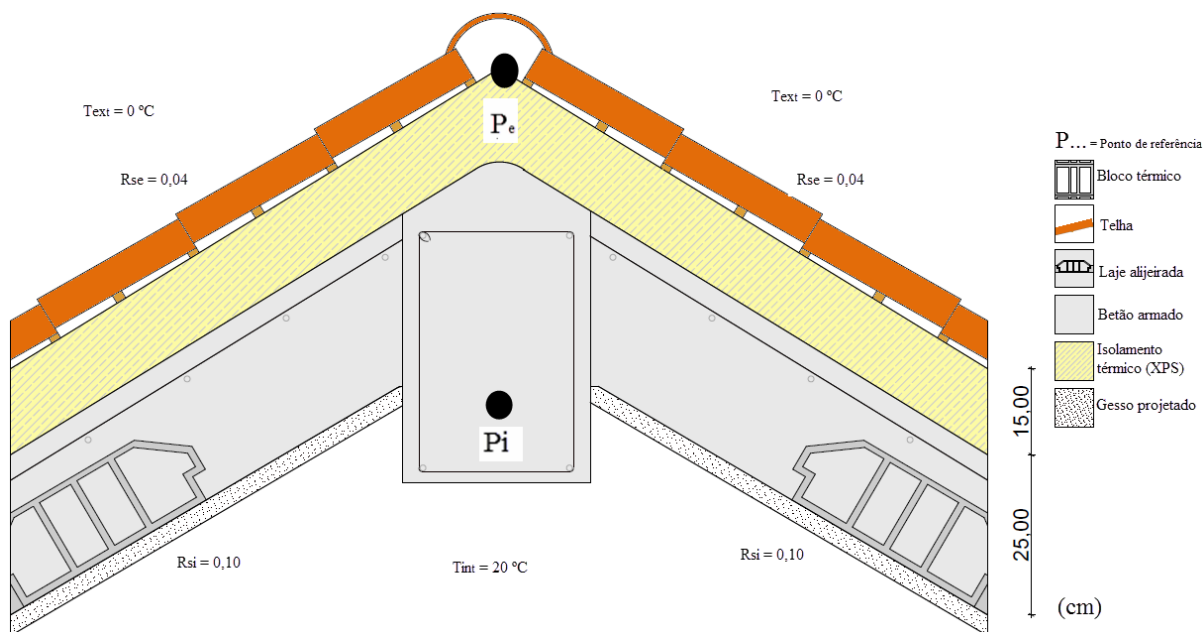
**Representação:**

Figura 133. Ligação entre duas lajes de cobertura inclinadas (cumeeira)

**Descrição:**

O pormenor representa a ligação de duas lajes de cobertura inclinadas com isolamento sobre as lajes. A modelação numérica consiste na variação de diferentes espessuras de isolamento na cobertura inclinada (ver Figura 135). A correção da ponte térmica associada a esta ligação adequa-se a edifícios em que o espaço (e.g. águas furtadas) sob a cobertura é uma zona útil (aquecida).

**Processo construtivo:**

- Cofragem dos elementos construtivos (vigas, lajes de cobertura).
- Armação dos elementos construtivos e posterior betonagem dos mesmos.
- Procedimento de execução de cobertura inclinada com isolamento sobre a cobertura, conforme mencionado anteriormente nas soluções construtivas.
- Nos pontos singulares, inerentes à colocação do isolamento, deve-se prevenir os pontos frágeis (secção reduzida) na ligação das lajes inclinadas, garantindo o uso de calhas sobre o isolamento nesses pontos.

**Resultados:**

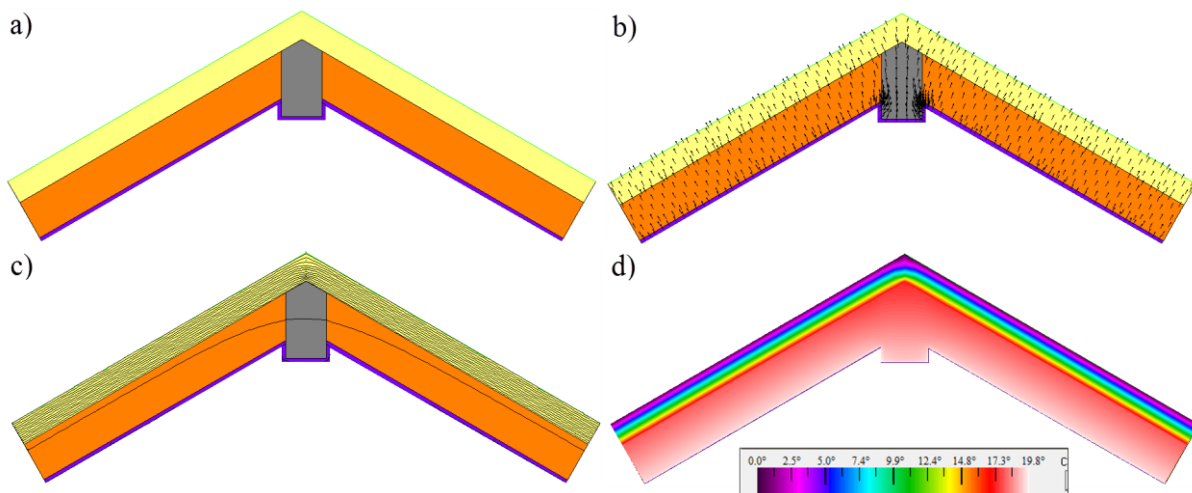


Figura 134. Resultados Therm da ligação entre duas lajes de cobertura inclinada (cumeeira)  
: a) Identificação de materiais; b) Vetor de fluxos; c) Linhas isotérmicas

$$\Psi_e = - 0,032 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,884 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

$$\Psi_i = 0,055 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)} \quad L^{2D} = 0,884 \text{ W/(m.}^\circ\text{C)}$$

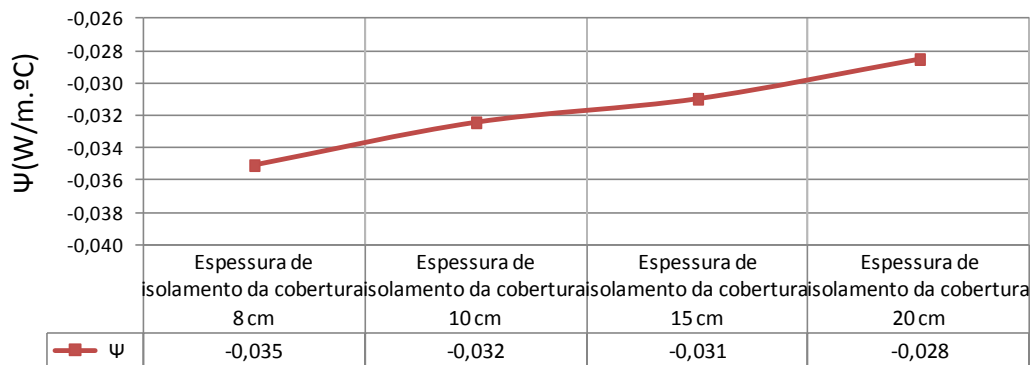


Figura 135. Valores de  $\Psi_e$  segundo a variação da espessura de isolamento das lajes cobertura

#### 4.4. Análise de resultados

Neste estudo, pretendeu-se verificar a possibilidade de diminuir os valores de  $\Psi$ , adaptando os sistemas construtivos utilizados correntemente em Portugal, para atingir a condição imposta pela norma *Passivhaus* ( $\Psi < 0,01 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ) aos valores do coeficiente de transmissão térmica linear. Outro objetivo desta análise, foi verificar qual seria a diferença, no que se refere a valores de transmissão térmica linear  $\Psi$ , que se obteria para pormenores construtivos, de acordo com a metodologia seguida pelo RCCTE (2006) (medição dos elementos realizada pelo interior, encontrando-se os resultados de  $\Psi_i$  apresentados no Anexo H) e segundo a medição dos elementos realizada pelo exterior ( $\Psi_e$ ), de acordo com a metodologia indicada pela *Passivhaus*. Também se analisou a relação entre a variação da espessura do isolamento e o valor de  $\Psi$ . Outras análises foram realizadas, tendo como objetivo verificar-se a diferença entre os valores obtidos para o coeficiente  $\Psi$  ( $\Psi_e$  e  $\Psi_i$ ), tendo em conta a influência da sobreposição do isolamento na caixilharia dos envidraçados e a variação dos valores do coeficiente de transmissão térmica, consoante a posição e espessura do isolamento térmico nas lajes.

##### 4.4.1. Análise dos valores do coeficiente de transmissão térmica linear $\Psi_e$

Analisando os resultados obtidos para os valores de  $\Psi_e$ , verifica-se que praticamente todos os pormenores construtivos estudados cumprem os limites estabelecidos pela norma *Passivhaus* com  $\Psi < 0,01 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ . Os pormenores que não verificam o requisito estabelecido pela norma estão associados aos elementos da envolvente translúcida (vãos envidraçados), e os pormenores construtivos relativos à ligação de fachada com varanda e ligação de fachada com pavimentos intermédios. O resultado desta análise tem em conta ambos os sistemas de parede estudados (dupla com isolamento na caixa de ar e simples com isolamento pelo exterior) e, os valores de  $\Psi_e$  apresentados em cada pormenor ao longo do ponto 5.3.

Neste estudo partiu-se de valores de espessura de isolamento de 10 cm em paredes e 15 cm em lajes, valores determinados por Almeida (2013) como sendo adequados às várias regiões portuguesas. Na presente dissertação estas espessuras constituem a base para a determinação do  $\Psi$  de várias ligações construtivas, com o objetivo de se verificar se atingiria o  $\Psi < 0,01 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  (ver Anexo G).

#### 4.4.2. Análise comparativa entre valores $\Psi_i$ dos pormenores construtivos adequados à *Passivhaus* e os valores estabelecidos no Regulamento Térmico – RCCTE

No RCCTE (2006), encontram-se tabelados vários valores do coeficiente de transmissão térmica linear  $\Psi$  para algumas pontes térmicas lineares tipificadas, como exemplificado na Figura 136. No entanto, para as soluções construtivas que não são apresentadas nesse regulamento, este indica a possibilidade de se adotar o valor convencional de  $\Psi = 0,5$  (W/m.°C), ou de se efetuar o cálculo segundo as normas europeias EN 13370:2007 ou EN ISO 10211-1:2007 (RCCTE, 2006; Camelo et al., 2006). No caso de “paredes interiores intersectando a cobertura e pavimentos, quer sobre o exterior quer sobre espaços não úteis (locais não aquecidos) e as paredes interiores separando um espaço útil de um espaço não útil adjacente desde que  $\tau < 0,7$ ”, o RCCTE (2006) considera que não devem ser contabilizadas as pontes térmicas lineares, enquanto que segundo os requisitos da *Passivhaus*, estas pontes térmicas lineares são contabilizadas no balanço térmico.

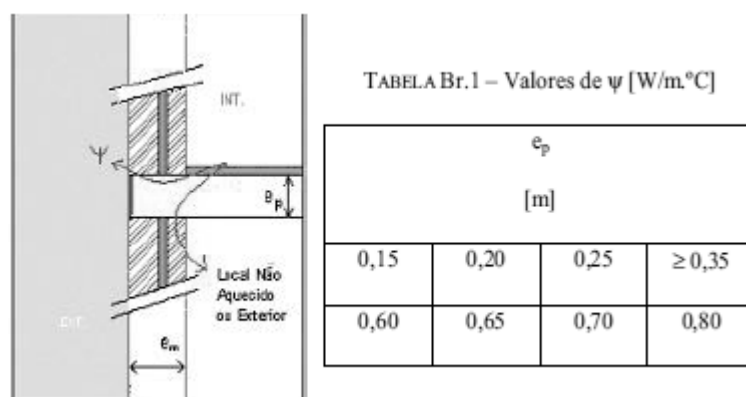


Figura 136. Exemplo dos valores de  $\Psi$  apresentados no RCCTE (Fonte: RCCTE, 2006)

No que se refere à questão da comparação dos valores  $\Psi_i$ , calculados para pormenores adequados à *Passivhaus* e os valores  $\Psi$  tabelados no RCCTE, verifica-se que seguindo o regulamento português, os valores das pontes térmicas para ambos os sistemas de paredes são mais elevados na maioria dos casos. Este aspeto torna-se relevante pois demonstra que estes valores dificilmente se adequam ao estudo e à determinação da influência das pontes térmicas nos edifícios seguidos pela norma *Passivhaus*. Nos pormenores apresentados pelo regulamento térmico português, facilmente se identifica que as ligações na sua maioria não apresentam a camada de isolamento contínua. Este dado é bastante relevante na aplicação da norma *Passivhaus*, sendo uma justificação plausível para a diferença de resultados entre as

duas normas. No entanto, apesar dos melhoramentos realizados para atingir os requisitos *Passivhaus*, alguns dos pormenores desenvolvidos não atingiram resultados favoráveis em relação à norma portuguesa, como é o caso dos pormenores das ligações da fachada com os vãos envidraçados. Os pormenores construtivos desenvolvidos para atingir os requisitos da norma alemã, cujos valores de  $\Psi_i$  não conseguiram ser inferiores aos valores de  $\Psi$  apresentados pelo RCCTE (2006) verificam o facto deste recorrer a simplificações e aproximações para se obter um valor parametrizado de aplicação generalizada (valores tabelados). Segundo a norma EN ISO 14683:2005, os valores tabelados revelam uma imprecisão de aproximadamente 20%.

Verificou-se também que os valores  $\Psi_i$  são sempre superiores aos valores  $\Psi_e$ , independentemente do sistema construtivo utilizado, ou seja, a influência das pontes térmicas nas perdas energéticas, segundo o método de medição interna (como o utilizado pelo RCCTE) e considerando as mesmas características da ligação, é sempre superior à das pontes térmicas quando medidas pelo exterior. Isto é possível verificar através da tabela do Anexo G.

#### 4.4.3. Análise da variação do coeficiente de transmissão térmica linear $\Psi_e$ , consoante a espessura do isolamento térmico

O estudo realizado no ponto 5.3 teve em consideração a combinação de várias espessuras de isolamento, quer nas paredes quer nos elementos horizontais, cujo fluxo de calor foi calculado através do programa Therm 7<sup>®</sup>. Após este estudo observou-se que dependendo do pormenor construtivo analisado e da sua composição, este apresenta valores de  $\Psi_e$  esperados e inesperados. Analisando caso a caso verifica-se que a aplicação do isolamento térmico com espessuras mais generosas resulta em pormenores construtivos com melhor desempenho ao nível das perdas de calor pois, à medida que a espessura do isolante aumenta, os valores do parâmetro  $\Psi_e$  vão diminuindo (e.g. ligação de fachada (isolamento pelo exterior) com terraço ou com cobertura plana (sem platibanda)). Na Figura 137 é possível verificar um exemplo desse comportamento.

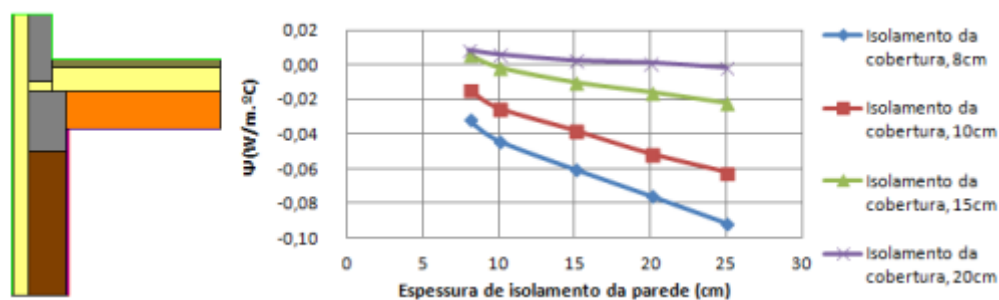


Figura 137. Variação do valor  $\Psi_e$  do pormenor construtivo da ligação de fachada (parede simples) com cobertura plana (sem platibanda)

No entanto, no caso do pormenor da ligação de fachada (parede dupla) com varanda, este comportamento já não se verificou. Ao analisar a evolução de valores do parâmetro  $\Psi_e$ , repara-se que, quando o isolamento varia entre 8 e 10 centímetros de espessura, existe uma queda no valor do coeficiente de transmissão térmica linear, mas que, à medida que o isolamento toma valores ainda mais elevados, os valores de  $\Psi_e$  vão crescendo também. Na Figura 138 é possível verificar esse comportamento. O mesmo comportamento verifica-se em outros pormenores (e.g. ligação de fachada (parede dupla) com pavimentos intermédios e ligação de fachada (parede dupla)/ombreira).

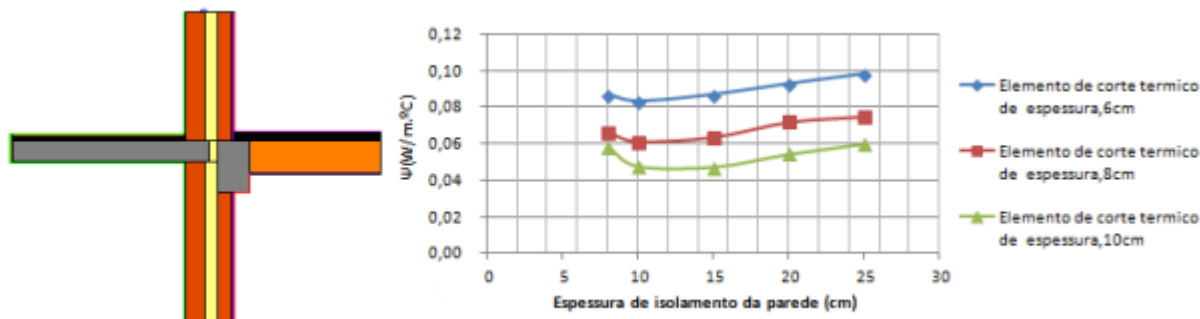


Figura 138. Variação do valor  $\Psi_e$  da ligação de fachada (parede dupla) com varanda

Uma possível razão para este comportamento pode estar relacionada com a exposição a que a zona da viga se encontra sujeita devido à menor espessura do elemento de corte térmico. Isto pode dever-se ao facto de, apesar do isolamento ter como função aumentar a resistência da parede, na qual é aplicado, neste caso, este pode provocar um aumento da concentração de linha de fluxo de calor na zona menos isolada.

Contrariamente às situações já analisadas é possível observar outro comportamento resultante do aumento da espessura de isolamento da envolvente. Na Figura 139 (ligação entre duas paredes verticais duplas (cunhal)), onde está representada a variação dos valores de  $\Psi_e$  em



função da espessura do isolamento, pode notar-se que os valores de  $\Psi_e$  tendem a aumentar consoante o aumento da espessura de isolamento, ou seja, verifica-se que existe uma relação diretamente proporcional entre os dois parâmetros. Este comportamento é mais evidente nos pormenores associados ao sistema de parede dupla.

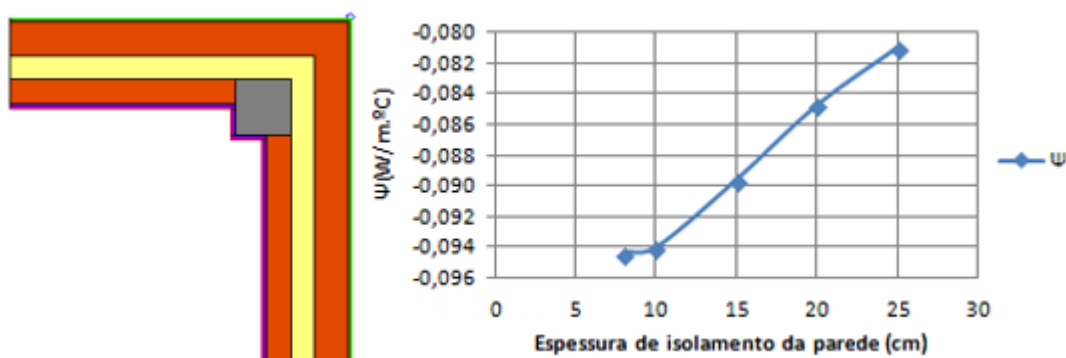


Figura 139. Variação do valor  $\Psi_e$  do pormenor construtivo da ligação entre duas paredes duplas (cunhal)

O comportamento característico neste tipo de pormenores vai de encontro ao que foi referido no primeiro capítulo. Segundo os estudos de Berggren & Wall (2013) e Corvacho (1996) o aumento da espessura de isolamento encontra-se associado a maior número de pontes térmicas devido ao efeito geométrico causado pelo aumento de isolamento, ou seja, maior área de transferência de energia.

#### 4.4.4. Análise gráfica da variação de $\Psi_e$ em função da espessura do isolamento térmico entre sistemas construtivos de paredes

Analisando graficamente cada pormenor construtivo relativamente a cada tipo de sistema de parede exterior, verificou-se que nas paredes duplas com isolamento na caixa de ar, à medida que a espessura de isolamento varia (aumenta) os valores do coeficiente de transmissão térmica linear  $\Psi_e$  tendem a aumentar. No entanto, esses valores situam-se geralmente abaixo dos limites impostos pela norma *Passivhaus*, excetuando-se os pormenores associados aos vãos envidraçados, ligação de fachada com pavimentos intermédios e todos os casos cujo valor de isolamento na parede ultrapassa os 15 cm. Relativamente ao sistema de parede isolada pelo exterior, o comportamento assinalado anteriormente apenas se verifica em três pormenores construtivos (ligação de fachada com laje de piso sobre desvão ventilado, ligação de fachada com cobertura inclinada (bordo lateral ou de empena) e a ligação fachada (caixa de estore)/padieira), sendo que na maioria dos casos os valores  $\Psi_e$  tendem a diminuir. Esta

análise vai de encontro ao estudo realizado por Berggren & Wall (2013), que mostra que os valores das pontes térmicas devem ser diferenciados pelo sistema de construção e pela quantidade de isolamento térmico. Na Figura 140 pode-se verificar um caso exemplificativo deste casos.

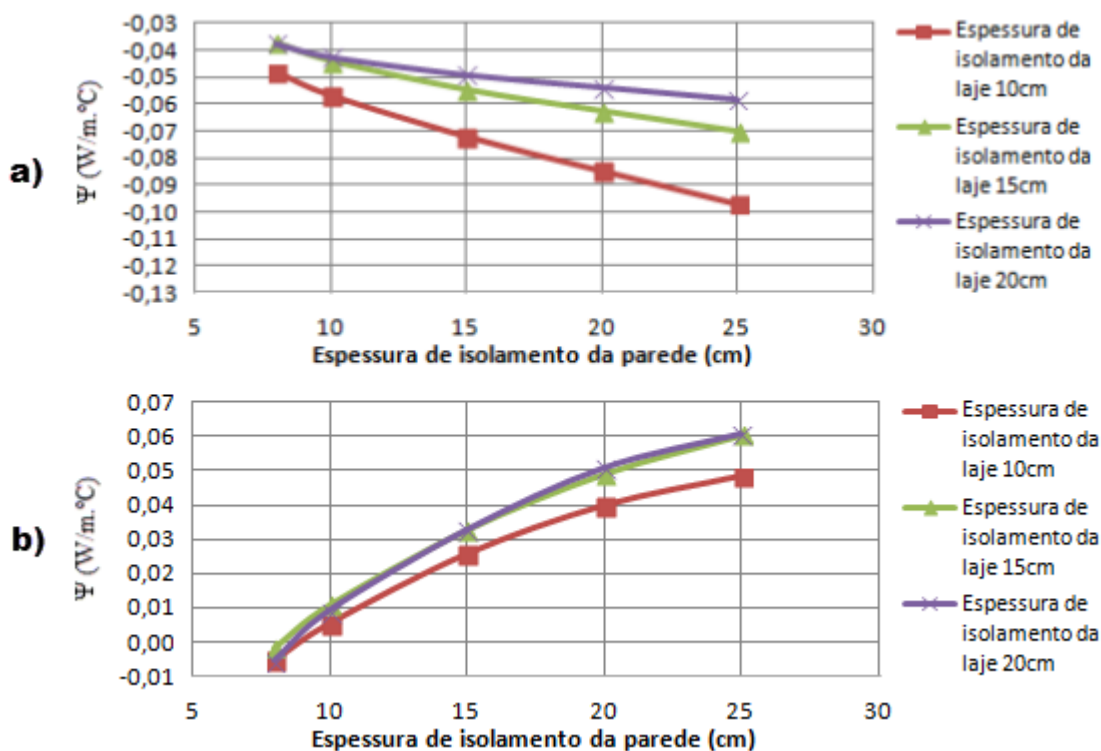


Figura 140. Variação do valor  $\Psi_e$  para a ligação de fachada com pavimentos térreos (ensoleiramento): a) Isolamento pelo exterior; b) Dupla

#### 4.4.5. Análise da influência da sobreposição do isolamento na caixilharia dos envidraçados

Analisando separadamente os dois sistemas construtivos, verificou-se para o sistema de paredes simples com isolamento pelo exterior, que a sobreposição do isolamento na zona lateral da caixilharia não traz grandes benefícios comparando com a situação em que não é sobreposto isolamento (isto para o tipo de caixilharia que se usou). O mesmo resultado é esperado para o sistema de paredes duplas. Segundo o estudo de Cappelletti et al. (2011) o isolamento sobre a caixilharia influencia o valor do coeficiente de transmissão térmica linear, ou seja, o parâmetro  $\Psi$  diminui com o correspondente aumento do isolamento sobre a caixilharia. No entanto, para esse estudo foi considerada uma caixilharia de batente, o que pode influenciar os resultados positivamente, dado que esta apresenta melhor desempenho térmico, face à caixilharia de folhas de correr. Na presente dissertação foi sempre usada a

mesma quantidade de isolamento sobreposta na caixilharia, 5cm, porque, devido à configuração geométrica e até por questões de funcionamento da caixilharia não era possível aumentar este valor. Os resultados analisados não vão ao encontro dos que constam nos estudos de Cappelletti et al. (2011) e ProKlima (n.d.). Apenas apresenta resultados semelhantes no que respeita à comparação do aumento do isolamento da parede com o valor de  $\Psi$ , ou seja, este parâmetro não apresenta variação significativa quando se aumenta o isolamento da parede, indo de encontro aos resultados de ProKlima (n.d.).

#### 4.4.6. Análise da variação de $\Psi$ , consoante a posição e espessura do isolamento térmico nas lajes

A análise da variação dos valores do coeficiente de transmissão térmica  $\Psi_e$  relativamente à posição e espessura de isolamento nas lajes apenas foi realizada para os pormenores das ligações de fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos e laje de piso sobre desvão ventilado. Os dois pormenores construtivos apresentam-se em contacto com espaço não aquecido. Analisando o gráfico da Figura 141 e considerando que esta análise se realizou, para a ligação de fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos, com espessura de isolamento na parede constante, de 10 cm, verificou-se que existe uma relação entre o aumento da espessura de isolamento na laje e o valor de  $\Psi_e$ . Esta relação significa que para maior quantidade de isolamento, também o valor de  $\Psi_e$  é maior, considerando a posição (sob ou sobre a laje) do isolamento. Esta relação verifica-se em ambos os pormenores assinalados, mesmo tendo em conta os dois sistemas construtivos de paredes e as várias espessuras de isolamento das paredes. No entanto, é possível observar que esta proporcionalidade não influencia o objetivo principal deste estudo, ou seja, o requisito *Passivhaus*,  $\Psi < 0,01$  W/(m.°C), é cumprido.

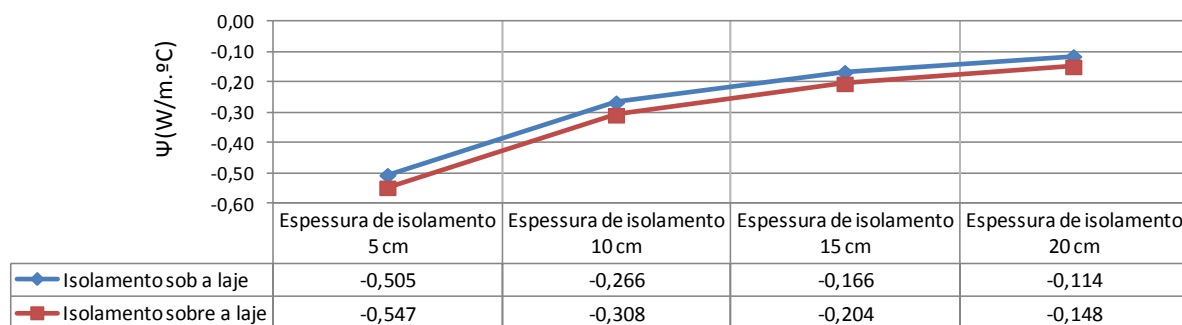


Figura 141. Relação entre a quantidade de isolamento e a sua posição na laje da ligação da fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos

Relativamente à posição do isolamento, para os dois pormenores estudados analisou-se graficamente a influência da posição do isolamento nas lajes, considerando 10 cm de isolamento nas paredes e 15 cm nas lajes. Os resultados são mostrados na Figura 142. Os pormenores A e B (ver Figura 94 e Figura 97) representam a ligação de fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos para o sistema de parede simples com isolamento pelo exterior e para o sistema de parede dupla com isolamento na caixa de ar, respetivamente. Os pormenores C e D (ver Figura 42 e Figura 45) representam a ligação de fachada com laje de piso sobre desvão ventilado para o sistema de parede simples com isolamento pelo exterior e para o sistema de parede dupla com isolamento na caixa de ar, respetivamente.

Verifica-se (ver Figura 142) que a posição que conduz a melhores resultados é quando o isolamento é colocado sobre a laje, verificando graficamente que a linha vermelha (isolamento sob a laje) se encontra sempre acima da linha azul (isolamento sobre a laje).

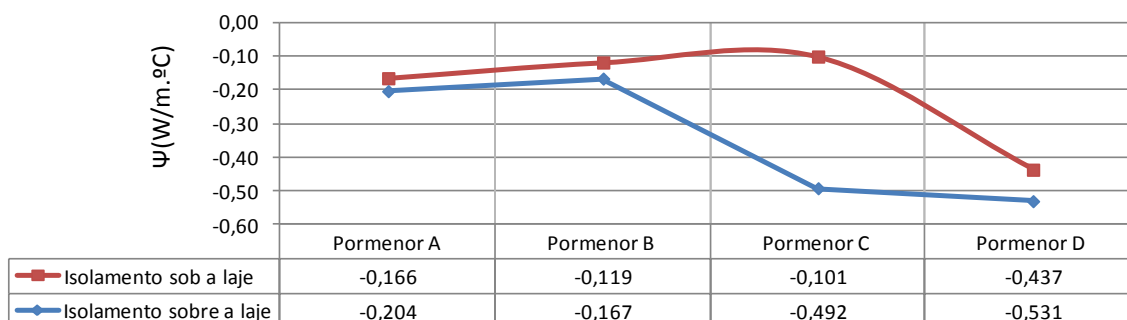


Figura 142. Análise do posicionamento do isolamento nas lajes

Estes resultados podem-se justificar pelo facto do isolamento sobre a laje conduzir a uma menor área de transferência de energia, logo a menores valores de  $\Psi$ .

## **CAPÍTULO 5**

Conclusões e perspectiva de trabalhos futuros

---

# **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E PERSPETIVA DE TRABALHOS FUTUROS**

- 5.1. Considerações finais
- 5.2. Síntese de resultados
- 5.3. Conclusões finais
- 5.4. Perspetiva de trabalhos futuros

## 5. CONCLUSÕES E PERSPETIVA DE TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. Considerações finais

Ao longo do trabalho foram sentidas algumas dificuldades, nomeadamente no que concerne à utilização do programa de modelação térmica. Dado o elevado custo deste tipo de programas optou-se pela utilização de um programa gratuito (THERM<sup>®</sup>). No entanto, este *software* peca por ser um pouco limitado nalgumas funcionalidades de trabalho e por não devolver diretamente o valor do parâmetro  $\Psi$ , obrigando posteriormente a um cálculo auxiliar e consequentemente a maior tempo de cálculo. Mas, o principal obstáculo associado ao programa foi, primeiramente, perceber como ele funcionava, principalmente quando são modeladas ligações em que existem mais do que dois diferenciais de temperatura e nas ligações em contacto com o solo. Para ultrapassar estas dificuldades foram fundamentais as ajudas dos desenvolvedores do programa e de outros autores que o usaram.

Outra das dificuldades sentidas foi no desenvolvimento dos pormenores construtivos associados ao sistema de construção de paredes duplas, garantindo a continuidade dessas ligações e também a compatibilização das ligações com os requisitos impostos pela norma *Passivhaus*.

O presente trabalho permitiu atingir os objetivos que foram propostos. Foi conseguido o estudo e o desenvolvimento dos pormenores construtivos de acordo com as soluções construtivas mais utilizadas em Portugal e ao mesmo tempo cumprir com as exigências do conceito *Passivhaus* quanto ao valor de  $\Psi$  (W/(m.°C)). Outro objetivo do trabalho era que este se torne um elemento importante para os projetistas, auxiliando-os no desenvolvimento dos projetos, a resolver e a minimizar/eliminar as pontes térmicas lineares das ligações entre elementos construtivos e também que sirva de apoio na formação das entidades executantes.

### 5.2. Síntese de resultados

A espessura do isolamento térmico nos edifícios é deveras importante no estudo das pontes térmicas. Após se efetuar o cálculo para obter o valor do coeficiente de transmissão térmica linear referente aos pormenores analisados, verificou-se que, ao realizar o estudo sobre o aumento da espessura de isolamento, não houve um comportamento semelhante perante tal aumento. Concluiu-se que tal aumento levaria a valores de  $\Psi$  superiores, inferiores ou mesmo semelhantes aos do ponto de partida, dependendo do pormenor em questão.

Outra das conclusões obtidas prende-se com a comparação entre coeficientes  $\Psi$  resultantes do melhoramento dos pormenores construtivos de acordo com a norma *Passivhaus* e aqueles que o RCCTE (2006) indica para o projeto térmico. Depois de se efetuar o cálculo para obter o valor do coeficiente de transmissão térmica linear medido pelo interior para se poder estabelecer um meio de comparação com os valores tabelados pelo RCCTE, conclui-se que, de facto, os valores estabelecidos no RCCTE, são valores que não representam, nem se aproximam da realidade *Passivhaus*, pois são valores maiores que os obtidos na presente dissertação. Apesar de não ser um dos objetivos do presente estudo é visível a necessidade da atualização das soluções construtivas correntemente empregues nos edifícios, sendo por isso espectável que a nova regulamentação que entrará em vigor em dezembro de 2013 tenha em conta a atualização dos valores do coeficiente de transmissão térmica. Também se pode concluir a diferença que existe entre fazer a avaliação das pontes térmicas medidas pelo interior e exterior. Quando medido pelo interior, o contributo das pontes térmicas para as perdas energéticas, considerando as mesmas características de cada tipo de ligação, é sempre superior, independentemente do sistema construtivo usado. Esta conclusão está de acordo com a obtida por outros autores em estudos análogos (Berggren & Wall, 2013).

Os valores do parâmetro  $\Psi_e$  obtidos neste trabalho permitem que seja cumprido um dos objetivos da presente dissertação, isto é, os resultados alcançados vêm demonstrar que é possível atingir valores de  $\Psi_e < 0,01 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ , estabelecidos pela norma *Passivhaus*, adequando os sistemas de construção praticados em Portugal. No entanto, existem tipos de ligações passíveis de melhoramentos futuros, dado não terem sido estudados todos os pormenores aplicáveis a um edifício e nem todos os estudados apresentarem resultados considerados ótimos (e.g. ligação de fachada com varanda). Concluiu-se assim, que uma avaliação mais rigorosa das pontes térmicas lineares visando menores valores do coeficiente de transmissão térmica linear, eleva o comportamento térmico dos edifícios, estando esta conclusão de acordo com a obtida por outro autor num estudo semelhante (Larbi, 2005).

Relativamente à oposição entre diferentes sistemas construtivos, analisados no capítulo anterior, chegou-se à mesma conclusão de Berggren & Wall (2013), podendo-se dizer que apesar dos valores das pontes térmicas, no geral, estarem dentro dos limites impostos pela norma *Passivhaus*, estes devem ser diferenciados de acordo com o sistema de construção e com a espessura de isolamento térmico aplicado. Também no estudo efetuado nesta dissertação, se deve prestar atenção a essa situação, pois cada caso é um caso e portanto a informação exposta deve sempre ter em conta os parâmetros aplicados.



Quanto aos resultados obtidos segundo o posicionamento do isolamento térmico, verifica-se que a posição que garante melhores resultados é a colocação do isolamento sobre a laje. Além da posição do isolamento sob a laje não ser a melhor solução quanto ao valor de  $\Psi$ , a execução da camada isolante nessas condições pode conduzir também a um aumento do trabalho de aplicação e conseqüentemente a um aumento de custos, bem como a sua execução levaria à utilização de fixação mecânica.

Após a avaliação dos pormenores relacionados com os vãos envidraçados verificou-se, para a caixilharia usada neste trabalho que o valor do coeficiente de transmissão térmica linear, quando se efetua o recobrimento da caixilharia com isolamento térmico, é aproximadamente igual ao valor obtido quando não se efetua esse recobrimento. Esta situação diverge da opinião de outros autores (Cappelletti et al., 2011; ProKlima, n.d.). Mas, em relação à variação da espessura de isolamento das paredes, os resultados deste trabalho foram análogos aos apresentados por ProKlima, (n.d.). No entanto, verifica-se para ambos os estudos, que os parâmetros de entrada não foram os mesmos, o que levará a que o parâmetro  $\Psi$  não se comporte da mesma forma.

No capítulo 5, além da apresentação dos resultados do cálculo realizado é possível ver que em cada pormenor construtivo é feita uma descrição dos procedimentos de execução de cada ligação, cumprindo por isso um dos objetivos da presente dissertação que era procurar auxiliar as entidades interessadas a construir sem pontes térmicas, e que o estudo constitui por isso um elemento importante para a formação dos executantes.

### 5.3. Conclusões finais

Neste estudo verificou-se que o valor do coeficiente de transmissão térmica linear  $\Psi$  depende, principalmente, do diferencial de isolamento térmico e da continuidade do mesmo, conforme aponta a norma *Passivhaus*. Para garantir edifícios livres de pontes térmicas, assim como a manutenção de bons níveis de conforto térmico, não basta proceder a um isolamento eficaz das zonas correntes dos elementos da envolvente, ignorando o efeito das zonas de pontes térmicas, pois ficou demonstrado que há situações em que quanto maior for a espessura do isolamento maior será a importância das pontes térmicas para as perdas energéticas pela envolvente.

Ao longo do trabalho, nomeadamente da pesquisa bibliográfica, percebeu-se que na conceção de edifícios deve-se valorizar cada vez mais os aspetos funcionais e de eficiência energética, devendo dar primazia às soluções passivas em detrimento das ativas.

Acredita-se que para os edifícios, os estudos deste tipo contribuem de forma significativa para o conhecimento das soluções que minimizam as perdas energéticas, incentivando a procura e desenvolvimento de soluções construtivas mais eficazes.

#### **5.4. Perspetiva de trabalhos futuros**

Após a realização deste trabalho e mediante as conclusões dele retiradas, ressaltam possíveis áreas de investigação a realizar. No que se refere à avaliação dos sistemas construtivos, recomenda-se o estudo dos pormenores construtivos ligados ao sistema de construção de madeira e *light steel frame*. Apesar de pouco utilizados em Portugal existem já muitas empresas a construir com estes sistemas. Além disso, são sistemas que se adaptam facilmente às exigências da norma *Passivhaus*.

Outras das hipóteses de estudo diz respeito à envolvente envidraçada, recomendando-se um estudo mais detalhado de ligações entre a caixilharia e a parede de fachada que proponha várias soluções para diferentes sistemas construtivos. Nomeadamente, a questão do comportamento de sistemas de janelas de correr ou de batente devem ser analisadas.

A nível estrutural os pormenores construtivos não foram estudados, recomendando-se essencialmente, o estudo sobre a aplicação de elementos de corte térmico consoante a espessura dos mesmos, para garantir a continuidade total da camada isolante, sob o ponto de vista de resistência estrutural.

A aplicação da norma *Passivhaus* nos países nórdicos e centro da Europa já foi estudada para os edifícios antigos, seria importante efetuar o estudo das pontes térmicas lineares na reabilitação de edifícios antigos em Portugal, aplicando os requisitos dessa norma.

## **CAPÍTULO 6**

Pesquisa bibliográfica

---



## 6. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

- Almeida, E. S. S. (2013). *Casas Passivas: Conceito Passivhaus em climas mediterrâneos*. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Barreirinhas. (n.d.). Stormax Evo - caixa de estore. Retirado de [http://www.barreirinhas.pt/images/djcatalog\\_files/barreirinhas\\_stormax\\_en.pdf](http://www.barreirinhas.pt/images/djcatalog_files/barreirinhas_stormax_en.pdf)
- Beinhauer, P. (2012). *Atlas de detalhes construtivos - construção nova: com mais de 400 pormenores*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Berggren, B., & Wall, M. (2013). Calculation of thermal bridges in (Nordic) building envelopes – Risk of performance failure due to inconsistent use of methodology. *Energy and Buildings*, 65(0), 331-339. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.021>
- Brandão, N. C. (2008). *Análise de Soluções Construtivas e Tecnológicas para Edifícios Passivos em Portugal*. Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Camelo, S., Santos, C., Ramalho, Á., Horta, C., Gonçalves, H., & Maldonado, E. (2006). Manual de apoio à aplicação do RCCTE. H. Gonçalves & E. Maldonado (Eds.), Retirado de [http://www.esferovite.pt/pdf/2006\\_ManualApoioAplica%C3%A7%C3%A3oRCCTE.pdf](http://www.esferovite.pt/pdf/2006_ManualApoioAplica%C3%A7%C3%A3oRCCTE.pdf)
- Cappelletti, F., Gasparella, A., Romagnoni, P., & Baggio, P. (2011). Analysis of the influence of installation thermal bridges on windows performance: The case of clay block walls. *Energy and Buildings*, 43(6), 1435-1442. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.004>
- Cardoso, F., & Ascenso, R. (2011). As novas casas passivas. *Revista Climatização*, N° 77 (set./out. 2011).
- Carlos, J. S., & Nepomuceno, M. C. S. (2012). A simple methodology to predict heating load at an early design stage of dwellings. *Energy and Buildings*, 55(0), 198-207. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.033>
- Corvacho, M. H. P. (1996). *Pontes térmicas: análise e propostas de soluções*. Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Corvacho, M. H. P. (1999). Catálogo de pontes térmicas. Nota de informação técnica (3ª ed.): Laboratório de Física das Construções (LFC).
- Decreto-Lei nº118/2013. Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).
- Déqué, F., Ollivier, F., & Roux, J. J. (2001). Effect of 2D modelling of thermal bridges on the energy performance of buildings: Numerical application on the Matisse apartment. *Energy and Buildings*, 33(6), 583-587. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00128-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00128-6)

- DGEG. (2012). Energia em Portugal. *Direcção Geral de Energia e Geologia*. Retirado a 11 novembro 2012, de <http://www.dgeg.pt/>
- DIN V 18599-2. (2007). Energy efficiency of buildings - Calculation of the energy needs, delivered energy and primary energy for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting. Part 2: Energy needs for heating and cooling of building zones.
- Dow. (2013). Soluções Dow para a Construção Retirado a 20 de agosto, 2013, de <http://building.dow.com/europe/pt/>
- EN ISO 6946. (2007). Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – calculation method.
- EN ISO 10211. (2007). Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations.
- EN ISO 13789. (2007). Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients.
- EN ISO 14683. (2005). Thermal bridges in building construction – linear thermal transmittance – simplified methods and default values.
- ENSINGER. (2011). Thermix. *Warm-edge spacers for insulating glass*. Retirado a 10 junho 2013, de <http://www.thermix.de/en/home.html>
- EPBD. (2010). Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). *Jornal Oficial da União Europeia, 2010*.
- Erhorn, H., Erhorn-Kluttig, H., Citterio, M., Cocco, M., Orshoven, D. v., Tilmans, A., . . . Rose, J. (2010). An effective Handling of Thermal Bridges in the EPBD Context (ASIEPI report).
- Feist, W. (2006). 15th Anniversary of the Darmstadt - Kranichstein Passive House. Retirado a 15 outubro 2012, de [http://www.passivhaustagung.de/Kran/First\\_Passive\\_House\\_Kranichstein\\_en.html](http://www.passivhaustagung.de/Kran/First_Passive_House_Kranichstein_en.html)
- Ferreira, J., & Pinheiro, M. (2011). In search of better energy performance in the Portuguese buildings—The case of the Portuguese regulation. *Energy Policy*, 39(12), 7666-7683. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.062>
- GmbH, I. (2002). Wärmebrückenkatalog. Retirado de <http://www.awaso.ch/awaweb/60energie/7.5.pdf>
- Gonçalves, H., & Brotas, L. (2007). A Norma Passivhaus em Climas Quentes da Europa: Diretrizes de Projecto para Casa Confortáveis de Baixo Consumo Energético. *Passive-on*. Retirado a 17 outubro 2012, de <http://www.passive-on.org>
- Grangeia, R. M. C. (2013). *Passivhaus em Portugal: Viabilidade Económica*. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.

- Guedes, M. P. (2009). Arquitetura e Sustentabilidade. *Localização, implantação, forma e orientação da construção no terreno*. Retirado a 25 outubro 2012, de <http://www.arquitecturaesustentabilidade.com/>
- Huizenga, C., Dariush K. Arasteh, P. E., Finlayson, E., Mitchell, R., Griffith, B., & Dragan Curcija, P. D. (1999). Teaching Students About Two-Dimensional Heat Transfer Effects in Buildings, Building Components, Equipment, and Appliances Using THERM 2.0. Vol. 105. Retirado de <http://windows.lbl.gov/software/therm/Docs/TeachingStudentsAbout2DHeatTransferUsingTherm2.0.pdf>
- INE. (2012). Censos 2011. *Resultados definitivos*. Retirado a 20 outubro 2012, de [http://www.ine.pt/scripts/flex\\_definitivos/Main.html](http://www.ine.pt/scripts/flex_definitivos/Main.html)
- INE, & DGEG. (2011). Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010. Retirado a 20 outubro 2012, de [www.ine.pt](http://www.ine.pt)
- IPHA. (2010). Active for more comfort: The Passive House. International Passive House Association, Rheinstraße (Ed.) Retirado a 20 outubro 2012, de [www.passivehouse-international.org](http://www.passivehouse-international.org)
- ISO 10077-2. (2012). Thermal performance of windows, door and shutters - Calculation of thermal transmittance. Part 2: Numerical method for frames.
- ISO 13370. (2007). Thermal performance of buildings - Heat transfer via the ground - Calculation methods.
- ITeCons. (2011). Catálogo de Pontes Térmicas Lineares. Retirado a 23 abril 2013, de <http://www.itecons.uc.pt/catalogoptl/index.php?module=catlg>
- Kehl, D. (2008). Wärmebrücken im Holzbau. D. Kehl (Ed.). Retirado a 15 janeiro 2013, de <http://holzbauphysik.de/>
- Labrincha, J., Samagaio, A., & Vicente, R. (2006). Associação para o Desenvolvimento da Casa do Futuro. *Sub Projecto de Isolamento Térmico - 1º Relatório de Progresso*. Retirado de <http://www.aveirodomus.pt/resources/xFiles/scContentDeployer/docs/Doc266.pdf>
- Larbi, A. B. (2005). Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings. *Energy and Buildings*, 37(9), 945-951. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.013>
- LBNL. (2011). THERM 6.3 / WINDOW 6.3 NFRC Simulation Manual. L. B. N. Laboratory (Ed.). Retirado de [http://c.yimcdn.com/sites/www.nfrccommunity.org/resource/resmgr/technical\\_documents/nfrcsim6.3-2011-12-manual.pdf](http://c.yimcdn.com/sites/www.nfrccommunity.org/resource/resmgr/technical_documents/nfrcsim6.3-2011-12-manual.pdf)
- Marcelino, J., & Gavião, J. (2012). A construção das primeiras Passive House em Portugal (Ílhavo). Homegrid (Ed.) *O caminho para a autonomia de elevado nível*. Retirado a 17 novembro 2012, de <http://www.homegrid.pt/>

- Mcgowan, A. G., & Desjarlais, A. O. (1997). Investigation of common thermal bridges in walls. *ASHRAE Transactions*, 103.
- McLeod, R., Mead, K., & Standen, M. (2012). *Passivhaus primer: Designer's guide. A guide for the design team and local authorities*. Retirado a 17 outubro 2012, de [www.passivhaus.org.uk](http://www.passivhaus.org.uk)
- Mendes, P. A. S. (2011). *Impermeabilização de fundações de edifícios e estruturas especiais*. Universidade Técnica de Lisboa. Retirado de <http://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/1039570/1/Dissertacao%20Paula%20Mendes.pdf>
- Oliveira Panão, M. J. N., Camelo, S. M. L., & Gonçalves, H. J. P. (2011). Assessment of the Portuguese building thermal code: Newly revised requirements for cooling energy needs used to prevent the overheating of buildings in the summer. *Energy*, 36(5), 3262-3271. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.018>
- Passipedia. (2012). The Passive House resource. Retirado a 26 outubro 2012, de <http://www.passipedia.org/>
- Passive-on project. (2007). Passive House or Passivhaus? Retirado de <http://www.passive-on.org/CD/5.%20Long%20Description/Passive-On%20-%20Long%20Description%20-%20English.pdf>
- Pechincha, J. P. S. (2011). *Avaliação do impacte das pontes térmicas no desempenho térmico dos edifícios do Campus da FCT/UNL – análise experimental*. Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.
- Pfluger, R., Schnieders, J., Kaufmann, B., & Feist, W. (2003). *Bauphysikalische Untersuchungen und Optimierung des Baukörperanschlusses: Teilbericht Passivhaus Institut*.
- PHi. (2012). Passive House Institute. *The independent institute for outstanding energy efficiency in buildings*. Retirado a 5 outubro 2012, de <http://www.passiv.de/>
- Pina, C. (2007). Evolução das soluções de paredes face a novas exigências regulamentares. Retirado de [http://www.civil.uminho.pt/masonry/publications/alvenaria\\_2007/041\\_064.pdf](http://www.civil.uminho.pt/masonry/publications/alvenaria_2007/041_064.pdf)
- ProKlima. (n.d.). Wärmebrückenkatalog für sanierte Altbauten. Retirado a 10 março 2013, 2013, de <http://www.baudetails.info/mainframe/detail-start.htm>
- PZE-PP. (2013). O que é a PassivHaus? *Princípios*. Retirado a 5 maio 2013, de <http://www.passivhauszero-energy.com/passivhaus.php>
- RCCTE. (2006). Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. *Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 Abril*.
- Schild, P. G. (2010). Good Building Practice to avoid Thermal Bridges. ASIEPI (Ed.) Retirado de [http://www.asiepi.eu/fileadmin/files/WebEvents/WebEvent\\_4.2/ASIEPI\\_WP4\\_WebEvent2\\_02\\_Good\\_Practice\\_Guidance.pdf](http://www.asiepi.eu/fileadmin/files/WebEvents/WebEvent_4.2/ASIEPI_WP4_WebEvent2_02_Good_Practice_Guidance.pdf)



- Schnieders, J. (2009). Passive Houses in South West Europe. *PassivHaus Institut*. Retirado a 15 outubro 2012, de <http://www.passiv.de/>
- Schnieders, J., & Hermelink, A. (2006). CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building. *Energy Policy*, 34(2), 151-171. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2004.08.049>
- Schurr, J., Endhardt, M., & Kaufmann, B. (2012). Passive House Design. *Building envelope*
- Silva, J. M., & Abrantes, V. (2007). Patologias em paredes de alvenaria: causas e soluções. Retirado de [http://www.civil.uminho.pt/masonry/publications/alvenaria\\_2007/065\\_084.pdf](http://www.civil.uminho.pt/masonry/publications/alvenaria_2007/065_084.pdf)
- Theodosiou, T. G., & Papadopoulos, A. M. (2008). The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. *Energy and Buildings*, 40(11), 2083-2089. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.006>
- Valério, J. G. M. A. P. (2007). *Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e Energético de Edifícios Residenciais Correntes*. Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.
- Van Den Bergh, S., Hart, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2013). Window spacers and edge seals in insulating glass units: A state-of-the-art review and future perspectives. *Energy and Buildings*, 58(0), 263-280. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.006>
- Vicente, R. (2002). *Patologia das paredes de fachada: estudo do comportamento mecânico das paredes de fachada com correção exterior das pontes térmicas*. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.
- Vicente, R. (2010). Projeto e execução de alvenarias, exigências, comportamento mecânico, pontes térmicas e anomalias. *Apontamentos de Tecnologias da construção*
- Vicente, R., Rodrigues, F., Alves, A., Silva, T., Lamas, F., Guedes, M., Figueiredo, A., Nunes, L., Almeida, E., Grangeia, R., & Oliveira, R. (2013). *1º Curso PassivHaus para Portugal*. Envolvente do edifício Passive House. PassivHaus Zero-Energy – Plataforma Portuguesa.
- Weber, S. G. (2013). O guia Weber 2013. Saint-GobainWeber (Ed.). Retirado de [http://www.frameav.com/Guia\\_Weber\\_2013.pdf](http://www.frameav.com/Guia_Weber_2013.pdf)



# **ANEXOS**

---

## **ANEXOS**

Anexo A – Representação dos cortes e outras informações da caixilharia EC Vekaslide

Anexo B – Características dos vidros e da caixa de estore

Anexo C – Características técnicas do elemento de corte térmico Schock Isokorb tipo O

Anexo D – Características técnicas do elemento de corte térmico Ancon – Isolan MV

Anexo E – Características técnicas do elemento de corte térmico Ancon – Isolan FD

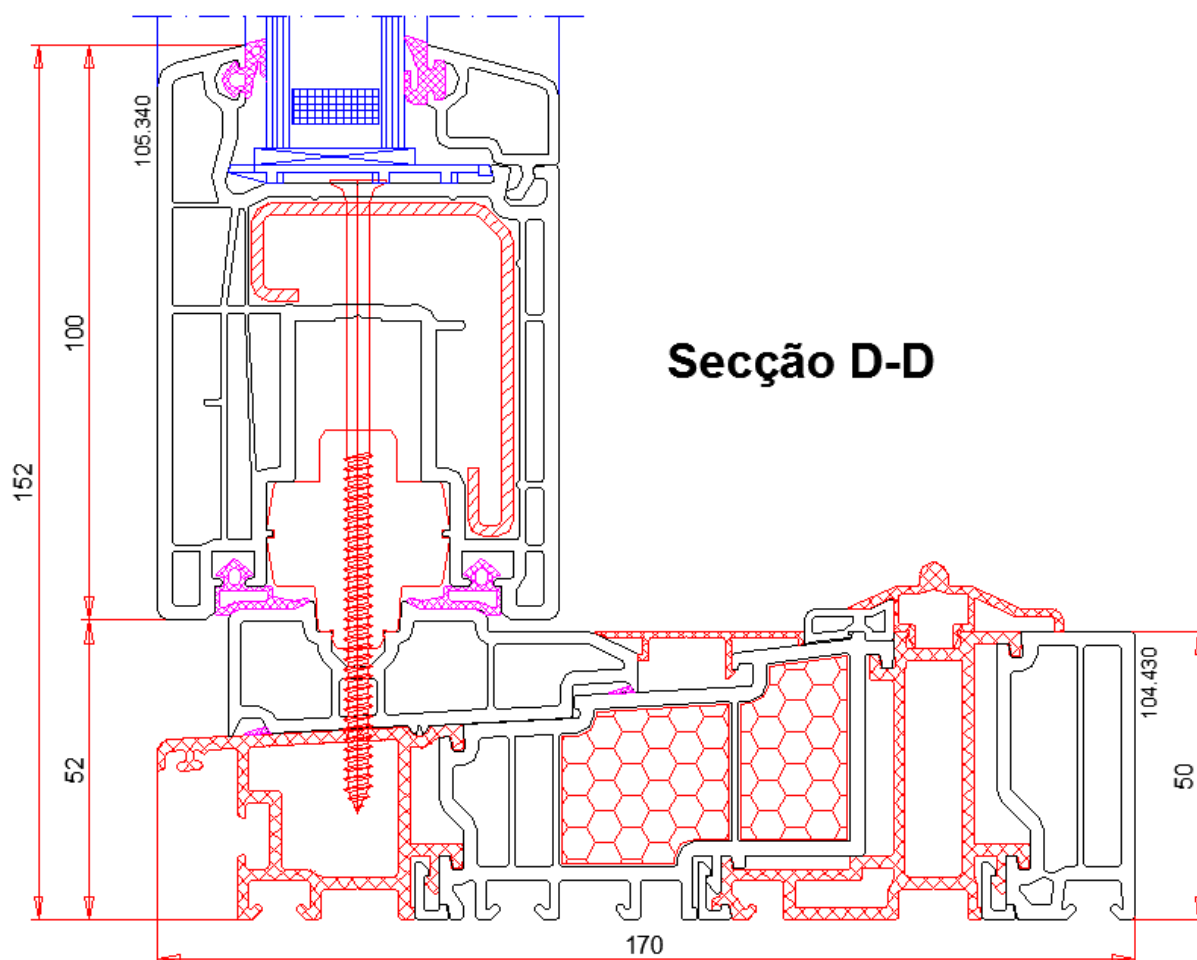
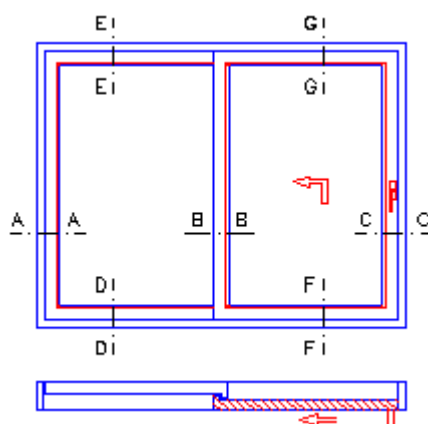
Anexo F – Características técnicas do elemento de corte térmico Schock Isokorb tipo F

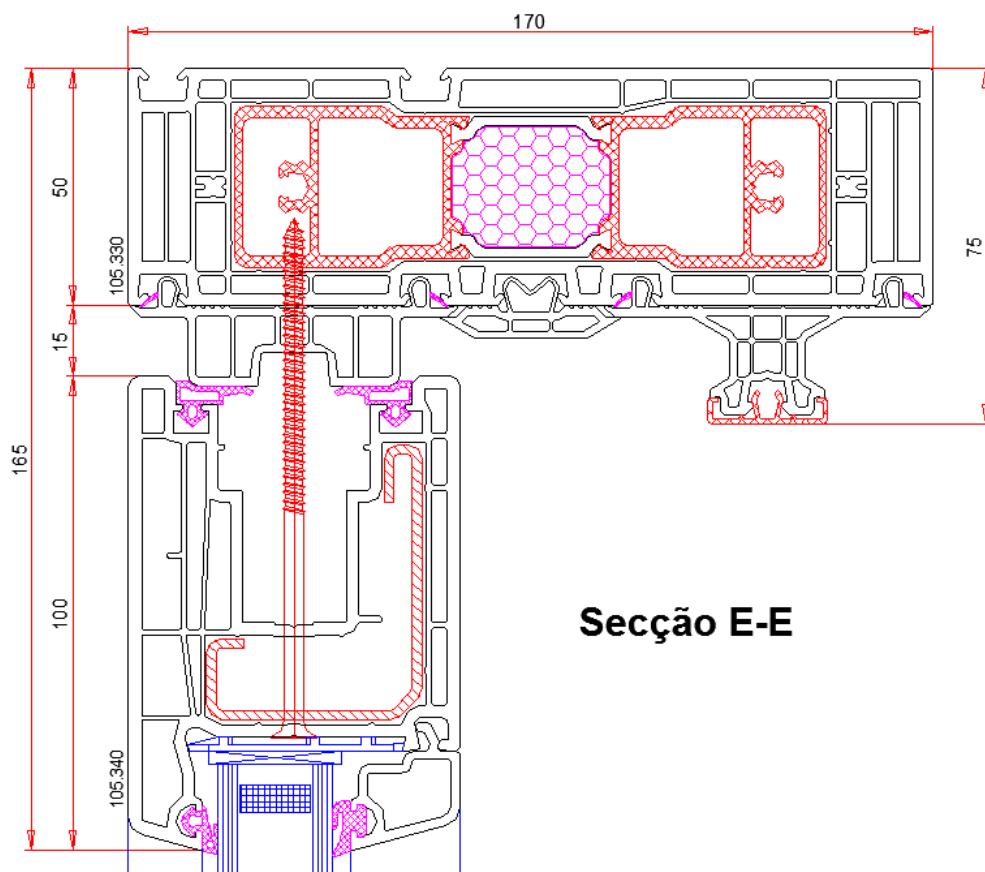
Anexo G – Resumo dos resultados para os valores  $\Psi$  de ambos os métodos de medição

Anexo H – Representação gráfica do parâmetro  $\Psi_i$  em função das espessuras de isolamento das ligações

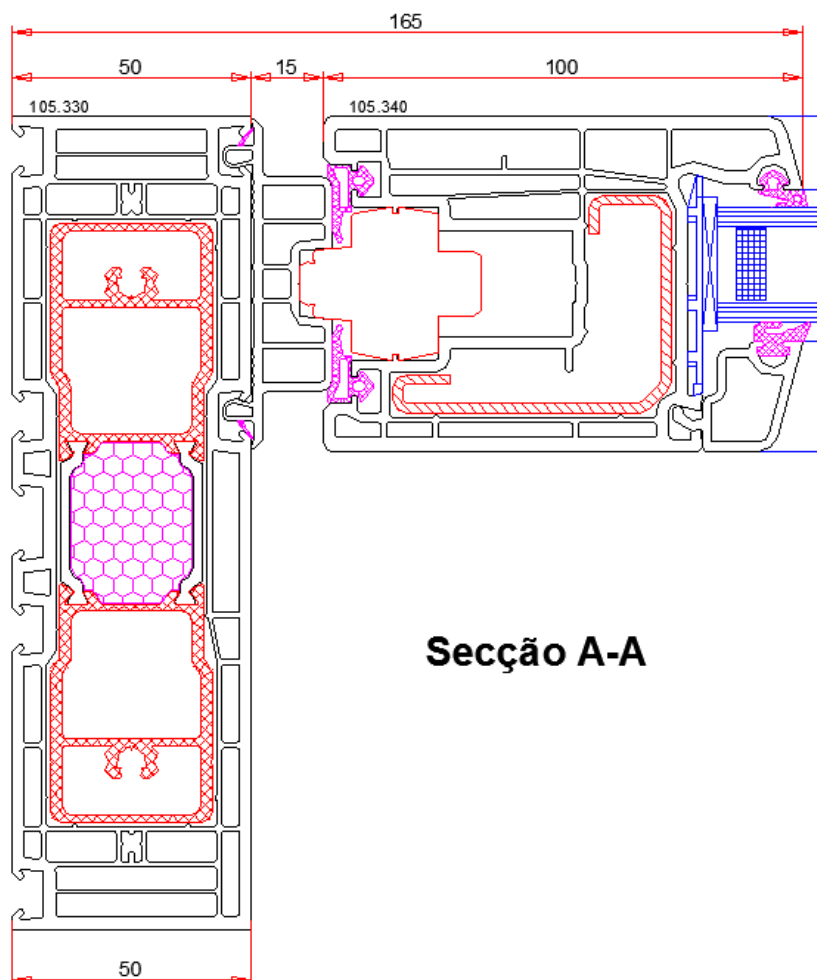
## ANEXO A – REPRESENTAÇÃO DOS CORTES E OUTRAS INFORMAÇÕES DA CAIXILHARIA EC VEKASLIDE

Outras informações acerca das características técnicas deste sistema, ver o link, <http://www.veka.es/archivos/publicaciones/Sistema-EC-VEKASLIDE-portugues.pdf>





**Secção E-E**



**Secção A-A**

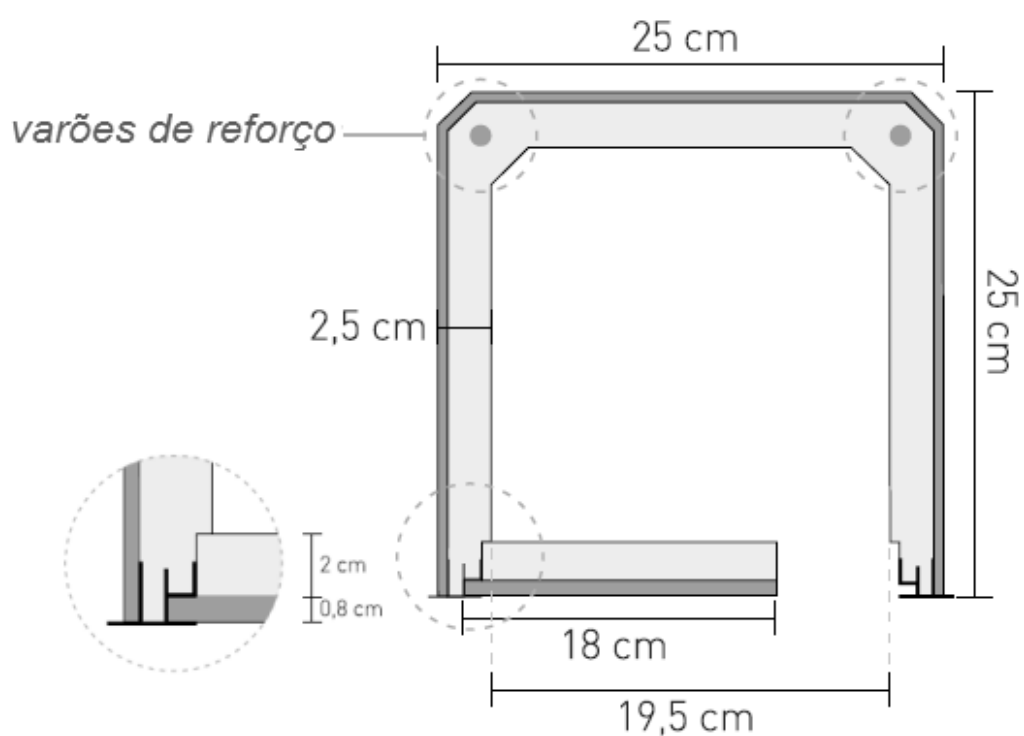
## ANEXO B – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS VIDROS E DA CAIXA DE ESTORE

### Características dos vidros:

SGG PLANITHERM TOTAL 1.3

SGG PLANITHERM TOTAL 1.3		SGG PLANILUX			
External pane		SGG PLANITHERM TOTAL 1.3			
Internal pane		SGG PLANILUX			
Composition	mm	4 (12) 4	4 (16) 4	6 (12) 6	6 (16) 6
Thickness	mm	20	24	24	28
Weight	kg/m <sup>2</sup>	20	20	30	30
Low-E coating position	face	3	3	3	3
Light factor					
LT	%	77	77	75	75
LRe	%	11	11	11	11
LRi	%	12	12	11	11
UV	%	35	35	30	30
Energy factor					
T	%	54	54	50	50
Re	%	20	20	18	18
A1	%	12	12	17	17
A2	%	14	14	15	15
Solar factor g		0,66	0,66	0,63	0,63
Shading Coefficient		0,76	0,76	0,72	0,73
U-vlaue		W/(m <sup>2</sup> .K)			
Air		1,8	1,5	1,8	1,5
Argon 90 %		1,5	1,3	1,5	1,3

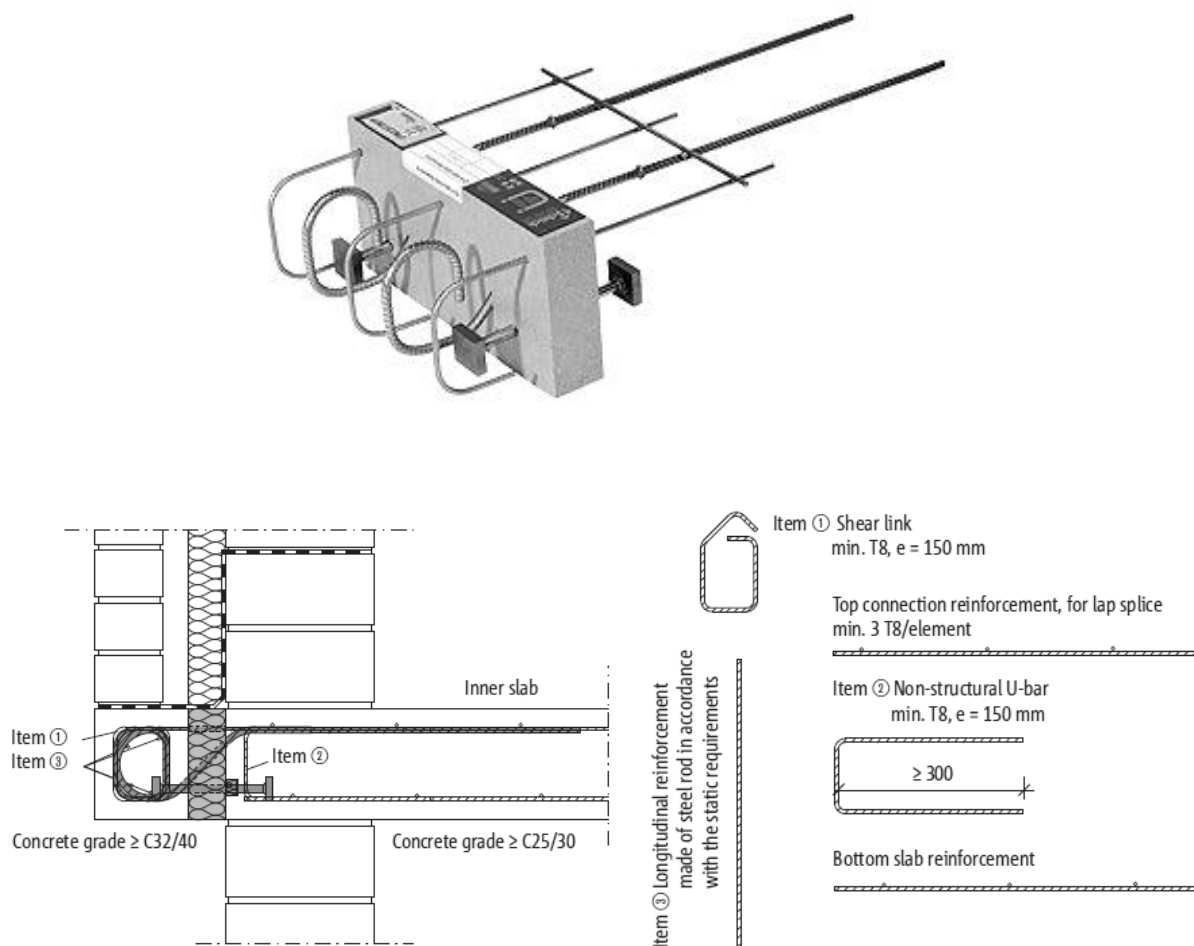
### Características geométricas da caixa de estore:







## ANEXO C – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO ELEMENTO DE CORTE TÉRMICO SCHOCK ISOKORB TIPO O



### **Instruções de instalação:**

Instalar a armadura inferior na laje interior com o bordo de extremidade do número 2.

Instalar e alinhar o elemento Schöck Isokorb tipo O. A armadura de distribuição do elemento pode ser cortada completamente.

Instalar a armadura superior da laje interior e amarrar aos varões do elemento.

Posicionar o isolamento térmico no local da ponte térmica.

Instalar a armadura da saliência da laje (números 1 e 2).

Durante a betonagem é importante garantir que a posição do elemento Schöck Isokorb está segura.

Mais informações em <http://www.schock-us.com>



## ANEXO D – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO ELEMENTO DE CORTE TÉRMICO ANCON – ISOLAN MV



### **Características:**

Estes elementos de ligação são utilizados para ligar consolas às lajes interiores.

Os elementos do tipo MV ajudam a minimizar a ponte térmica e a dar continuidade ao isolamento térmico.

O sistema padrão compreende isolamento rígido de poliestireno sem CFC's e armadura de aço inoxidável. Este sistema está disponível para espessuras de consolas de 160, 180, 200, 220 e 240 mm, sendo utilizado para a transferência de momentos e dos esforços transversos.

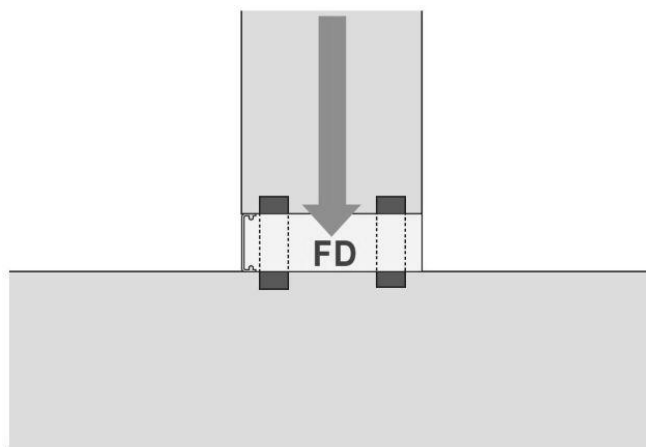
Podem ser fabricados elementos com configurações especiais para atender às necessidades específicas de projeto, incluindo varandas escalonadas ou curvas.

Mais informações em:

<http://services.ribae.com/nbsproductdata/NBSPlusProduct.aspx?manufacturer=Ancon&name=BalconyConnectorsIsolanFD.xml&showHeader=False&FromManWS=True%20target=blank> e <http://www.cortartec.net>



## ANEXO E – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO ELEMENTO DE CORTE TÉRMICO ANCON – ISOLAN FD



### **Características:**

Estes elementos de ligação são utilizados para fazer a ligação entre elementos verticais e horizontais.

Os elementos do tipo FD ajudam a minimizar a ponte térmica e a dar continuidade ao isolamento térmico.

O sistema padrão compreende isolamento rígido de poliestireno sem CFC's e armadura de aço inoxidável. Este sistema está disponível para larguras de 160, 180, 200, 220 e 240 mm, sendo utilizado para a transferência de esforços de compressão.

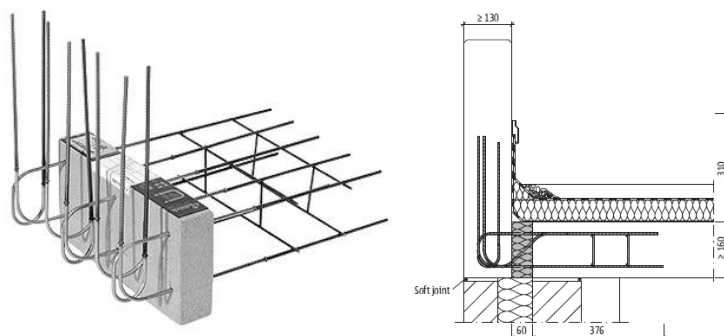
Podem ser fabricados elementos com configurações especiais para atender às necessidades específicas de projeto.

Mais informações em:

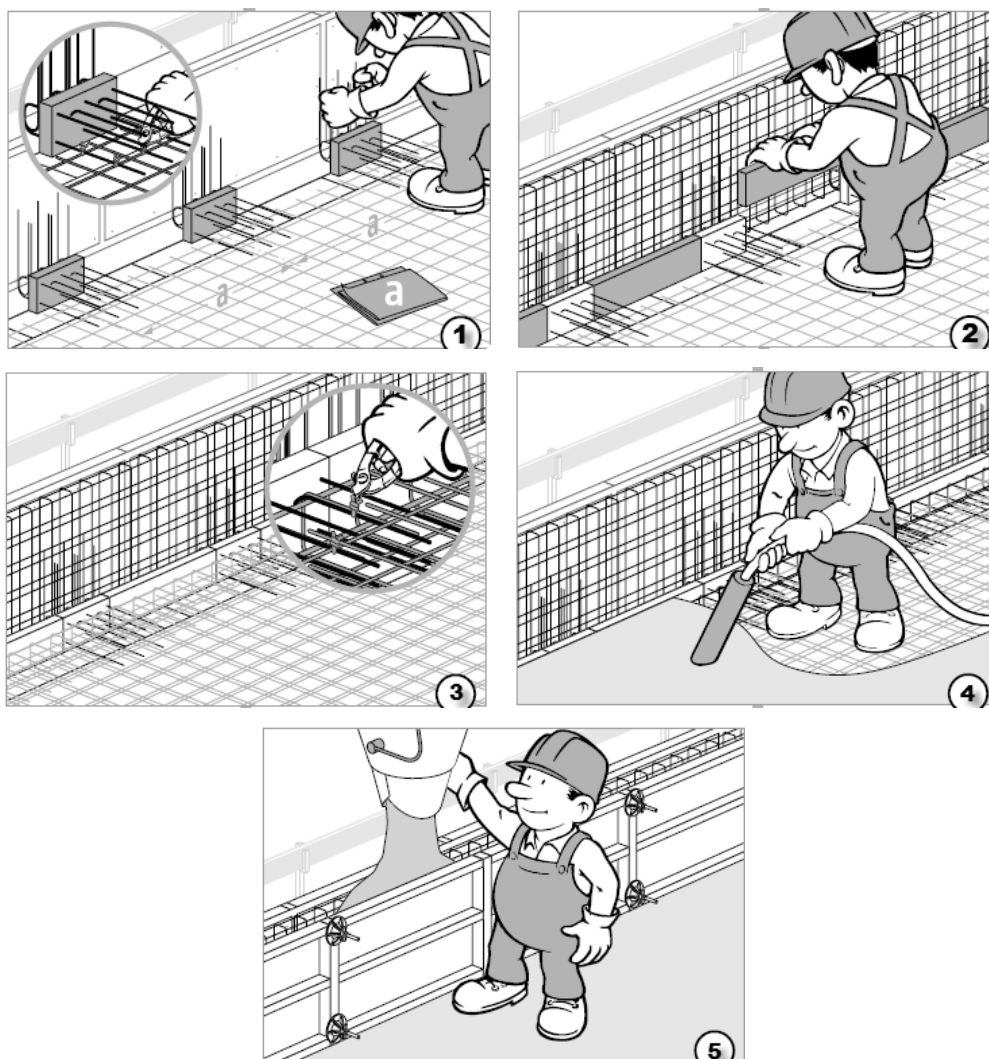
<http://services.ribae.com/nbsproductdata/NBSPlusProduct.aspx?manufacturer=Ancon&name=BalconyConnectorsIsolanFD.xml&showHeader=False&FromManWS=True%20target=blank> e <http://www.cortartec.net>



## ANEXO F – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO ELEMENTO DE CORTE TÉRMICO SCHOCK ISOKORB TIPO F



### Instruções de instalação:



Mais informações em <http://www.schock-us.com>





## ANEXO G – RESUMO DOS RESULTADOS PARA OS VALORES $\Psi$ DE AMBOS OS MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Tabela resumo dos valores  $\Psi$  para ambos os métodos de medição, tendo em conta 10 cm de espessura de isolamento nas paredes exteriores e 15 cm nas lajes.

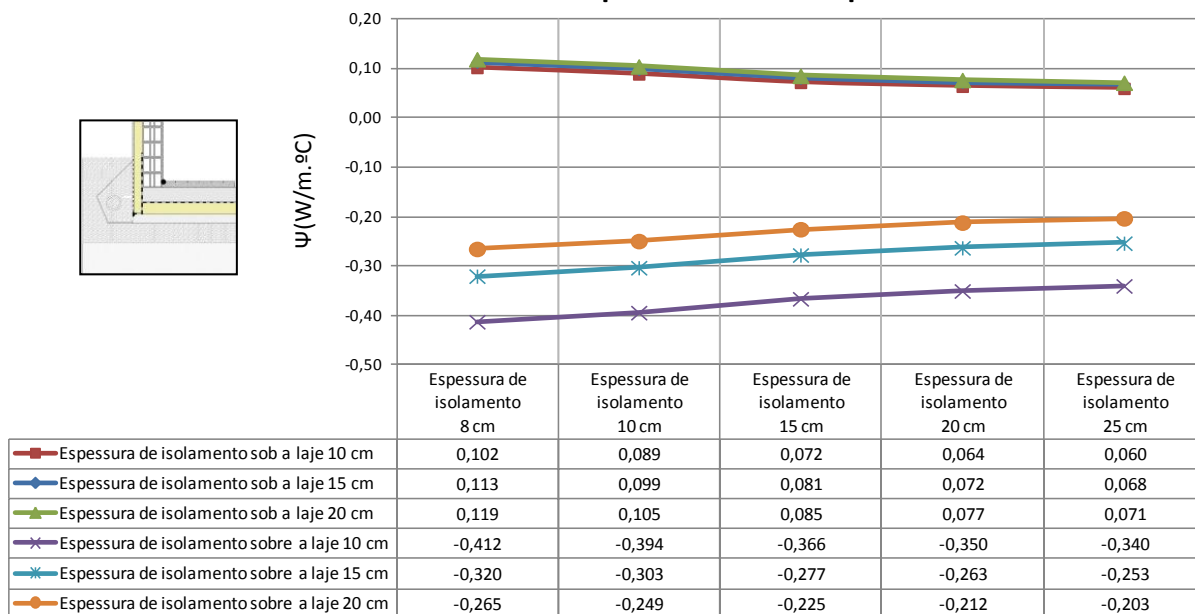
Pormenor construtivo	Parede	$\Psi_e$	$\Psi_i$
Ligação da fachada com laje de piso sobre desvão ventilado	Iso. Ext.	-0,101	0,099
	Dupla	-0,437	-0,261
Ligação de fachada com pavimentos térreos (ensoleiramento)	Iso. Ext.	-0,044	0,153
	Dupla	0,011	0,174
Ligação de parede interior com pavimentos térreos (ensoleiramento)	Iso. Ext.	-0,002	0,053
	Dupla		
Ligação fachada/padieira	Iso. Ext.	0,030	0,030
	Dupla	0,039	0,039
Ligação fachada (caixa de estore)/padieira	Iso. Ext.	0,088	0,088
	Dupla	0,066	0,066
Ligações fachada/peitoril (pedra natural)	Iso. Ext.	0,035	0,035
	Dupla	0,020	0,020
Ligações fachada/peitoril (metálico)	Iso. Ext.	0,033	0,033
	Dupla	0,020	0,020
Ligações fachada/ombreira	Iso. Ext.	0,083	0,083
	Dupla	0,068	0,068
Ligação da fachada com varanda	Iso. Ext.	0,092	0,177
	Dupla	0,083	0,202
Ligação da fachada com pavimentos intermédios	Iso. Ext.	0,057	0,142
	Dupla	0,091	0,219
Ligação da fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos	Iso. Ext.	-0,166	0,033
	Dupla	-0,119	0,062
Ligação de paredes interiores com pavimentos sobre locais não aquecidos	Iso. Ext.	-0,004	0,046
	Dupla		
Ligação entre duas paredes verticais (cunhal)	Iso. Ext.	-0,042	0,152
	Dupla	-0,094	0,188
Ligação da fachada com cobertura plana (sem platibanda)	Iso. Ext.	-0,001	0,200
	Dupla	-0,009	0,163
Ligação da fachada com terraço (com platibanda)	Iso. Ext.	-0,002	0,198
	Dupla	-0,007	0,164
Ligação da fachada com cobertura inclinada (bordo lateral ou de empena)	Iso. Ext.	0,006	0,193
	Dupla	0,012	0,237
Ligação da fachada com cobertura inclinada (beiral)	Iso. Ext.	0,011	0,174
	Dupla	-0,017	0,246
Ligação entre duas lajes de cobertura inclinada (cumeeira)	Iso. Ext.	-0,032	0,055
	Dupla		



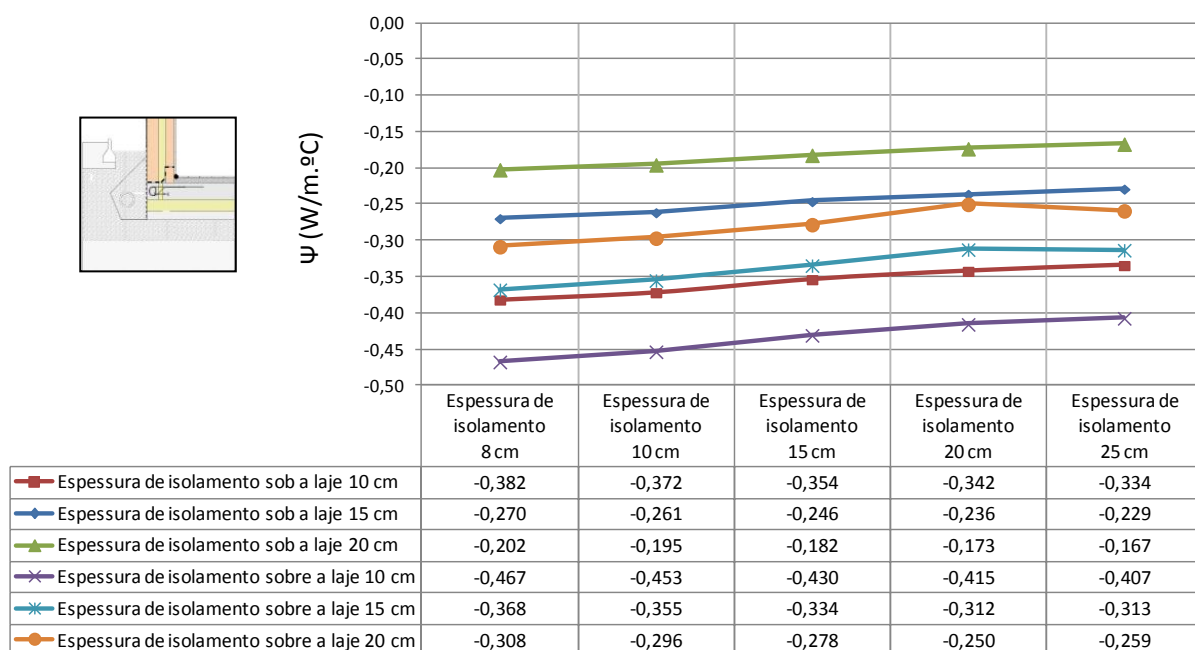
# ANEXO H – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PARÂMETRO $\Psi_I$ EM FUNÇÃO DAS ESPESSURAS DE ISOLAMENTO DAS LIGAÇÕES

## Ligação de fachada com laje de piso sobre desvão ventilado

Parede simples - Isolamento pelo exterior

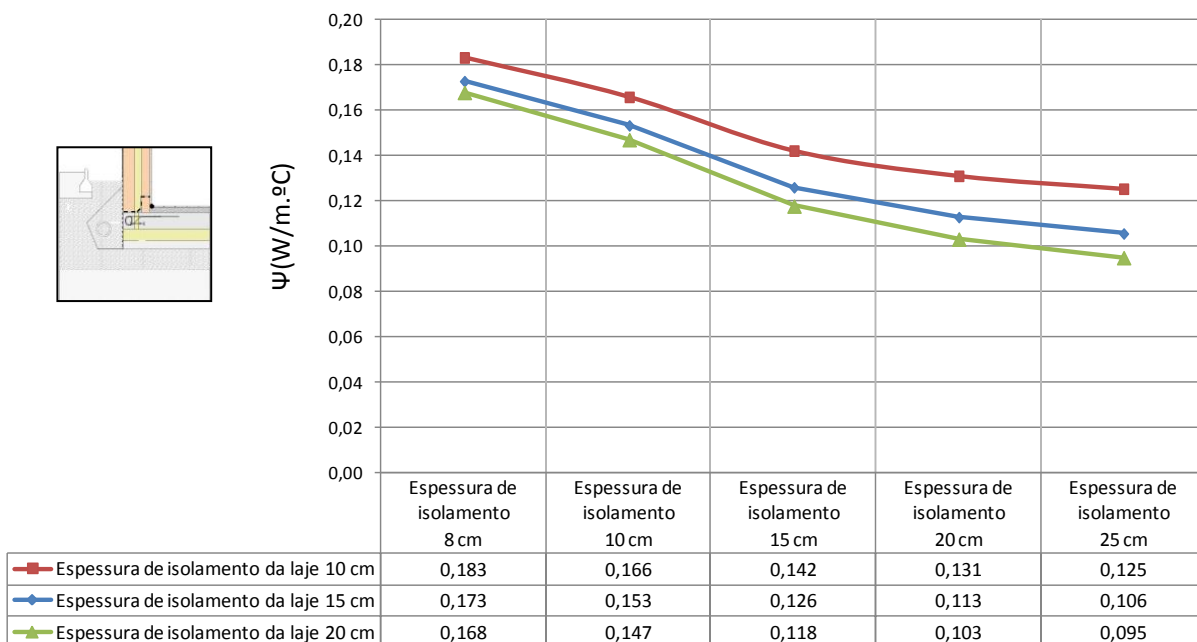


Parede dupla - isolamento na caixa de ar

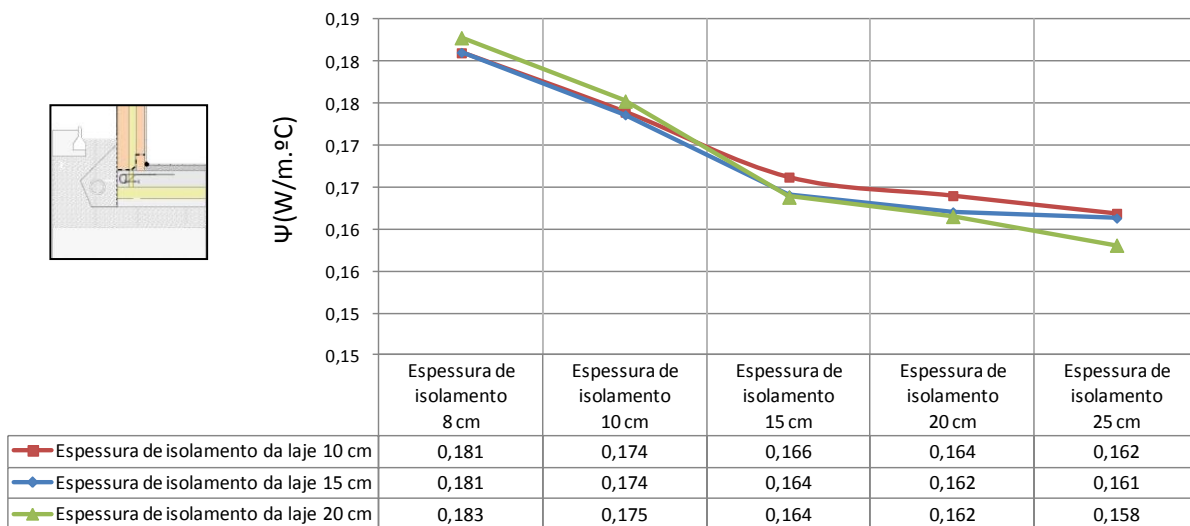


## Ligação de fachada com pavimentos térreos (ensoleiramento)

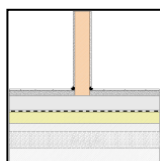
**Parede simples - Isolamento pelo exterior**



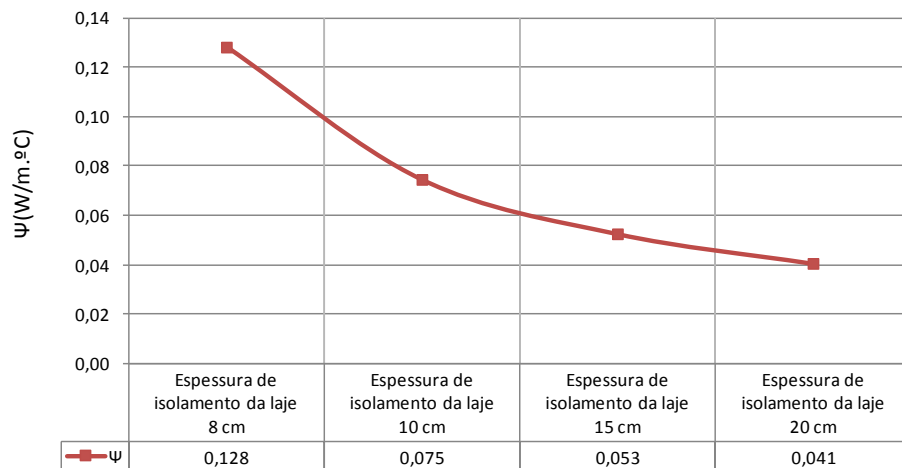
**Parede dupla - Isolamento na caixa de ar**



## Ligação de parede interior com pavimentos térreos (ensoleiramento)



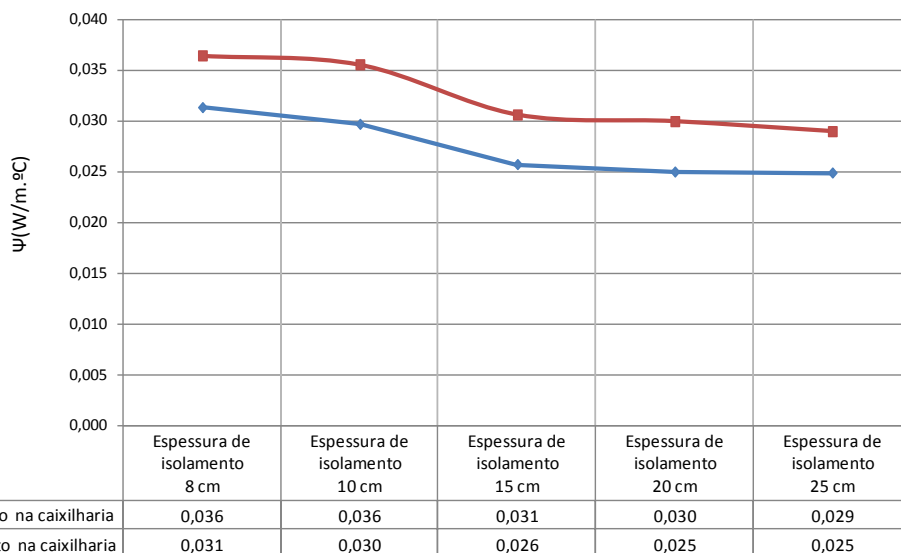
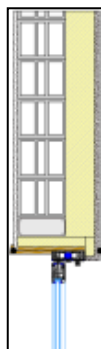
Parede de partição interior



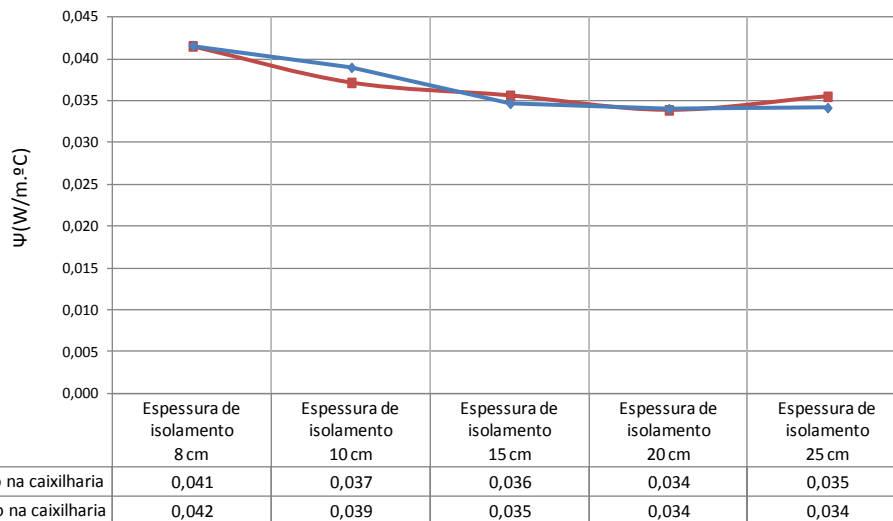
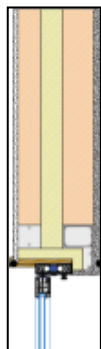
## Ligação fachada/padieira

A ligação apresenta o mesmo comportamento, quer seja realizada a medição pelo interior quer seja pelo exterior, visto que, a dimensão dos elementos coincide em ambos os métodos de medição.

**Parede simples - Isolamento pelo exterior**

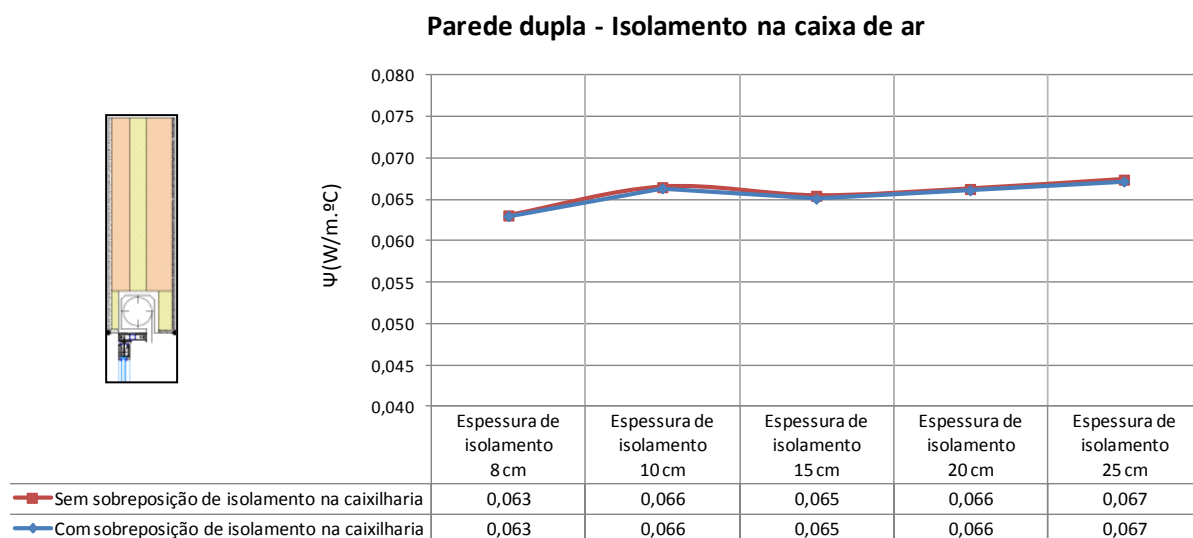
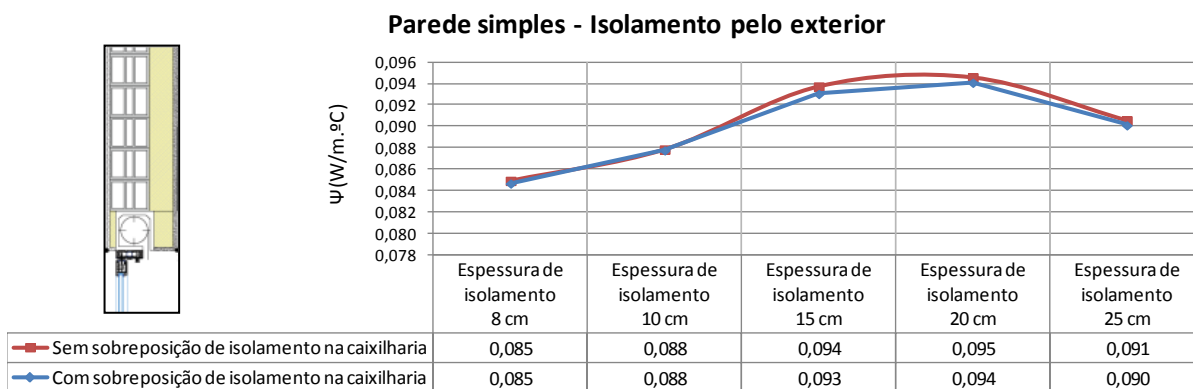


**Parede dupla - Isolamento na caixa de ar**



## Ligação fachada (caixa de estore)/padieira

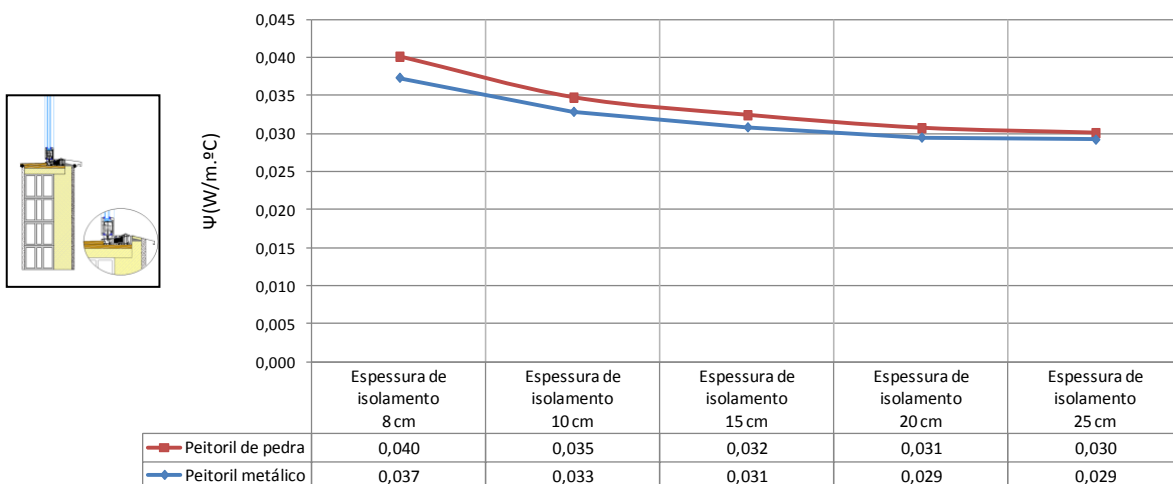
A ligação apresenta o mesmo comportamento, quer seja realizada a medição pelo interior quer seja pelo exterior, visto que, a dimensão dos elementos coincide em ambos os métodos de medição.



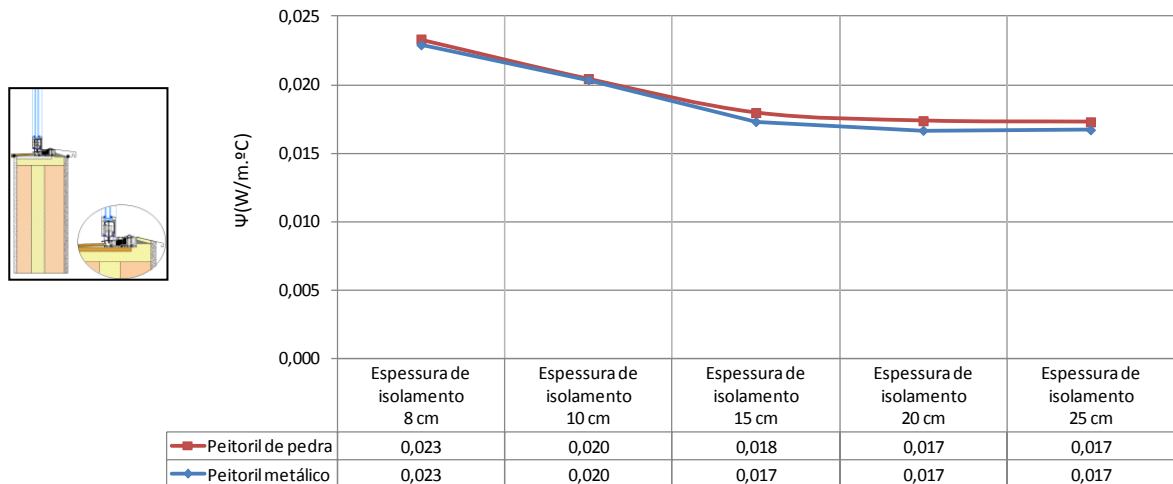
## Ligações fachada/peitoril

A ligação apresenta o mesmo comportamento, quer seja realizada a medição pelo interior quer seja pelo exterior, visto que, a dimensão dos elementos coincide em ambos os métodos de medição.

Parede simples - Isolamento pelo exterior



Parede dupla - Isolamento na caixa de ar

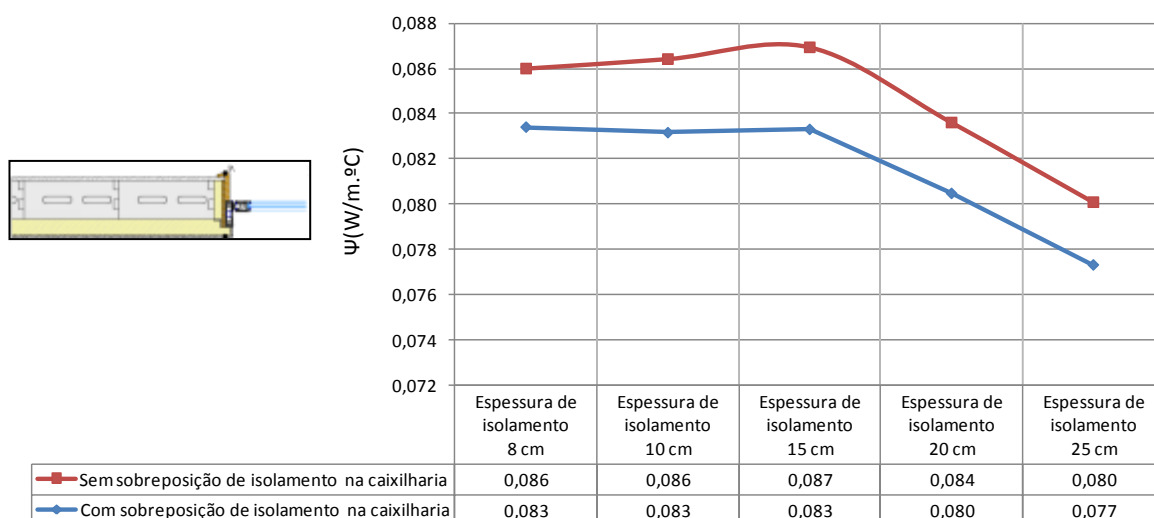




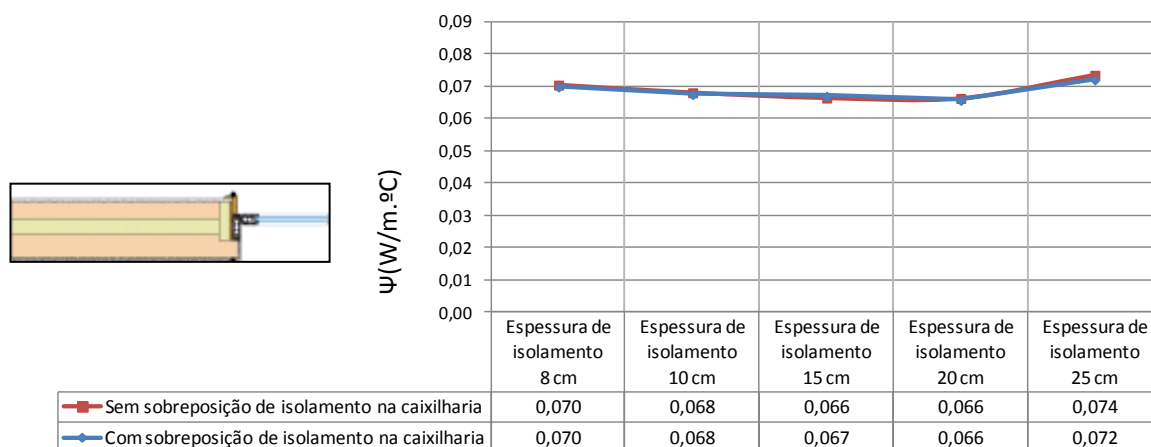
## Ligações fachada/ombreira

A ligação apresenta o mesmo comportamento, quer seja realizada a medição pelo interior quer seja pelo exterior, visto que, a dimensão dos elementos coincide em ambos os métodos de medição.

### Parede simples - Isolamento pelo exterior

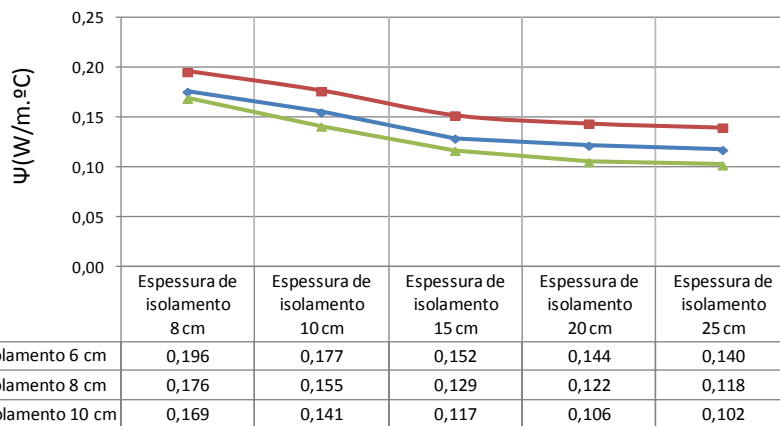
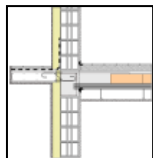


### Parede dupla - Isolamento na caixa de ar



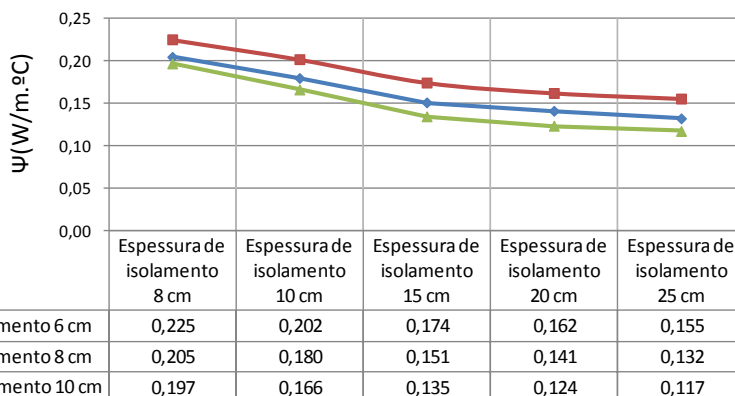
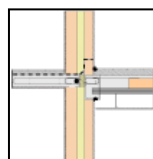
## Ligação de fachada com varanda

### Parede simples - Isolamento pelo exterior



Elemento de corte térmico com espessura de isolamento 6 cm	0,196	0,177	0,152	0,144	0,140
Elemento de corte térmico com espessura de isolamento 8 cm	0,176	0,155	0,129	0,122	0,118
Elemento de corte térmico com espessura de isolamento 10 cm	0,169	0,141	0,117	0,106	0,102

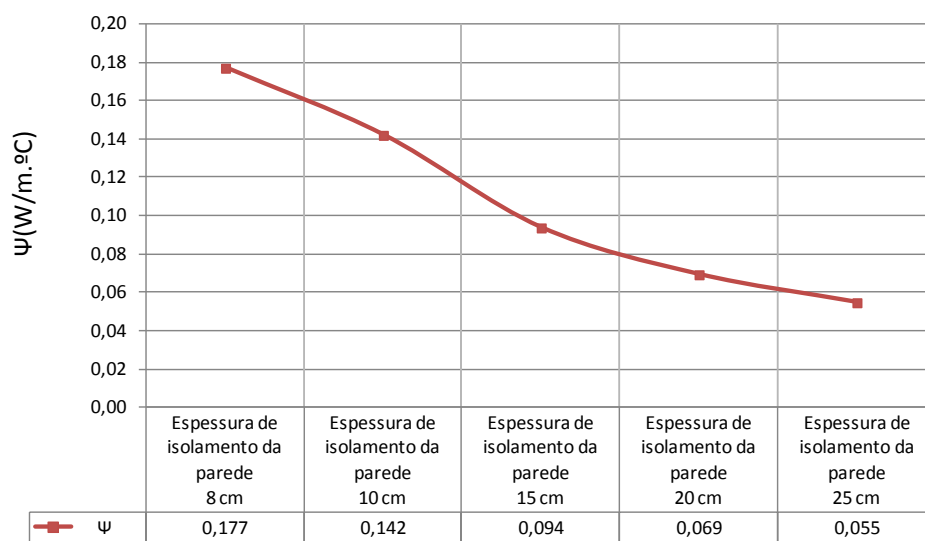
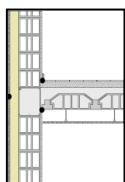
### Parede dupla - Isolamento na caixa de ar



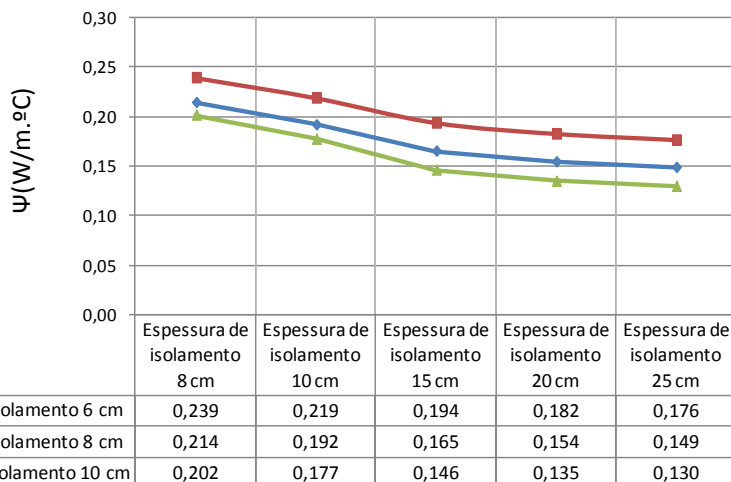
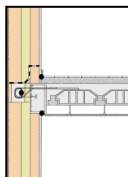
Elemento de corte térmico com espessura de isolamento 6 cm	0,225	0,202	0,174	0,162	0,155
Elemento de corte térmico com espessura de isolamento 8 cm	0,205	0,180	0,151	0,141	0,132
Elemento de corte térmico com espessura de isolamento 10 cm	0,197	0,166	0,135	0,124	0,117

## Ligação de fachada com pavimentos intermédios

**Parede simples - Isolamento pelo exterior**

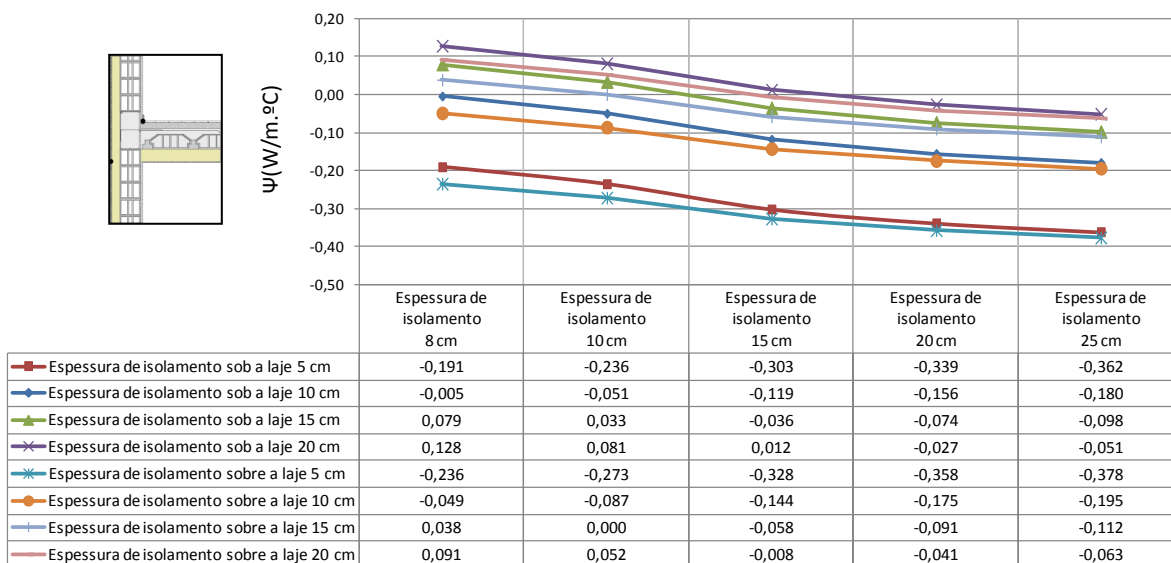


**Parede dupla - Isolamento na caixa de ar**

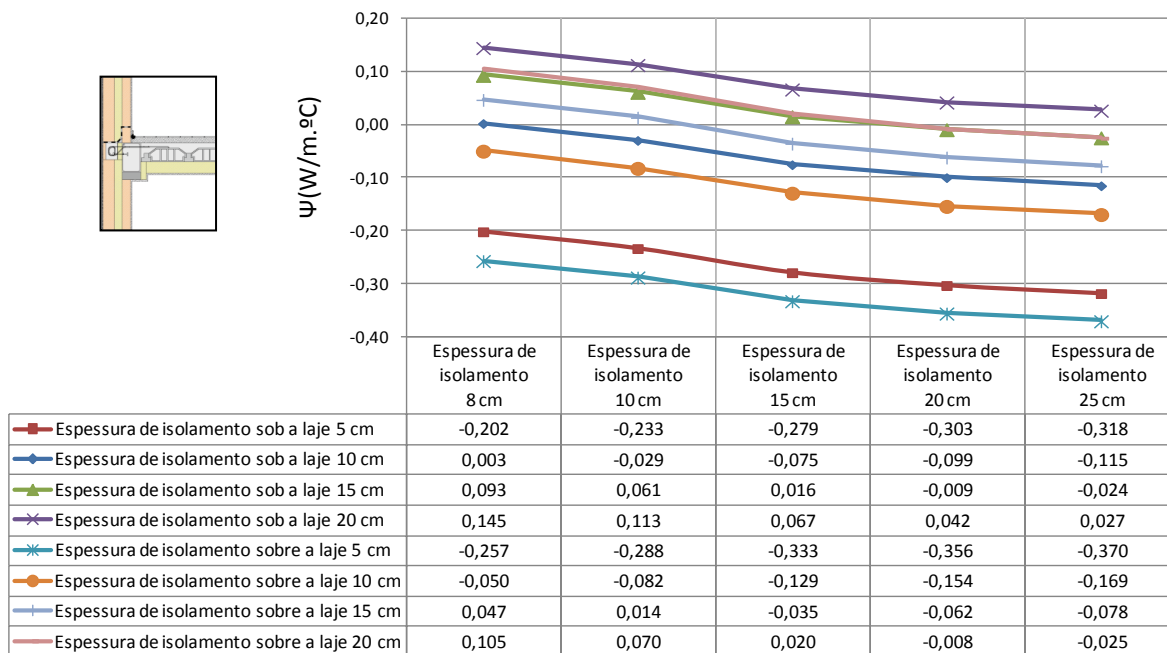


## Ligação de fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos

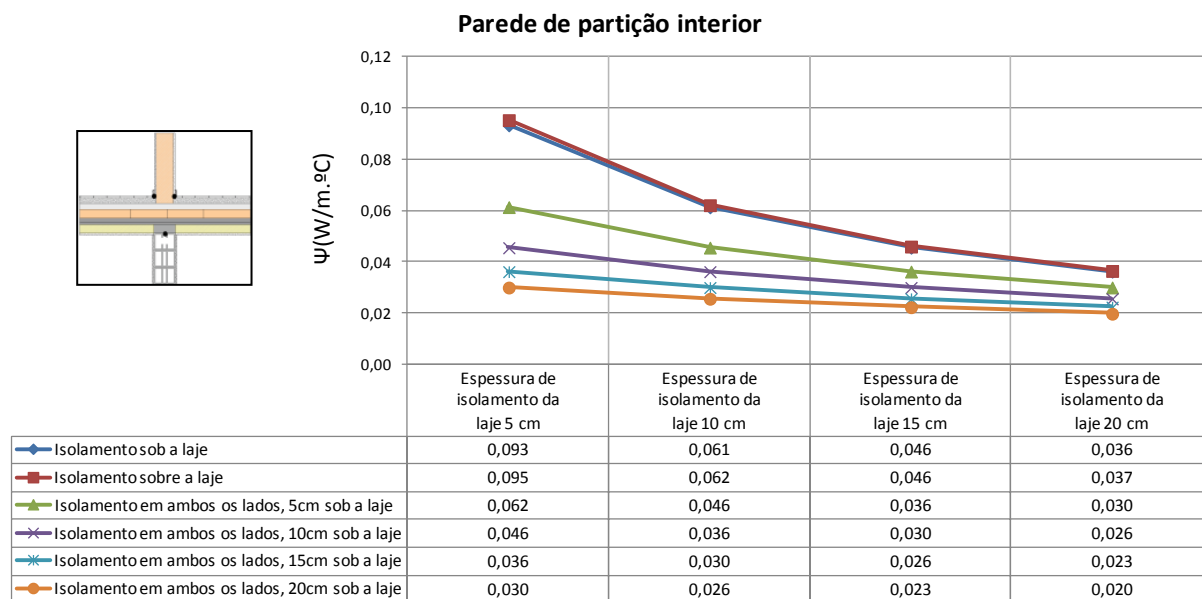
Parede simples - Isolamento pelo exterior



Parede dupla - Isolamento na caixa de ar

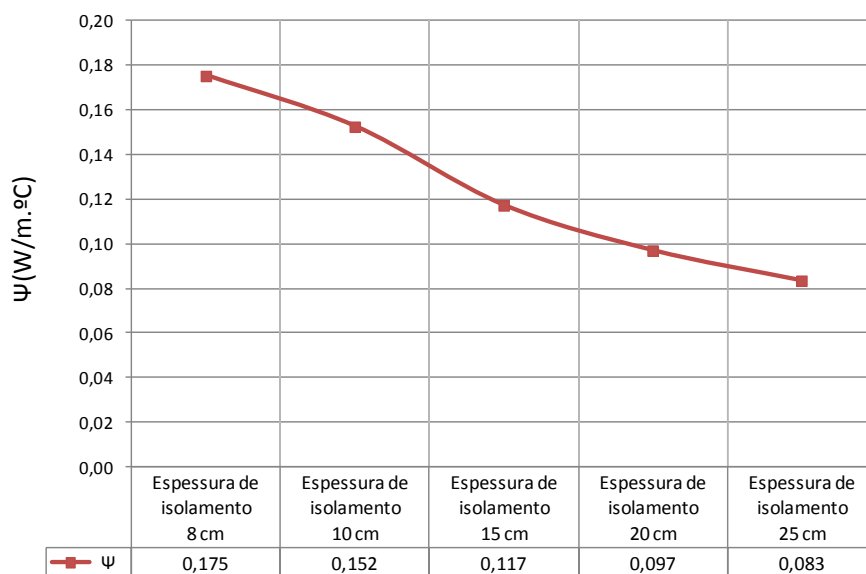
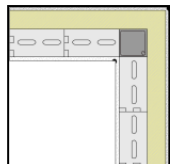


## Ligação de paredes interiores com pavimentos sobre locais não aquecidos

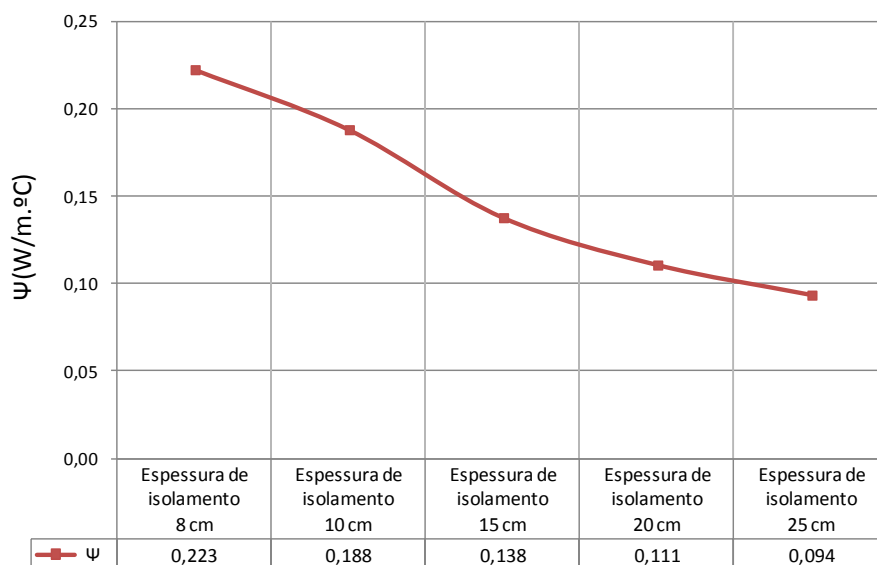
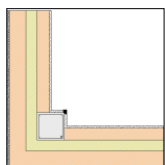


## Ligação entre duas paredes verticais (cunhal)

### Parede simples - Isolamento pelo exterior

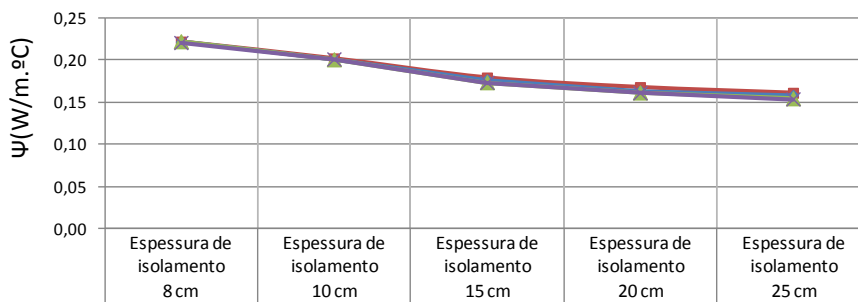
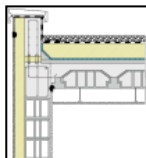


### Parede dupla - Isolamento na caixa de ar



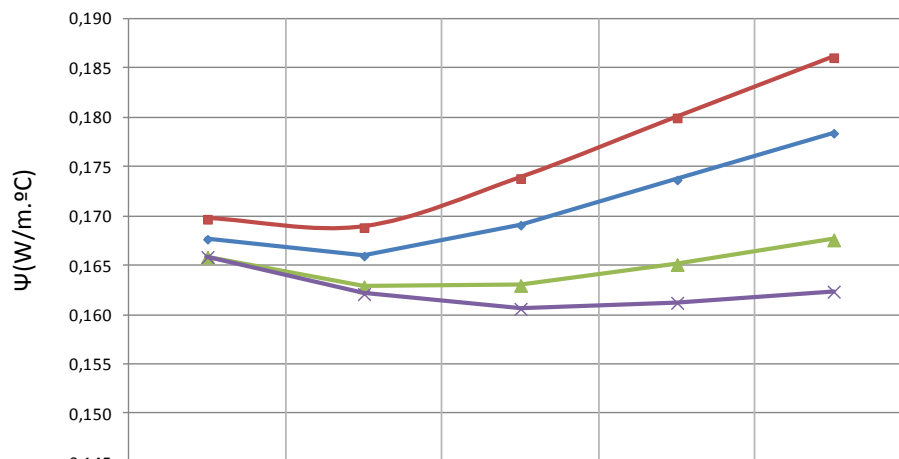
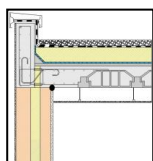
## Ligação de fachada com cobertura plana (sem platibanda)

### Parede simples - Isolamento pelo exterior



	Espessura de isolamento 8 cm	Espessura de isolamento 10 cm	Espessura de isolamento 15 cm	Espessura de isolamento 20 cm	Espessura de isolamento 25 cm
—■— Espessura de isolamento da cobertura 8 cm	0,221	0,201	0,179	0,167	0,161
—◆— Espessura de isolamento da cobertura 10 cm	0,221	0,200	0,177	0,163	0,158
—▲— Espessura de isolamento da cobertura 15 cm	0,222	0,200	0,173	0,161	0,154
—×— Espessura de isolamento da cobertura 20 cm	0,220	0,201	0,173	0,161	0,153

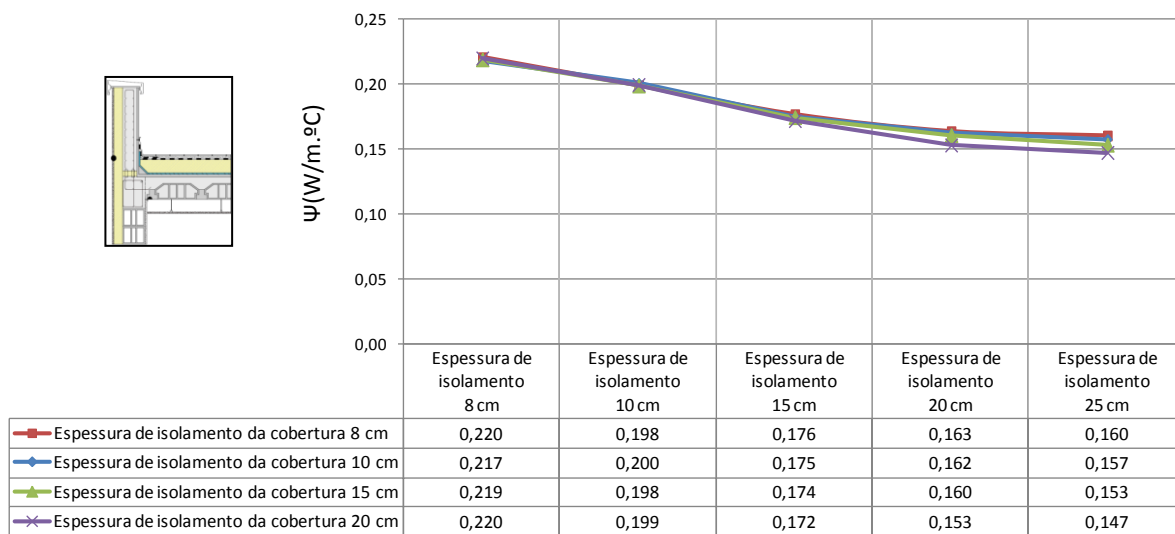
### Parede dupla - Isolamento na caixa de ar



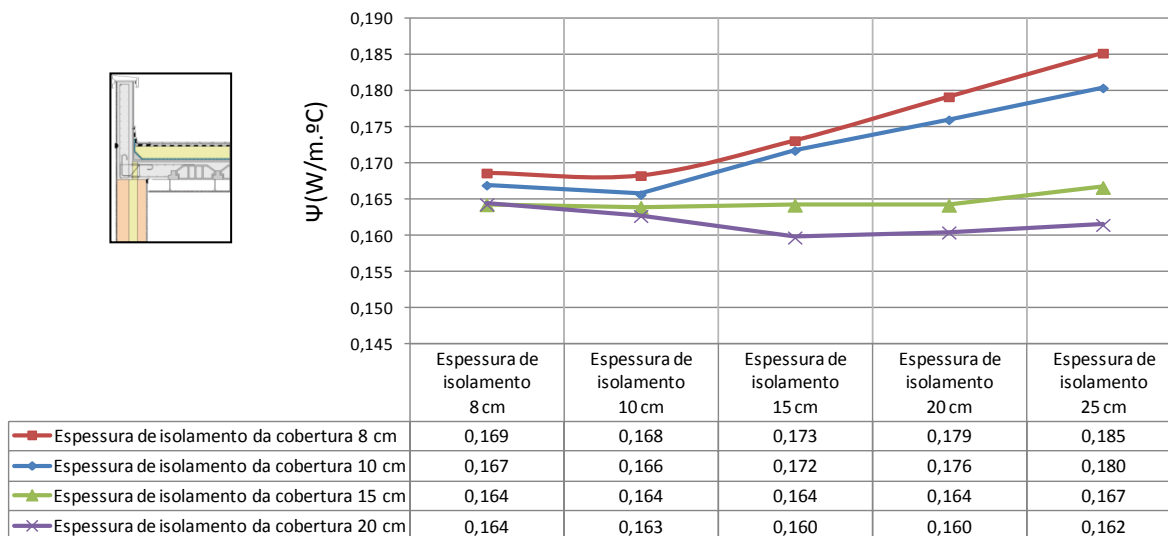
	Espessura de isolamento 8 cm	Espessura de isolamento 10 cm	Espessura de isolamento 15 cm	Espessura de isolamento 20 cm	Espessura de isolamento 25 cm
—■— Espessura de isolamento da cobertura 8 cm	0,170	0,169	0,174	0,180	0,186
—◆— Espessura de isolamento da cobertura 10 cm	0,168	0,166	0,169	0,174	0,178
—▲— Espessura de isolamento da cobertura 15 cm	0,166	0,163	0,163	0,165	0,168
—×— Espessura de isolamento da cobertura 20 cm	0,166	0,162	0,161	0,161	0,162

## Ligação de fachada com terraço (com platibanda)

Parede simples - Isolamento pelo exterior



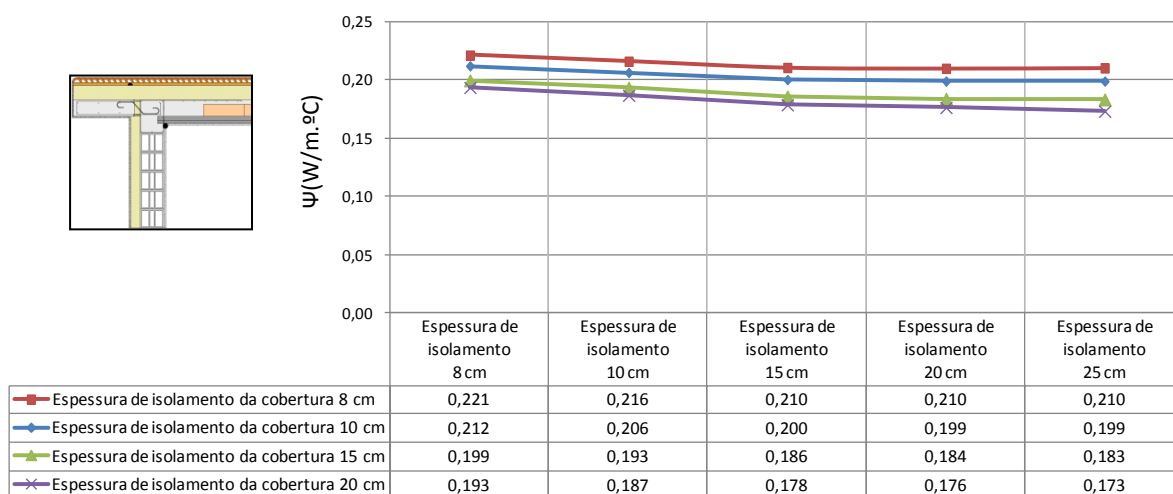
Parede dupla - Isolamento na caixa de ar



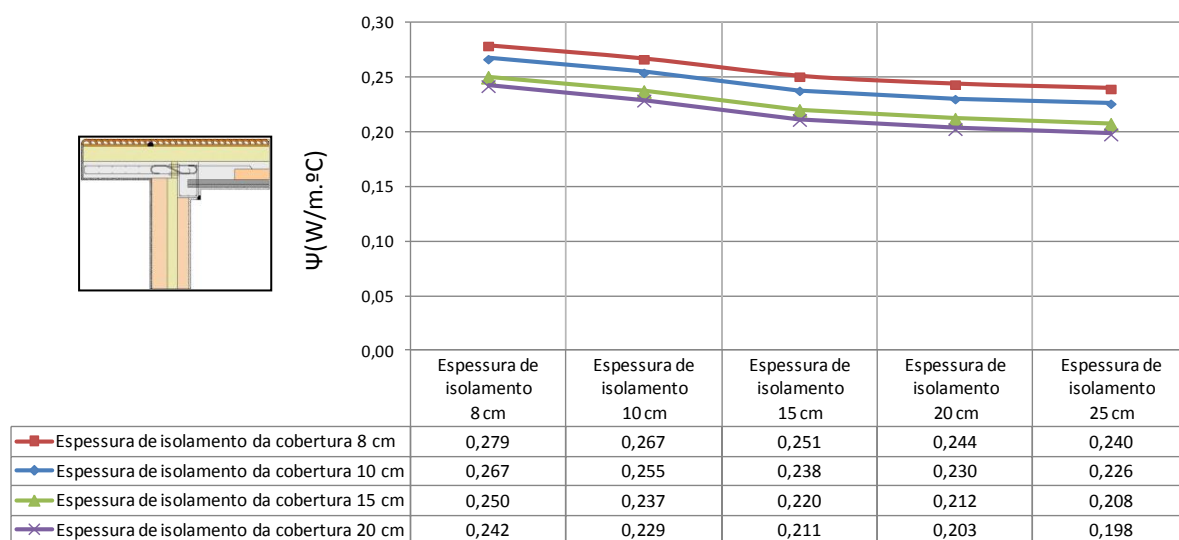


## Ligação de fachada com cobertura inclinada (Bordo lateral ou de empena)

Parede simples - Isolamento pelo exterior

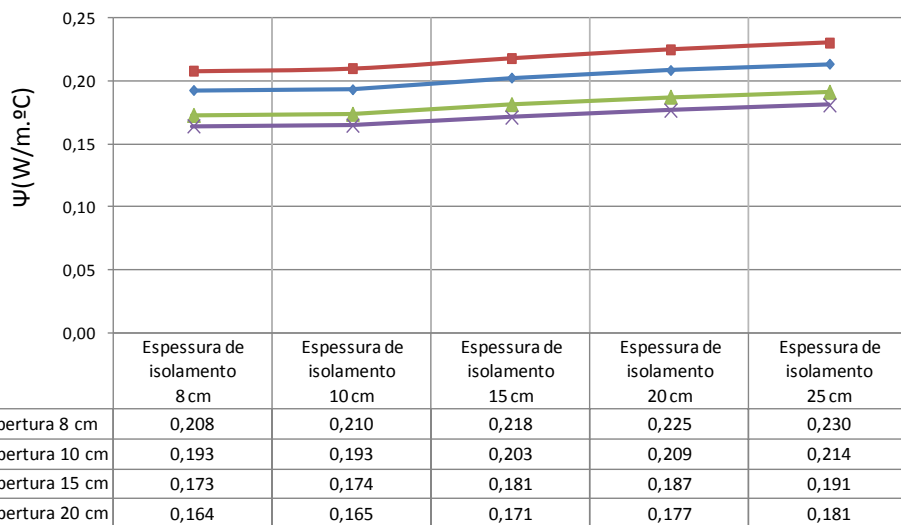
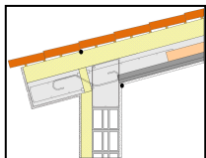


Parede dupla - Isolamento na caixa de ar

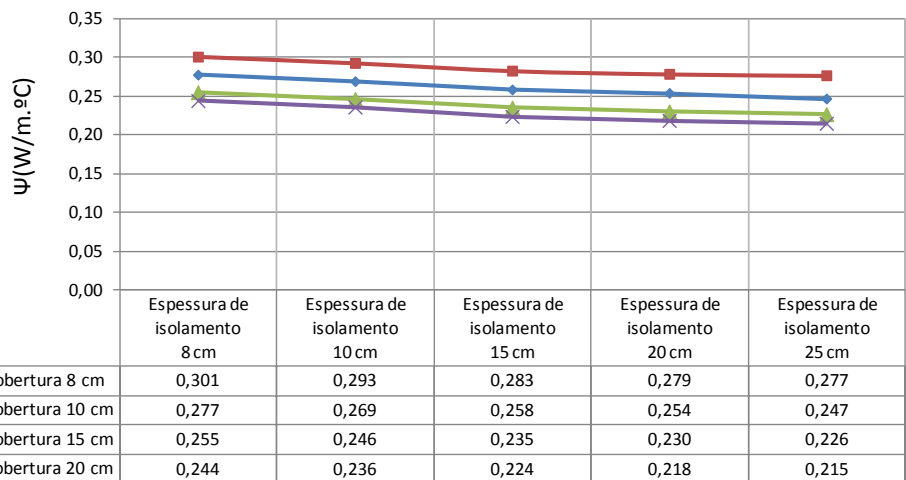
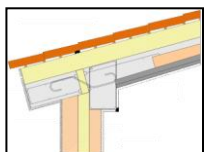


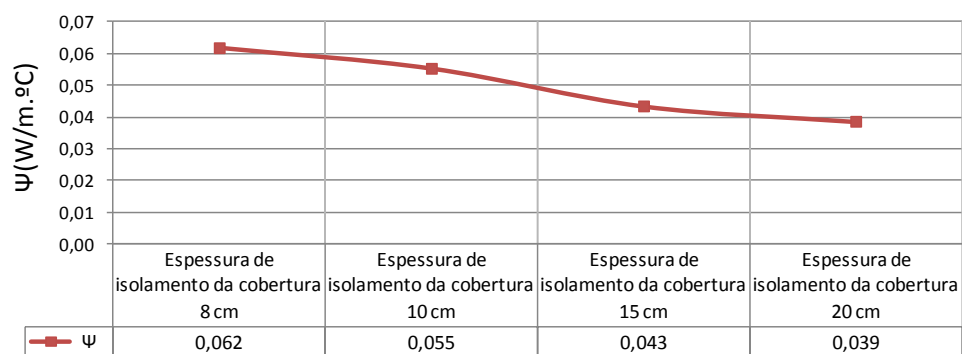
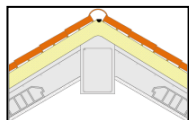
## Ligação de fachada com cobertura inclinada (beiral)

Parede simples - Isolamento pelo exterior



Parede dupla - Isolamento na caixa de ar



**Ligação entre duas lajes de cobertura inclinadas (cumeeira)**



---

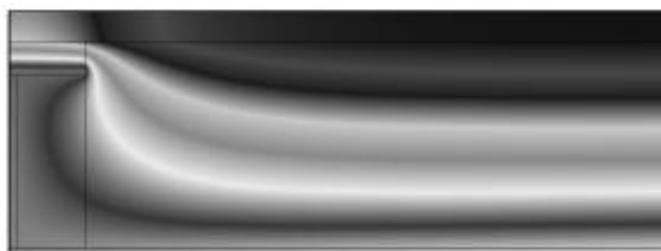
# ANEXO I – CERTIFICADO DE VALIDAÇÃO DO PROGRAMA THERM CONFORME A NORMA EN 10211:2007

---

EN 10211:2007 validation of Therm 6.3

---

Therm 6.3 validation according to  
EN ISO 10211:2007



# Therm 6.3 validation according to NBN EN ISO 10211:2007

## General considerations and requirements for validation of calculation methods according to NBN EN ISO 10211:2007

According to NBN EN ISO 10211:2007 - Annex A, the numerical method has to meet the following requirements to be considered a high precision calculation method:

- a) the method shall provide temperatures and heat flows
- b) the extent of subdivision of the object is not "method defined" but "user defined". Therefore, in the test reference cases, the method being validated shall be able to calculate temperatures and heat flows at locations other than those listed.
- c) For an increasing number of subdivisions, the solution of the method being validated shall converge to the analytical solution, if such a solution exists.
- d) the number of subdivisions shall be determined as follows: the sum of the absolute values of all the heat flows entering the object is calculated twice, for  $n$  nodes and for  $2n$  nodes. The difference between these two results shall not exceed 1%. If not, further subdivisions shall be made until this criterion is met.
- e) If the system solution technique is iterative, the iteration shall continue until the sum of all heat flows (positive and negative) entering the object, divided by half the sum of the absolute values of all these heat flows, is less than 0,0001.

The subdivision of a model in Therm 6.3 is controlled by two parameters: by the "Quad Tree Mesh Parameter" which relates to the maximum size of the initial subdivision, and the "Maximum % Error Energy Norm" for iterative calculations that sets a threshold for the iteration to further divide non conforming elements.

The first parameter will relate to the maximum size, but does not allow for exact dimensioning of the subdivision. The larger the number entered, the smaller the elements of the initial subdivision will be. This parameter can be varied between 3 and 12, with standard setting of 6. The second parameter sets a threshold for the error estimator. For each node, this error estimator checks convergence of the result according to the "Maximum % Error Energy Norm". For those elements that do not yet conform, the grid is then refined and a new calculation is started.

Since the user has no exact control over the dimensions of the subdivision, the model has to be subdivided by the user when looking for temperatures and heat flows at specific locations.

NBN EN ISO 10211:2007 - Annex A provides two test cases for a two dimensional calculation method to be classified as a steady-state high precision method.

### Case 1:

This case consists of a model of a half square column with known surface temperatures. Only these surface temperatures are given. The other variables are implied, or have to be chosen:

- thermal conductivity  $\lambda = 1$  W/mK

## EN 10211:2007 validation of Therm 6.3

- surface resistance:  $R_s = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$
- geometry: BA = 200mm; BC = 400mm

As for the surface resistance, this has to be defined in Therm as part of the boundary condition in the form of a film coefficient. Therm limits the range of this film coefficient to between 0 and 99999. In order to approximate  $R_s = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$ , the highest possible film coefficient is used:  $99999 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

The analytical solution at 28 points of an equidistant grid is given. The difference between the temperatures calculated by the method being validated and the temperatures listed shall not exceed 0,1K.

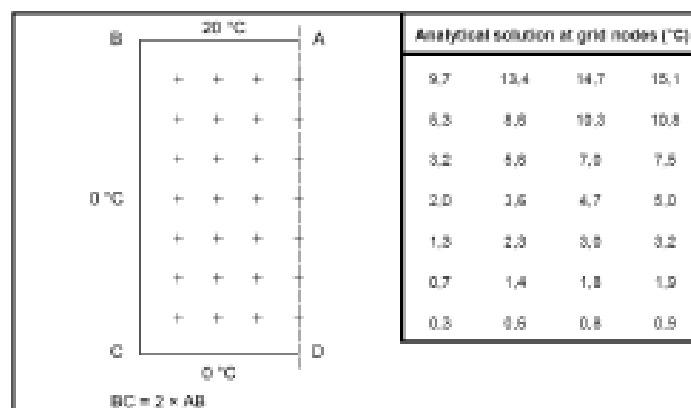


Figure 1: ISO 10211:2007 illustration of validation case 1

The model was drawn as a grid of elements, each 50mmx50mm, 4 elements wide and 8 elements high. This to ensure that Therm would calculate the temperatures at the corners of these elements.

The model is calculated using an iterative method. The default Quad Tree Mesh Parameter is set to 6 and the Maximum % Error Energy Norm is set to 10%. When calculating the model with these parameters, the resulting temperatures lie well within the tolerance of 0,1K.

To evaluate the requirements c to e, the Quad Tree Mesh Parameter is set to its standard value of 6. Requirement d specifies that with doubling number of nodes, the sum of the absolute terms of the heat flows should not differ more than 1%. Because Therm does not allow the user to exactly choose the number of nodes, an approximation is made using het Maximum % Error Energy Norm, as shown in figure 2.

In all cases, the temperature difference stays well below 0,1K.

Figure 3 shows the fulfillment of the requirements c to e. The calculated temperatures and heat flows converge, the difference as specified in d stays under 1%, and the requirement e for an iterative process stays well below the required 0,0001.

EN 10211:2007 validation of Therm 6.3

Quad Tree Mesh Parameter		6	6	6	6	6									
Max. % Error Energy Norm		10	5,35	3,9	2,96	2,5									
# nodes		936	1923	3981	8177	12009									
# elements		901	2015	4474	9327	13772									
coordinate		EN10211													
x[mm]	y[mm]	T [°C]	T [°C]	ΔT [K]	T [°C]	ΔT [K]	T [°C]	ΔT [K]	T [°C]	ΔT [K]	T [°C]	ΔT [K]	T [°C]	ΔT [K]	
50	50	9,7	9,66E+00	0,04	9,66E+00	0,04	9,66E+00	0,04	9,66E+00	0,04	9,66E+00	0,04	9,66E+00	0,04	
50	100	5,3	5,24E+00	0,06	5,26E+00	0,04	5,26E+00	0,04	5,25E+00	0,06	5,25E+00	0,06	5,25E+00	0,06	
50	150	3,2	3,18E+00	0,02	3,19E+00	0,01	3,19E+00	0,01	3,19E+00	0,01	3,19E+00	0,01	3,19E+00	0,01	
50	200	2	2,01E+00	0,01	2,01E+00	0,01	2,01E+00	0,01	2,01E+00	0,01	2,01E+00	0,01	2,01E+00	0,01	
50	250	1,3	1,26E+00	0,04	1,26E+00	0,04	1,26E+00	0,04	1,26E+00	0,04	1,26E+00	0,04	1,26E+00	0,04	
50	300	0,7	7,39E-01	0,04	7,39E-01	0,04	7,39E-01	0,04	7,40E-01	0,04	7,40E-01	0,04	7,40E-01	0,04	
50	350	0,3	3,41E-01	0,04	3,42E-01	0,04	3,42E-01	0,04	3,44E-01	0,04	3,42E-01	0,04	3,42E-01	0,04	
100	50	13,4	1,34E+01	0,01	1,34E+01	0,03	1,34E+01	0,02	1,34E+01	0,03	1,34E+01	0,03	1,34E+01	0,02	
100	100	8,6	8,64E+00	0,04	8,64E+00	0,04	8,64E+00	0,04	8,64E+00	0,04	8,64E+00	0,04	8,64E+00	0,04	
100	150	5,6	5,61E+00	0,01	5,61E+00	0,01	5,61E+00	0,01	5,61E+00	0,01	5,61E+00	0,01	5,61E+00	0,01	
100	200	3,6	3,64E+00	0,04	3,64E+00	0,04	3,64E+00	0,04	3,64E+00	0,04	3,64E+00	0,04	3,64E+00	0,04	
100	250	2,3	2,31E+00	0,01	2,31E+00	0,01	2,31E+00	0,01	2,31E+00	0,01	2,31E+00	0,01	2,31E+00	0,01	
100	300	1,4	1,36E+00	0,04	1,36E+00	0,04	1,36E+00	0,04	1,36E+00	0,04	1,36E+00	0,04	1,36E+00	0,04	
100	350	0,6	6,29E-01	0,03	6,29E-01	0,03	6,29E-01	0,03	6,30E-01	0,03	6,30E-01	0,03	6,30E-01	0,03	
150	50	14,7	1,47E+01	0,04	1,47E+01	0,03	1,47E+01	0,03	1,47E+01	0,03	1,47E+01	0,03	1,47E+01	0,03	
150	100	10,3	1,03E+01	0,02	1,03E+01	0,02	1,03E+01	0,02	1,03E+01	0,02	1,03E+01	0,02	1,03E+01	0,02	
150	150	7	7,02E+00	0,02	7,02E+00	0,02	7,02E+00	0,02	7,01E+00	0,01	7,01E+00	0,01	7,01E+00	0,01	
150	200	4,7	4,66E+00	0,04	4,66E+00	0,04	4,66E+00	0,05	4,66E+00	0,04	4,66E+00	0,04	4,66E+00	0,04	
150	250	3	2,98E+00	0,02	2,98E+00	0,02	2,99E+00	0,01	2,99E+00	0,01	2,99E+00	0,01	2,99E+00	0,01	
150	300	1,8	1,77E+00	0,03	1,77E+00	0,03	1,77E+00	0,03	1,77E+00	0,03	1,77E+00	0,03	1,77E+00	0,03	
150	350	0,8	8,19E-01	0,02	8,19E-01	0,02	8,20E-01	0,02	8,20E-01	0,02	8,20E-01	0,02	8,20E-01	0,02	
200	50	15,1	1,51E+01	0,01	1,51E+01	0,01	1,51E+01	0,01	1,51E+01	0,01	1,51E+01	0,01	1,51E+01	0,01	
200	100	10,8	1,08E+01	0,02	1,08E+01	0,02	1,08E+01	0,01	1,08E+01	0,01	1,08E+01	0,01	1,08E+01	0,01	
200	150	7,5	7,47E+00	0,03	7,47E+00	0,03	7,47E+00	0,03	7,46E+00	0,04	7,47E+00	0,03	7,47E+00	0,03	
200	200	5	5,00E+00	0,00	5,00E+00	0,00	5,00E+00	0,00	5,00E+00	0,00	5,00E+00	0,00	5,00E+00	0,00	
200	250	3,2	3,22E+00	0,02	3,22E+00	0,02	3,22E+00	0,02	3,22E+00	0,02	3,22E+00	0,02	3,22E+00	0,02	
200	300	1,9	1,91E+00	0,01	1,91E+00	0,01	1,91E+00	0,01	1,91E+00	0,01	1,91E+00	0,01	1,91E+00	0,01	
200	350	0,9	8,86E-01	0,01	8,86E-01	0,01	8,86E-01	0,01	8,87E-01	0,01	8,87E-01	0,01	8,87E-01	0,01	
Maximum ΔT [K]				0,06		0,04			0,05		0,05		0,05		0,05
mean ΔT [K]				0,03		0,03			0,02		0,03		0,02		0,02

Figure 2: Calculation results for different Maximum % Error Energy Norm.

Quad Tree Mesh Parameter	6	6	6	6	6
Max. % Error Energy Norm	10	5,35	3,9	2,96	2,5
# nodes	936	1923	3981	8177	12009
# elements	901	2015	4474	9327	13772
$\phi_{out}$ [W]	127,877	126,9948	126,7538	126,6615	126,6506
$\phi_{in}$ [W]	127,8765	126,9949	126,7538	126,6615	126,6499
$ \phi_{out}  +  \phi_{in} $	255,7536	253,9898	253,5076	253,323	253,3005
difference according to d)		0,69%	0,19%	0,07%	0,01%
$( \phi_{out}  +  \phi_{in} )/2$	127,8768	126,9949	126,7538	126,6615	126,6503
$\phi_{in} - \phi_{out}$	5,00E-04	1,10E-04	7,03E-05	3,97E-05	6,91E-04
$2 \phi_{in} - \phi_{out}  / ( \phi_{out}  +  \phi_{in} )$	3,91E-06	8,62E-07	5,55E-07	3,13E-07	5,46E-06

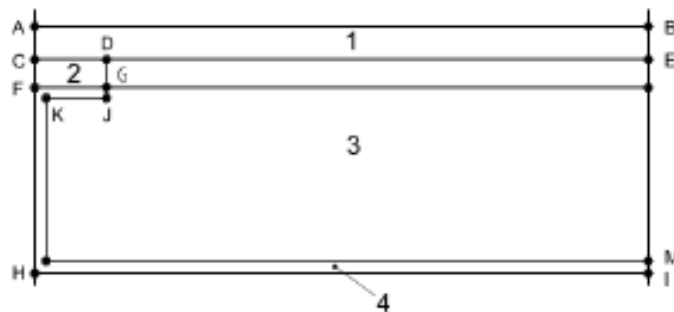
Figure 3: Calculation of the convergence and error of the calculation for varying Maximum % Error Energy Norm.



## EN 10211:2007 validation of Therm 6.3

## Case 2

For validation case 2, part of a wall construction is calculated. All dimensions and boundary conditions are specified.



Dimensions mm	Thermal conductivity W/(m·K)	Boundary conditions
AB = 500	1: 1,15	AB: 0 °C with $R_{se} = 0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
AC = 6	2: 0,12	HI: 20 °C with $R_{si} = 0,11 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
CD = 15	3: 0,029	
CF = 5	4: 230	
EM = 40		
GJ = 1,5		
IM = 1,5		
FG - KJ = 1,5		

Figure 4: ISO 10211:2007 illustration of validation case 2

This model is calculated, and the result has to fulfill following requirements:

- The calculated temperatures at certain points as specified in the validation case should not differ more than 0,1K from the given temperatures.
- The calculated heat flow should not differ more than 0,1 W/mK from the given heat flow.

Temperatures °C		
A: 7,1		B: 0,8
C: 7,9	D: 6,3	E: 0,8
F: 16,4	G: 16,3	
H: 16,8		I: 16,3
Total heat flow rate: 9,5 W/m		

Figure 5: ISO 10211:2007 illustration of the solution of validation case 2

The model is calculated iteratively, with a Quad Tree Mesh Parameter set to 6. The Maximum % Error Energy Norm is varied to approximate doubling the number of nodes, in order to evaluate the extra requirements c to e. Since all points where the temperature is to be calculated are present in the geometrical model, no extra points have to be drawn.

EN 10211:2007 validation of Therm 6.3

Therm outputs the calculated heat flow over the whole model as a unity of three parts: a U-factor [W/m<sup>2</sup>K], a length [m] and a temperature difference [K]. Multiplying these three results gives the heat flow [W/m].

Figure 6 shows the results of the calculations, which all lie well within the requested 0,1K difference in temperature and 0,1W/m difference in heat flow.

Figure 7 illustrates conformity with requirements c to e.

Quad Tree Mesh Parameter		6	6	6	6	6	6	6	
Max. % Error Energy Norm		10	6	3,62	2				
# nodes		227	422	1106	3607				
# elements		195	401	1124	3703				
Point	EN10211	T [°C]		ΔT [K]		T [°C]		ΔT [K]	
	T [°C]	T [°C]	ΔT [K]	T [°C]	ΔT [K]	T [°C]	ΔT [K]	T [°C]	ΔT [K]
A	7,1	7,10	0,00	7,07	0,03	7,06	0,04	7,06	0,04
C	7,9	7,91	0,01	7,90	0,00	7,90	0,00	7,90	0,00
F	16,4	16,40	0,00	16,40	0,00	16,41	0,01	16,41	0,01
H	16,8	16,75	0,05	16,76	0,04	16,77	0,03	16,77	0,03
D	6,3	6,29	0,01	6,28	0,02	6,28	0,02	6,27	0,03
G	16,3	16,32	0,02	16,33	0,03	16,33	0,03	16,33	0,03
B	0,8	0,76	0,04	0,76	0,04	0,76	0,04	0,76	0,04
E	0,8	0,83	0,03	0,83	0,03	0,83	0,03	0,83	0,03
I	18,3	18,33	0,03	18,33	0,03	18,33	0,03	18,33	0,03
Maximum ΔT [K]			0,05		0,04		0,04		0,04
mean ΔT [K]			0,02		0,02		0,03		0,03
Heat flow	EN10211	Φ [W/m]		ΔΦ [W/m]		Φ [W/m]		ΔΦ [W/m]	
	W/m	Φ [W/m]	ΔΦ [W/m]	Φ [W/m]	ΔΦ [W/m]	Φ [W/m]	ΔΦ [W/m]	Φ [W/m]	ΔΦ [W/m]
		9,5	0,026	9,505	0,005	9,496	0,004	9,493	0,007

Figure 6: temperatures and heat flow of the model calculated with different Maximum % Error Energy Norm.

Quad Tree Mesh Parameter	6	6	6	6
Max. % Error Energy Norm	10	6	3,62	2
# nodes	227	422	1106	3607
# elements	195	401	1124	3703
Φ <sub>out</sub> [W]	9,525761	9,505003	9,496054	9,493053
Φ <sub>in</sub> [W]	9,52579	9,504952	9,496047	9,49307
Φ <sub>out</sub>   +  Φ <sub>in</sub>	19,05	19,01	18,99	18,99
difference according to d)		0,22%	0,09%	0,03%
( Φ <sub>out</sub>   +  Φ <sub>in</sub>  ) / 2	9,5257755	9,504978	9,496051	9,493062
Φ <sub>in</sub> - Φ <sub>out</sub>	2,90E-05	5,10E-05	7,00E-06	1,70E-05
2 Φ <sub>in</sub> - Φ <sub>out</sub>   / ( Φ <sub>out</sub>   +  Φ <sub>in</sub>  )	3,04E-06	5,37E-06	7,37E-07	1,79E-06

Figure 7: Calculation of the convergence and error of the calculation for varying Maximum % Error Energy Norm.

---

**EN 10211:2007 validation of Therm 6.3**

---

**Conclusion**

Therm 6.3 complies with all requirements of the ISO 10211:2007 Annex A to be considered a two dimensional high precision calculation method.

For a 'Quad Tree Mesh Parameter' set to 6 and a 'Maximum % Error Energy Norm' set to 10% under Options/Preferences/Therm file options (these are the standard settings) the calculation lies within the required precision, for higher Quad Tree Mesh Parameters values and lower Maximum % Error Energy Norm values, the result will further converge to the 'optimal solution'.

Berchem, April 2011

Wouter Hilderson

Link: [http://www.bouwdetails.be/THERM\\_Validatie/Therm6.3\\_10211\\_Validation.pdf](http://www.bouwdetails.be/THERM_Validatie/Therm6.3_10211_Validation.pdf)