



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

Luís Cláudio da Costa Abreu

IMPACTO DOS PARÂMETROS DO ISOLAMENTO NAS  
PONTES TÉRMICAS LINEARES EM REGIME SAZONAL  
E DINÂMICO

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções, orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e pela Doutora Joana de Sousa Dias Prata e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2021

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
Departamento de Engenharia Civil

Luís Cláudio da Costa Abreu

# **IMPACTO DOS PARÂMETROS DO ISOLAMENTO NAS PONTES TÉRMICAS LINEARES EM REGIME SAZONAL E DINÂMICO**

## **IMPACT OF INSULATION PARAMETERS ON LINEAR THERMAL BRIDGES UNDER SEASONAL AND DYNAMIC CONDITIONS**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,  
orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e pela Doutora Joana de Sousa Dias Prata

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

Julho de 2021



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

## AGRADECIMENTOS

Embora uma dissertação seja, pelo seu caráter académico, um trabalho individual, há inúmeros contributos de diversas pessoas que não podem nem devem deixar de ser mencionados. Por essa razão, deixo os meus agradecimentos:

Ao Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e à Doutora Joana de Sousa Dias Prata por todo o apoio, dedicação, disponibilidade e conhecimento transmitido ao longo da execução deste trabalho.

À minha avó Aida por me dar todas as possibilidades de realizar este sonho de estudar na Universidade de Coimbra e concluir esta etapa que começou na Baixa desta cidade inesquecível, Coimbra.

À minha mãe e ao meu irmão por sempre me motivarem, apoiarem e ajudarem nos momentos mais adversos, mas sobretudo por me inspirarem durante todo o percurso académico. Ao meu pai que me permitiu uma maior reflexão sobre os desafios da vida.

Ao meu padrinho Carlos, à Virgínia e à Carolina por sempre me acompanharem nos momentos mais importantes e pelas longas horas de partilhas e momentos que, para sempre, recordarei com grande carinho.

Aos amigos que fiz na Universidade e que me acompanharam ao longo desta jornada.

Aos amigos de longa data que estiveram ao meu lado nos bons e nos maus momentos e que contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal.

A todas as pessoas que cruzaram o meu caminho e que contribuíram na minha evolução como pessoa que hoje sou e tanto me orgulho.

Um grande obrigado!

Este trabalho teve o apoio do projeto MIT-EXPL/TDI/0041/2019, financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia.

## RESUMO

A necessidade de melhorar o desempenho energético dos edifícios e de reduzir a emissão de gases com efeito de estufa impõe que se utilizem isolamentos térmicos com características e espessuras adequadas. Atualmente existem inúmeros materiais que atuam como isolantes e a sua eficiência depende da sua posição na solução construtiva e dos parâmetros associados, nomeadamente a sua espessura e condutibilidade térmica. O estudo da eficácia do isolamento é fundamental para garantir conforto habitacional e níveis adequados de desempenho energético.

No contexto desta dissertação é estudado o impacto que vários parâmetros têm nas perdas de calor das pontes térmicas lineares. Além do impacto dos materiais construtivos, foi vista em detalhe a influência da espessura e condutibilidade térmica dos isolamentos térmicos. Como as exigências regulamentares obrigam à aplicação de grandes espessuras, será dada particular atenção a este aspeto. Também a posição do isolamento será alvo de análise. Este trabalho propõe equações expeditas para determinar o coeficiente de perda linear de um conjunto de soluções construtivas.

Numa segunda fase do trabalho é investigado o efeito das pontes térmicas lineares na modelação dinâmica do desempenho energético de edifícios residenciais. Para esse efeito é analisada uma fração multifamiliar utilizando o *EnergyPlus*. São avaliadas cinco situações de isolamento e condutibilidade térmica e comparados os resultados para dois regimes, sazonal e dinâmico. Para se compreender a importância das pontes térmicas lineares, são comparadas as perdas de calor pelas paredes com as perdas pelas pontes térmicas lineares.

Palavras-chave: Pontes Térmicas Lineares, Isolamento Térmico, Coeficiente de Transmissão Térmica Linear, Fluxo de Calor, Condutibilidade Térmica

## ABSTRACT

In order to improve the energy performance of buildings and reduce greenhouse gas emissions, it is necessary to use thermal insulation with suitable characteristics and thicknesses. Currently there are numerous materials that act as insulators and their efficiency depends on their position in the construction solution and the associated parameters, particularly their thickness and thermal conductivity. The study of the effectiveness of insulation is essential to ensure residential comfort and adequate levels of energy performance.

In this paper we study the impact that different parameters have on the heat loss of linear thermal bridges. In addition to the impact of construction materials, the influence of thickness and thermal conductivity of thermal insulations was examined in detail. As the regulation demands the application of large thicknesses, the position of the insulation will also be analysed. This work proposes expedite equations to determine the linear loss coefficient of a set of building solutions.

In a second stage, the effect of linear thermal bridges in the dynamic modelling of the energy performance of residential buildings is investigated. For this purpose, a multifamily unit is analysed using *EnergyPlus*. Five situations of insulation and thermal conductivity are evaluated, and the results are compared for two regimes, seasonal and dynamic. To understand the importance of linear thermal bridges, the heat losses through the walls are compared with the losses through linear thermal bridges.

Keywords: Linear Thermal Bridges, Thermal Insulation, Linear Thermal Transmittance Coefficient, Heat Flow, Thermal Conductivity

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Enquadramento Geral .....	1
1.2 Motivação .....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Estrutura da Dissertação .....	3
2. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DE PONTES TÉRMICAS LINEARES.....	5
2.1 Introdução .....	5
2.1.1 Experimental (laboratório) .....	6
2.1.2 Termografia ( <i>in-situ</i> ) .....	7
2.1.3 Cálculo em Regime Permanente .....	8
2.1.4 Cálculo em Regime Variável.....	9
2.1.5 Cálculo Normalizado de Acordo com a Norma .....	9
2.1.6 Cálculo Simplificado de Coeficientes de Transmissão Térmica Linear.....	10
2.2 Método de Cálculo de Acordo com a Norma ISO 10211 .....	10
2.2.1 Cálculo da Taxa de Transferência de Calor de acordo com a ISO 10211 .....	11
2.2.2 Modelo Geométrico .....	12
2.2.3 Condições de Fronteira.....	13
2.2.4 Programas de Cálculo .....	13
2.2.4.1 <i>UCanPsi</i> .....	13
2.2.4.2 <i>THERM</i> .....	14
2.3 Integração das Pontes Térmicas Lineares nos Métodos de Cálculo em Regime Sazonal de Edifícios .....	14
2.4 Abordagem para Integração das Pontes Térmicas Lineares nos Métodos de Cálculo Dinâmico de Edifícios .....	16
2.4.1 Cálculo Dinâmico Aplicado a Programas de Simulação.....	17
2.4.2 <i>EnergyPlus</i> .....	19
2.5 Método para Avaliar Risco de Condensações Superficiais .....	21
3. IMPACTO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS NOS COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA LINEAR .....	22
3.1 Introdução .....	22
3.2 Casos de Estudo .....	22

---

3.3	Validação do Método de Cálculo ( <i>UCanPsi</i> vs. <i>THERM</i> ).....	23
3.4	Resultados .....	24
3.4.1	Espessura do Isolamento e a sua Influência .....	24
3.4.2	Impacto do Coeficiente de Redução de Perdas no Espaço Não Útil.....	26
3.4.3	Influência do Material Construtivo .....	30
3.4.4	Influência da Condutibilidade Térmica .....	33
3.5	Proposta de Equações para Determinação de $\Psi$ .....	36
3.6	Considerações Finais .....	37
4.	ESTUDO DE INTEGRAÇÃO DAS PONTES TÉRMICAS LINEARES NO MÉTODO DE CÁLCULO DINÂMICO DE EDIFÍCIOS .....	38
4.1	Introdução .....	38
4.2	Caso de Estudo.....	38
4.3	Descrição e Tratamento de Dados dos Métodos de Cálculo.....	42
4.3.1	Métodos de Cálculo em Regime Sazonal de Edifícios.....	42
4.3.1.1	Parâmetros da Classe Energética e do Balanço Energético .....	43
4.3.2	Métodos de Cálculo em Regime Dinâmico de Edifícios.....	44
4.3.2.1	Parâmetros de Avaliação de Transferência de Energia.....	45
4.3.2.2	Enquadramento dos Parâmetros de Cálculo Dinâmico.....	45
4.4	Discussão de Resultados .....	46
4.4.1	Isolamento na Parede Dupla .....	46
4.4.2	Isolamento na Parede pelo Exterior.....	48
4.4.3	Isolamento na Parede pelo Interior .....	49
4.4.4	Análise Comparativa .....	51
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	53
5.1	Conclusões .....	53
5.2	Desenvolvimentos Futuros .....	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Pontes térmicas em edifícios: Plana (a), Linear (b), Pontual (c) e Convectiva (d) (Adaptado de Itecons, 2011b).....	5
Figura 2.2 - Perspectiva geral de uma <i>hotbox</i> (Asdrubali & Baldinelli, 2011).....	7
Figura 2.3 - Divisão da envolvente da fração em estudo para modelos 3D, 2D e 1D (ISO 10211, 2017).....	8
Figura 2.4 – Representação esquemática da metodologia de cálculo prevista na ISO 10211 (Itecons, 2011b).....	11
Figura 2.5 – Detalhe de uma ligação (a) e análise de distribuição de temperaturas detalhada (b) e simplificada (c) (Adaptado de T. Theodosiou <i>et al.</i> , 2021).....	12
Figura 2.6 - Modelo geométrico de acordo com a ISO 10211 (ITEcons, 2011b).....	13
Figura 2.7 - Cálculo do $\psi$ da PTL através do <i>UCanPsi</i> .....	14
Figura 2.8 - Comparação de cálculo de fluxo de calor de diferentes regimes (Adaptado de: Kim & Yeo, 2020).....	18
Figura 2.9 - Estratégia de identificação da PT (Adaptado de Kim & Yeo, 2020).....	19
Figura 2.10 - Estrutura dos módulos do <i>EnergyPlus</i> (Fonte: <i>EnergyPlus</i> , 2010 (Adaptado de Almeida, 2016)).....	20
Figura 3.1 - Variação de $\psi$ entre programas para alvenaria de tijolo.....	24
Figura 3.2 - Variação de $\psi$ entre programas para madeira.....	24
Figura 3.3 - Variação de $\psi$ entre programas para betão.....	24
Figura 3.4 - Pormenor construtivo da ligação entre fachada e pavimento intermédio isolado pelo exterior (Itecons, 2011a).....	25
Figura 3.5 - pormenor construtivo da ligação entre fachada e pavimento intermédio isolado pelo interior (Itecons, 2011a).....	25
Figura 3.6 - Variação de $\psi$ com isolamento térmico pelo exterior para o caso 3.4.1 ( <i>UCanPsi</i> ).....	25
Figura 3.7 - Variação de $\psi$ com Isolamento Térmico pelo Interior para o caso 3.4.1 ( <i>UCanPsi</i> ).....	26
Figura 3.8 - Pormenor Construtivo da Ligação entre Fachada e Pavimento sobre ENU Isolado pelo Exterior (Itecons, 2011a).....	27
Figura 3.9 - Pormenor Construtivo da Ligação entre Fachada e Pavimento sobre ENU Isolado pelo Interior (Itecons, 2011a).....	27
Figura 3.10 - Variação de $\psi$ com a espessura do isolamento térmico aplicado pelo exterior para o caso 3.4.2 ( <i>UCanPsi</i> ).....	27
Figura 3.11 - Variação de $\psi$ com a espessura do isolamento térmico aplicado pelo interior para o caso 3.4.2 ( <i>UCanPsi</i> ).....	28
Figura 3.12 - Variação de $\psi$ consoante a variação extrema de $b_{Tr}$ com isolamento exterior ( <i>THERM</i> ).....	29
Figura 3.13 - Variação de $\psi$ consoante a variação extrema de $b_{Tr}$ com isolamento interior ( <i>THERM</i> ).....	29

Figura 3.14 - Variação de $\psi$ consoante o $b_{Tr}$ para uma espessura constante de 0.100 m com isolamento exterior ( <i>THERM</i> ). .....	30
Figura 3.15 - Variação de $\psi$ consoante o $b_{Tr}$ para uma espessura constante de 0.100 m com isolamento interior ( <i>THERM</i> ). .....	30
Figura 3.16 - Pormenor construtivo da ligação entre duas fachadas com alvenaria de tijolo isolado pelo exterior (Itecons, 2011a). .....	31
Figura 3.17 - Pormenor construtivo da ligação entre duas fachadas com betão isolado pelo exterior (Itecons, 2011a). .....	31
Figura 3.18 - Pormenor construtivo da ligação entre duas fachadas com madeira isolado pelo exterior (Itecons, 2011a). .....	31
Figura 3.19 - Pormenor construtivo da ligação entre duas fachadas com alvenaria de tijolo isolado pelo interior (Itecons, 2011a). .....	31
Figura 3.20 - Pormenor construtivo da ligação entre duas fachadas com betão isolado pelo interior (Itecons, 2011a). .....	31
Figura 3.21 - Pormenor construtivo da ligação entre duas fachadas com madeira isolado pelo interior (Itecons, 2011a). .....	31
Figura 3.22 - Variação de $\psi$ com a espessura do isolamento térmico pelo exterior para o caso 3.4.3 ( <i>UCanPsi</i> ). .....	32
Figura 3.23 - Variação de $\psi$ com a espessura do isolamento térmico pelo interior para o caso 3.4.3 ( <i>UCanPsi</i> ). .....	32
Figura 3.24 - Pormenor construtivo da ligação entre fachada e cobertura isolado pelo exterior (Itecons, 2011a). .....	33
Figura 3.25 - Pormenor construtivo da ligação entre fachada e cobertura isolado pelo interior (Itecons, 2011a). .....	33
Figura 3.26 - Variação de $\psi$ com isolamento térmico pelo exterior para o caso 3.4.4 ( <i>UCanPsi</i> ). .....	34
Figura 3.27 - Variação de $\psi$ com isolamento térmico pelo interior para o caso 3.4.4 ( <i>UCanPsi</i> ). .....	34
Figura 3.28 - Variação de $\psi$ com isolamento térmico pelo exterior para diferentes isolantes ( <i>UCanPsi</i> ). .....	35
Figura 3.29 - Variação de $\psi$ com isolamento térmico pelo interior para diferentes isolantes ( <i>UCanPsi</i> ). .....	35
Figura 4.1 - Planta simplificada da fração: PE – parede a Este sem requisitos; PN – parede a norte sem requisitos; PW- parede a oeste com requisitos; PS – parede a sul com requisitos; $V_n$ -vão envidraçado n. ....	38
Figura 4.2 – Corte transversal do edifício em análise. ....	39
Figura 4.3 - Corte transversal da fração em análise. ....	39
Figura 4.4 – Temperatura média diária nas superfícies interiores da envolvente opaca exterior para as diferentes localizações do isolamento térmico referente ao caso 1. ....	42
Figura 4.5 - Comparação entre casos da taxa de perda de calor por transferência em valores absolutos para isolamento na parede dupla. ....	47
Figura 4.6 - Comparação entre casos da taxa de perda de calor por transferência em valores percentuais para isolamento na parede dupla. ....	48

Figura 4.7 - Comparação entre casos da taxa de perda de calor por transferência em valores absolutos para isolamento pelo exterior. ....	48
Figura 4.8 - Comparação entre casos da taxa de perda de calor por transferência em valores percentuais para isolamento pelo exterior. ....	49
Figura 4.9 - Comparação entre casos da taxa de perda de calor por transferência em valores absolutos para isolamento pelo interior. ....	50
Figura 4.10 - Comparação entre casos da taxa de perda de calor por transferência em valores percentuais para isolamento interior. ....	50

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Casos de estudo apresentados na secção 3.4. ....	22
Tabela 3.2 - Condutibilidade térmica dos materiais de construção considerados. ....	23
Tabela 3.3 - Comparação de $\psi$ entre programas. ....	24
Tabela 3.4 - Valores de $b_{Tr}$ para uma espessura de isolamento térmico constante (0.100 m). ..	29
Tabela 3.5 – Expressões polinomiais associadas às curvas aplicável de 0.030 m a 0.150 m da variação de $\psi$ . ....	36
Tabela 4.1 - Detalhe construtivo dos elementos da fração em estudo. ....	40
Tabela 4.2 - Condutibilidade térmica dos materiais de construção considerados na fração em estudo. ....	40
Tabela 4.3 - Casos de estudo da fração. ....	41
Tabela 4.4 - Pontes térmicas lineares associadas à fração para o caso 1. ....	41
Tabela 4.5 - Áreas das superfícies a estudar para o caso 1. ....	41
Tabela 4.6 - Quantificação das PTL para o <i>EnergyPlus</i> para o caso 1. ....	46
Tabela 4.7 - Valores globais da análise comparativa entre regimes. ....	51
Tabela 4.8 - Valores globais da análise comparativa entre regimes (2). ....	51

## SIMBOLOGIA

- $Q_{hd}$  – Carga Específica de Aquecimento ( $W m^{-3}$ )  
 $q$  – Calor Transferido ( $W kg^{-1} °C^{-1}$ )  
 $H_{tr}$  – Coeficiente Global de Transferência de Calor por Transmissão ( $W °C^{-1}$ )  
 $H_{ext}$  – Coeficiente de Transferência de Calor pela Envolvente Exterior ( $W °C^{-1}$ )  
 $L_{2D}$  – Coeficiente de Transferência de Calor a Duas Dimensões ( $W m^{-1} °C^{-1}$ )  
 $L_{3D}$  – Coeficiente de Transferência de Calor a Três Dimensões ( $W °C^{-1}$ )  
 $U$  – Coeficiente de Transmissão Térmica Plana ( $W m^{-2} °C^{-1}$ )  
 $L$  – Desenvolvimento da Ponte Térmica Linear Medida pelo Interior do Edifício (m)  
 $f_{Rsi}$  – Fator de Temperatura Superficial  
 $Q_{hg}$  – Ganho de Calor No Edifício Através dos Elementos Exteriores de Construção ( $W m^{-3}$ )  
 $GD$  – Graus-Dia ( $°C$  dias)  
 $N_t$  - Necessidades Nominais Anuais Globais de Energia ( $kWh_{ep} m^{-2} ano^{-1}$ )  
 $N_{tc}$  - Necessidades Nominais Anuais Globais de Energia Primária ( $kWh_{ep} m^{-2} ano^{-1}$ )  
 $Q_d$  – Perda de Calor Interno por Utilização Habitacional ( $W m^{-3}$ )  
 $Q_{inf}$  – Perda de Calor no Edifício por Infiltração de Ar Através de Aberturas ( $W m^{-3}$ )  
 $Q_v$  – Perda de Calor no Edifício por Ventilação ( $W m^{-3}$ )  
 $R_t$  – Resistência Térmica ( $m^2 °C^1 W^{-1}$ )  
 $Q_{tr}$  – Transferência de Calor por Transmissão (MJ)  
 $\theta$  – Temperatura ( $°C$ )  
 $\theta_e$  – Temperatura Exterior ( $°C$ )  
 $\theta_{ENU}$  – Temperatura de Espaço Não Útil ( $°C$ )  
 $\theta_i$  – Temperatura Interior ( $°C$ )  
 $\theta_{si}$  – Temperatura Superficial Interna ( $°C$ )  
 $\lambda$  – Coeficiente de Condutibilidade Térmica ( $W m^{-1} °C^{-1}$ )  
 $\Phi$  – Taxa de Transferência de Calor ( $W m^{-2}$ )  
 $\psi$  – Coeficiente de Transmissão Térmica Linear ( $W m^{-1} °C^{-1}$ )  
 $\chi$  – Coeficiente de Transmissão Térmica Pontual ( $W m^{-3} °C^{-1}$ )

## ABREVIATURAS

- 1D – Uma Dimensão  
2D – Duas Dimensões  
3D – Três Dimensões  
 $b_{Tr}$  – Coeficiente de Redução de Perdas  
D.L. – Decreto Lei  
ENU – Espaço Não Útil  
EOE – Envolvente Opaca Exterior  
INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação  
IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera  
ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)  
Itecons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade  
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
LNA – Local Não Aquecido  
MDF – Método das Diferenças Finitas  
MEFi – Método dos Elementos Finitos  
MEFr – Método dos Elementos de Fronteira  
nZEB – *nearly-Zero Energy Building* (Edifícios com Necessidades Quase Nulas de Energia)  
PT – Ponte Térmica  
PTL – Ponte Térmica Linear  
RECS – Regulamento de Edifícios de Comércio e Serviços  
REH – Regulamento de Edifícios de Habitação  
SCE – Sistema de Certificação Energética de Edifícios  
SEE – Simulação Energética de Edifícios  
SLIT – Sistema Linear Invariável no Tempo  
TIF – Termografia Infravermelha  
XPS – Poliestireno Extrudido

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento Geral

A obtenção de melhores desempenhos térmicos e eficiências energéticas nos edifícios é garantida através de imposições regulamentares. Em Portugal, estão em vigor dois regulamentos que contribuem para a análise energética de edifícios de habitação, o Regulamento de Edifícios de Habitação (REH), e de edifícios de comércio e serviços, o Regulamento de Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

É possível encontrar noutros países regulamentos com diferentes abordagens de cálculo que nos fornecem resultados distintos. Em alguns casos há maior complexidade que se pode traduzir em maior rigor. As metodologias originam diferentes magnitudes de fluxo de calor através das pontes térmicas. Este problema foi abordado por T. Theodosiou *et al.* (2021) em “*Assessing the accuracy of predictive thermal bridge heat flow methodologies*”, que sugere a uniformização de metodologias europeias nos regulamentos dos Estados Membro da União Europeia (EU), de modo a evitar diferenças substanciais de resultados para o mesmo tipo de objeto.

A aplicação destes regulamentos, na fase de projeto, visa a melhoria da eficiência energética dos edifícios. É essencial minimizar as perdas de calor na conceção e construção de edifícios eficientes em termos energéticos (Berggren & Wall, 2013). Um dos aspetos com particular relevância são as pontes térmicas (PT). A implementação destes regulamentos visa minimizar o impacto provocado pelas PT, sendo necessário limitar o fluxo de calor através destas. No entanto, um cálculo detalhado do efeito das Pontes Térmicas Lineares (PTL) requer o uso de metodologias que são extremamente complexas, não correspondendo à simplicidade normalmente desejada pela indústria da construção.

O estudo detalhado das PTL deve ser tido em conta para que se implementem opções com menor risco de ocorrência de condensações que resultem em anomalias na superfície dos materiais.

Diferentes climas implicam diferentes impactos térmico e energéticos nos edifícios. A regulamentação nacional tem que ter em conta o clima para garantir o conforto esperado. Cálculos errados podem levar a sistemas de aquecimento subdimensionados, temperaturas interiores baixas e custos energéticos que excedem as expectativas (Berggren & Wall, 2013).

O objetivo da UE passa por garantir que os novos edifícios em construção sejam de elevado desempenho energético e respeitem o padrão de edifícios de energia quase nula (*nZEB*). Este passou a ser um critério obrigatório na construção de novos edifícios de habitação.

Estudos realizados por Ge & Baba (2017) indicam que a existência de PT nos edifícios aumentam as necessidades de aquecimento anuais em cerca de 40%, e que essas mesmas PT diminuem a procura anual de energia de arrefecimento do mesmo espaço em cerca de 8% a 26%. As paredes multicamadas com alta resistência térmica são muito utilizadas para reduzir as perdas de calor nos edifícios. No entanto, a presença de PT tende a reduzir o seu desempenho, aumentando as perdas de calor no inverno e os ganhos de calor no verão. Em climas frios, as PT têm uma maior influência no conforto térmico dos ocupantes, no risco de aumento de condensação e no crescimento de bolores (François *et al.*, 2021).

## 1.2 Motivação

Os edifícios são responsáveis por uma parte significativa do consumo de energia, que varia consoante as características construtivas dos mesmos. Nesta dissertação vamos estudar situações de PTL existentes nos edifícios, responsáveis pelo aumento das perdas de calor através das envolventes. O peso de uma PTL na perda de calor através de um pormenor construtivo é tanto mais elevado quanto maior for o coeficiente de transmissão térmica linear ( $\psi$ ) a ela associado.

Com o propósito de obter resultados cada vez mais fiáveis, a presente dissertação visa reforçar a importância da análise das ligações entre elementos e das suas metodologias de cálculo. Diversos estudos demonstram a necessidade de examinar e utilizar abordagens rigorosas para avaliar os efeitos de PTL, especialmente em edifícios onde a transmissão de calor pode constituir um problema. As metodologias são tão mais exatas quanto mais detalhado for o pormenor construtivo. Para uma maior aproximação à realidade, as metodologias atuais terão de ser guiadas pelo regime variável.

A variação de certos parâmetros relativos ao isolamento influencia em grande escala a transmissão de energia entre ambientes, sendo então necessário avaliar os mesmos. A espessura do isolamento é um dos parâmetros com maior impacto nas trocas de energia, sendo por isso necessário avaliar o seu contributo. Outro aspeto a realçar é a posição do isolamento térmico na solução construtiva.

A correção térmica das PT é necessária para garantir melhorias no comportamento das envolventes e ao nível do conforto. Existem múltiplas opções de materiais isolantes para serem aplicados nas construções, sendo que cada uma destas pode ter um maior ou menor impacto na vertente energética do edifício. Assim, é necessário avaliar o impacto de múltiplas opções de isolamento térmico numa análise em regime dinâmico.

### 1.3 Objetivos

A presente dissertação pretende responder a algumas questões, tais como:

- Qual o impacto dos parâmetros do isolamento térmico no cálculo energético do edifício?
- Qual o impacto do aumento da espessura no valor de  $\psi$ ?
- Como se pode incorporar uma estimativa da perda de calor linear no regime dinâmico?
- Qual a diferença nos valores do balanço energético numa análise em regime sazonal, em comparação com o regime dinâmico?
- Qual a importância da posição do isolamento térmico?

Para responder a estas questões vai-se analisar o impacto dos parâmetros do isolamento térmico usando diversas ferramentas de cálculo e a influência da posição do isolamento. Para atingir este objetivo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- analisar o impacto que o isolamento térmico tem sobre a eficiência energética da fração;
- estimar a taxa de transferência de calor ( $\Phi$ ) através das PTL, considerando diversos tipos de isolamentos e analisar os respetivos valores de  $\psi$ ;
- estudar o impacto da espessura e da condutibilidade térmica do isolamento sobre o valor de  $\psi$ ;
- estudar o impacto e consequências das PTL em função do isolamento e da sua posição;
- analisar a influência do isolamento térmico e dos seus parâmetros sobre as PTL;
- aplicar um modelo de simulação dinâmica num caso de estudo (fração de um edifício multifamiliar);
- comparar resultados entre o regime sazonal e dinâmico para diferentes tipos de isolamentos e suas posições para diferentes PTL;
- estudar e comparar a influência das PTL sobre a envolvente opaca exterior (EOE) de uma fração.

### 1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, sendo o capítulo introdutório designado por “Introdução”. Neste capítulo apresentamos o enquadramento do tema, discutida a sua relevância para a sociedade e para o setor da construção, bem como para o estado dos conhecimentos atuais, fazendo também uma pequena introdução aos temas que serão analisados com maior detalhe nos capítulos subsequentes. São também apresentados os objetivos principais da dissertação, abordada a motivação da presente dissertação e descrita a estrutura do documento.

No segundo capítulo, “Métodos de Caracterização de Pontes Térmicas Lineares”, sintetizamos, de forma estruturada, o trabalho de recolha bibliográfica incidente sobre as PT, a forma de

caraterização das mesmas, bem como as suas metodologias de cálculo. Também são descritos os programas de cálculo usados.

No terceiro capítulo, “Impacto dos Parâmetros Térmicos nos Coeficientes de Transmissão Térmica Linear”, apresentamos um estudo sobre algumas ligações, nas quais estudamos o impacto dos diversos parâmetros do isolamento térmico nas PTL. É também feita uma proposta sobre um determinado conjunto de casos que nos permite, de forma expedita, obter valores de  $\psi$ .

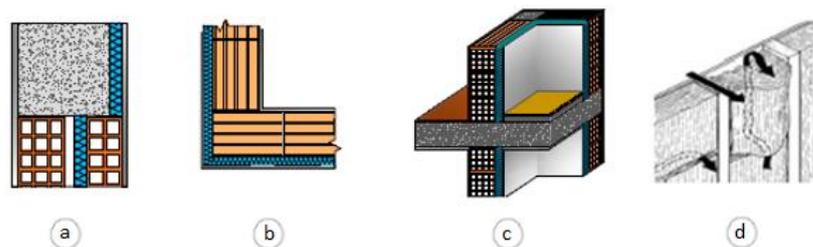
No quarto capítulo, “Estudo de Integração das Pontes Térmicas Lineares no Método de Cálculo Dinâmico de Edifícios”, analisamos um caso de estudo referente a uma fração unifamiliar, na qual são estudadas as suas PTL em regime sazonal, sendo esta comparada posteriormente com o regime dinâmico. Neste capítulo apresentamos uma análise sobre a influência da posição do isolamento na solução construtiva.

Por fim, no quinto capítulo, “Considerações Finais”, apresentamos as principais conclusões e identificamos possíveis trabalhos futuros.

## 2. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DE PONTES TÉRMICAS LINEARES

### 2.1 Introdução

A PT é, de acordo com a (ISO 10211, 2017), “a parte da envolvente do edifício onde a resistência térmica uniforme é significativamente alterada pela penetração total ou parcial da envolvente do edifício por materiais com uma condutibilidade térmica diferente, e/ou uma alteração na espessura do material, e/ou uma variação de espessura entre as áreas internas e externas, tais como as que ocorrem nas ligações entre parede/pavimento/cobertura”. As PT devem, portanto, ser tidas em conta na fase de conceção do edifício, de modo a prevenir anomalias construtivas e melhorar a eficiência energética do mesmo (Prata *et al.*, 2014). As PT, quando se localizam num local onde existe uma grande diferença térmica, podem permitir condições benéficas ao desenvolvimento de fungos e outras anomalias causadas pela condensação (ISO 13788, 2012). “As pontes térmicas são normalmente caracterizadas por uma concentração de perdas de calor, que conduz a temperaturas superficiais interiores mais baixas. De facto, a diminuição da temperatura na superfície, associada a uma baixa taxa de renovação de ar no interior e baixos níveis de radiação solar, é responsável pela ocorrência de condensações superficiais, podendo potenciar o aparecimento de patologias construtivas, nomeadamente o desenvolvimento de manchas, fungos, bolores, fissurações e degradação dos revestimentos (...)” (Garrido *et al.*, 2018). São vários os fatores que influenciam e agravam as patologias localizadas nas PT nos edifícios, nomeadamente: alterações na resistência térmica ( $R_T$ ) da envolvente, deficiente construção de elementos construtivos (em termos estruturais), diferentes espessuras no mesmo elemento construtivo e descontinuidades do isolamento térmico. Sabendo que existem diferentes tipos de PT, é essencial conhecer e saber identificar as mesmas (ver figura 2.1).



**Figura 2.1** - Pontes térmicas em edifícios: Plana (a), Linear (b), Pontual (c) e Convectiva (d) (Adaptado de Itecons, 2011b).

As PTL correspondem a ligações bidimensionais (2D) entre diferentes elementos construtivos (ex. figura 2.1 (b)). Visto que as PTL demonstram ter influência no comportamento térmico do edifício, estas devem ser consideradas na fase de projeto do edifício, a fim de se reduzirem as perdas de calor através das mesmas e de evitar a já referida ocorrência de condensações.

Devido à natureza multifacetada dos fluxos de calor através de PTL, a sua magnitude é normalmente estimada com base em valores pré-definidos ou como um sobretaxa da perda global da transmissão de calor (T. Theodosiou *et al.*, 2021). A opção recomendada consiste na determinação de  $\psi$  e estes valores podem ser definidos por três abordagens distintas:

- metodologia da norma ISO 10211 – erro de  $\pm 5\%$ ;
- consulta de catálogos de PTL – erro de  $\pm 20\%$ ;
- consulta de tabelas com valores por defeito semelhantes às propostas pelo D.L. n°118/2013 no Despacho n° 15793-K/2013 – erro de  $\pm 50\%$ .

T. G. Theodosiou *et al.* (2015) também provaram que as PTL têm um efeito substancial na transmissão global de calor através da envolvente do edifício em casos de características geométricas complexas com grandes fatores de forma. A existência de varandas é uma situação em que as PTL são evidentes e críticas.

São cada vez mais os estudos realizados de forma a preverem o comportamento térmico de PTL, assumindo que as soluções construtivas estão sujeitas a variações de temperatura ao longo do tempo (comportamento variável) (Tadeu *et al.*, 2011). A importância de uma estimativa fiável do fluxo de calor nas PTL estende-se para além da precisão pretendida para os cálculos relacionados com a eficiência energética. De facto as PTL comprometem o desempenho higrótérmico, uma vez que essas áreas são propensas à condensação de vapor na superfície interior dos elementos do edifício (T. Theodosiou *et al.*, 2021). Estas situações também beneficiam de estudos em regime variável.

Nas subsecções seguintes apresentamos as diferentes abordagens que se podem aplicar na caracterização das PTL.

### 2.1.1 Experimental (laboratório)

Relacionado com o estudos das PTL não há nenhum ensaio laboratorial normalizado. No entanto, a determinação da condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) dos materiais que constituem as soluções construtivas deve ser efetuada com base em ensaios normalizados. Em termos experimentais existe um equipamento descrito em norma que pode ser usado para determinar coeficientes de transmissão térmica, a *hotbox* (ver figura 2.1). Com recurso a este equipamento é possível estudar pormenores construtivos que integrem PTL, apesar de não haver ensaios normalizados para este efeito.

A ISO 8990 apresenta duas alternativas para o método da *hotbox*: o método da *hotbox* calibrada e o método da *hotbox* resguardada. Na *hotbox* calibrada, as duas câmaras são construídas com paredes de alta resistência térmica constituídas por um material isolante com propriedades conhecidas de modo a minimizar as perdas de calor dentro da câmara por condução para o exterior. Uma das câmaras emite energia sob a forma de calor, numa única direção, para a câmara que se encontra na outra extremidade da *hotbox*. Ambas as câmaras, quente e fria, estão

a temperaturas conhecidas. Os resultados são obtidos através de termopares distribuídos ao longo do provete, recolhendo dados que nos permitem analisar e concluir acerca das propriedades dos materiais através de pequenos cálculos estabelecidos pela norma ISO 8990 (Asdrubali & Baldinelli, 2011). Para quantificar as perdas de calor pela parede da *hotbox*, são realizados vários testes de calibração utilizando painéis de calibração com resistência térmica conhecida.

Na *hotbox* resguardada termicamente, uma caixa de medição que envolve uma grande parte do provete no lado quente é instalada numa câmara com ambiente controlado. A temperatura e o movimento do ar devem ser controladas para evitar perdas de calor inesperadas através das paredes da *hotbox*. A diferença entre este método e o método da *hotbox* calibrada reside no facto de não ser necessária qualquer calibração. A área medida do provete é menor do que na *hotbox* calibrada, o que faz com que este último método seja melhor para a análise de provetes não regulares (Prata, 2017).



**Figura 2.2** - Perspectiva geral de uma *hotbox* (Asdrubali & Baldinelli, 2011).

Apesar de ser de elevada dificuldade analisar elementos construtivos e pormenores mais detalhados com a *hotbox*, estes ensaios são de grande utilidade para analisar individualmente materiais isolantes das mais variadas espessuras, sendo possível determinar, de forma exata, o valor de  $\lambda$  associado ao isolamento em estudo. Este parâmetro permite, assim, estudar o  $\Phi$  dos mais variados sistemas.

### **2.1.2 Termografia (*in-situ*)**

Dado que a tecnologia infravermelha é classificada como um ensaio não destrutivo, esta apresenta um grande número de aplicações na monitorização, como em áreas médicas, controlo de processos de produção, vigilância em segurança, manutenção preditiva e, claro, inspeções de edifícios (Garrido *et al.*, 2018). A termografia infravermelha (TIF) é uma das técnicas aplicáveis ao estudo da questão do consumo de energia em edifícios, novos e antigos. De facto, existem vários estudos em que esta técnica é aplicada para detetar falhas de isolamento nos edifícios, bem como para detetar áreas com humidade (Garrido *et al.*, 2018).

Duas abordagens são possíveis para a utilização de TIF em edifícios, nomeadamente "ativa" e "passiva". Com a TIF passiva, o edifício é observado em condições naturais quando o gradiente de temperatura interior/exterior é suficientemente elevado para que as irregularidades térmicas sejam detetáveis. Esta é a abordagem utilizada de forma mais regular. Contudo, usando a TIF ativa, aplica-se ao edifício uma carga térmica, sendo a sua resposta dinâmica analisada. A TIF ativa no sector da construção foi introduzida pela primeira vez por Grinzato *et al.* (1998). A carga térmica pode ser, por exemplo, um aquecedor radiante artificial ou o sol. Douguet *et al.* (2018) também desenvolveram uma técnica de deteção de PT baseada no aquecimento do ar interior. Este método tem a vantagem de ser aplicável independentemente da estação do ano e das condições meteorológicas (François *et al.*, 2021).

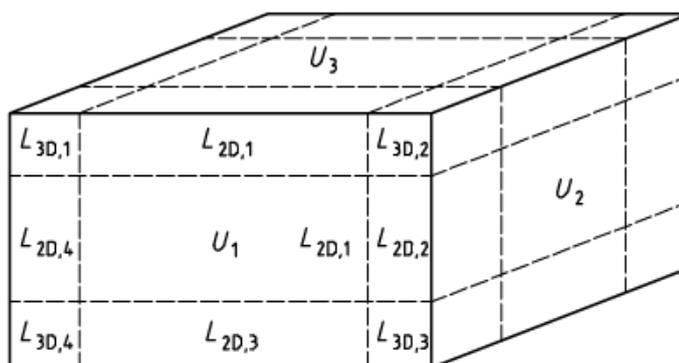
A técnica de TIF ativa pode permitir a medição da resistência térmica de paredes. A resposta térmica da parede é analisada através de técnicas inversas. Estudos efetuados por François *et al.* (2021) indicam que os valores de  $\psi$  estimados pelo método ativo diferem menos de 20% que os valores de  $\psi$  estabelecidos como referência para o estado estacionário.

### 2.1.3 Cálculo em Regime Permanente

Com o objetivo de calcular o valor de  $\Phi$  entre ambientes e o valor de  $\psi$  das PTL, é necessário conhecer o pormenor construtivo. Através do cálculo em regime permanente é possível obter os resultados de forma simplificada, facilitando os cálculos. O  $\Phi$  representa a quantidade de energia que é transferida (W) por cada unidade superficial ( $m^2$ ) de elemento construtivo. O  $\psi$  representa a quantidade de energia (W) transferida ao longo de uma ligação entre elementos construtivos (m), sujeitos a uma diferença de temperatura unitária entre os ambientes por eles separados ( $^{\circ}C$ ). Estes dois coeficientes serão abordados com maior detalhe na secção 2.2.

O valor de  $\Phi$  através de um pormenor construtivo tridimensional (3D) que separa dois ambientes com diferentes temperaturas, interior ( $\theta_i$ ) e exterior ( $\theta_e$ ), pode ser dado pela equação (2-1):

$$\Phi = L_{3D} (\theta_i - \theta_e) \quad (2-1)$$



**Figura 2.3** - Divisão da envolvente da fração em estudo para modelos 3D, 2D e 1D (ISO 10211, 2017).

O cálculo do coeficiente de transferência de calor a três dimensões ( $L_{3D}$ ) (representado na figura 2.3), em regime permanente, baseia-se na soma dos coeficientes de transmissão térmica plana ( $U$ ), linear ( $\psi$ ) e pontual ( $\chi$ ), que se encontram no pormenor construtivo. Na prática, o  $\Phi$  através de cada coeficiente de transmissão térmica afeta os outros coeficientes. No entanto, para conveniência, foi desenvolvida uma fórmula de cálculo linear, apresentada na equação (2-2) (Kim & Yeo, 2020).

$$L_{3D} = \sum U_j * A_j + \sum \psi_j * l_j + \sum \chi_j \quad (2-2)$$

#### 2.1.4 Cálculo em Regime Variável

Apesar da simulação bidimensional de transferência dinâmica de calor ser um método complexo, a maioria dos estudos sobre o comportamento térmico dos elementos de construção utilizam abordagens em estado estacionário (Tadeu *et al.*, 2011). Contudo, estas abordagens não são as mais adequadas, uma vez que não consideram a variação de temperatura ao longo do tempo e, portanto, não permitem estimar a influência da capacidade térmica dos materiais (Tadeu *et al.*, 2011). A complexidade dos projetos e respetivos pormenores construtivos impõem modelos de cálculo mais detalhados e mais rigorosos. A opção por modelos de cálculo em regime transiente pode dar-nos resultados mais exatos.

Tendo em conta que não existe tanta exatidão nos resultados obtidos no regime permanente, é necessário trabalhar com métodos que nos forneçam valores mais próximos dos reais.

Atualmente, existem muitos programas que permitem ter todos estes parâmetros em consideração, calculando de forma detalhada o comportamento dos modelos. Estes programas podem ser aplicados a diferentes geometrias. Contudo, estes programas podem ser baseados em diferentes métodos: o método da matriz de transferência de funções (MMTF), o método harmónico (MH), o método dos fatores de estruturas (MFE), o método misturado (MM), entre outros (Quinten & Feldheim, 2016). Assim, é possível o resultado pretendido.

Através de um modelo baseado no método do elemento fronteira (MEFr), Simões *et al.* (2014) demonstraram, com cálculo dinâmico, que a perda de energia através de PTL corresponde a 17% da perda total de calor num edifício de referência, sendo só superada pelas perdas de energia através de paredes exteriores.

#### 2.1.5 Cálculo Normalizado de Acordo com a Norma

O cálculo normalizado baseia-se em normas definidas pela *International Organization for Standardization* (ISO). Em 2017, estas normas sofreram uma revisão, tendo sido agrupadas de forma a compactar toda a informação disponível sobre fluxos de calor, transferência de calor e PT. É na norma ISO 10211 que podemos encontrar definidas as especificações dos modelos

geométricos bidimensionais e tridimensionais de PT para cálculo numérico de fluxos de calor, para avaliação da perda de calor de um edifício ou parte dele e de temperaturas superficiais mínimas, para avaliação do risco de condensação superficial. A metodologia proposta pela norma ISO 10211 permite determinar coeficientes de transmissão térmica lineares, pontuais e fatores de temperatura superficial (B. Miguel *et al.*, 2018).

Na secção 2.2 encontramos a descrição detalhada do método de cálculo de acordo com a norma ISO 10211.

### 2.1.6 Cálculo Simplificado de Coeficientes de Transmissão Térmica Linear

Quando os detalhes de um edifício ainda não foram concebidos, mas a geometria e a forma principal do mesmo estão definidas, tais como as áreas dos diferentes elementos da envolvente do edifício (como coberturas, paredes e pisos), apenas pode ser realizada uma estimativa aproximada das contribuições das PTL para a perda global de calor. A norma ISO 14683 fornece o resultado de  $\psi$  de forma simplificada. Quando houver informação suficiente, podemos obter valores mais precisos de  $\psi$  para cada uma das PTL, comparando o detalhe particular com o exemplo mais adequado de um catálogo de PTL, utilizando esse valor de  $\psi$  (ISO 14683, 2003).

Todos os métodos para determinar  $\psi$  podem ser usados quando os detalhes construtivos são conhecidos na sua totalidade (geometria, pormenores, materiais usados), incluindo cálculos numéricos, que dão o valor mais preciso para  $\psi$ . As tabelas de valores por defeito dos coeficientes de transmissão térmica linear podem ser estabelecidas de acordo com as regras da norma ISO 14683. Estas tabelas devem ser claras sobre a aplicabilidade dos valores que contêm e basear-se em cálculos que não subestimem o efeito das pontes térmicas (ISO 14683, 2003).

## 2.2 Método de Cálculo de Acordo com a Norma ISO 10211

A troca de energia entre ambientes pode acontecer de forma direta ou indireta. O cálculo destes valores é essencial para a determinação do balanço de energia na fração em estudo. Na ISO 10211 é considerado um método em que a temperatura exterior é constante, sendo as mesmas determinadas com recurso a valores de referência definidos na legislação (Cabral, 2013), em função do local e da altitude onde se insere o edifício, não considerando eventuais variações que possam ocorrer durante o dia (Rodrigues, 2020).

As abordagens padronizadas são baseadas ou em valores por defeito, cálculos simplificados (ISO 14683), ou cálculos detalhados (ISO 10211). Estes métodos assumem que a solução construtiva é conhecida e dependem dos valores das propriedades térmicas dos materiais, bem como do ambiente exterior e interior (temperatura do ar, humidade relativa, vento, etc.).

O cálculo computacional de diversos coeficientes é baseado na abordagem tradicional de cálculo, sendo esta definida através de um conjunto de equações. Nesta abordagem, as equações

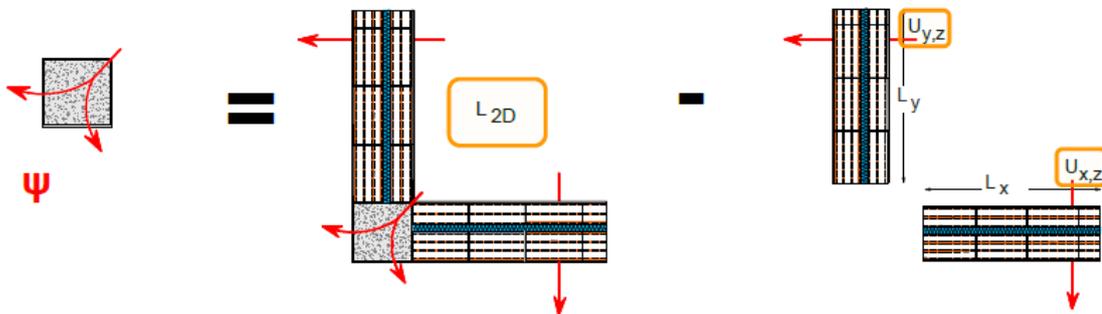
necessárias vão servir para determinar o  $\Phi$ , que representa a taxa de energia térmica transferida através de uma determinada superfície.

Os fluxos de calor que ocorrem nas soluções construtivas onde existem PTL têm um perfil de temperaturas associado, bem como os respectivos valores de  $\psi$ . Estes podem ser determinados segundo a metodologia indicada na ISO 10211 (figura 2.4). O valor de  $\Phi$ , por metro de PTL, é dado pelo produto entre o coeficiente de transferência de calor ( $L_{2D}$ ) determinado a partir de modelos de cálculo numérico bidimensional e a diferença de temperaturas entre os ambientes interior e exterior:

$$\Phi = L_{2D} (\theta_i - \theta_e) \quad (2-3)$$

Sabendo que a taxa total de transferência de calor, através de um pormenor construtivo da envolvente de um edifício, resulta da soma dos fluxos térmicos que ocorrem pelos diferentes elementos que o constituem, calculados segundo a norma ISO 13789, determina-se o valor de  $\psi$  através da equação (2-4) abaixo indicada:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_j (U_j * b_j) \quad (2-4)$$



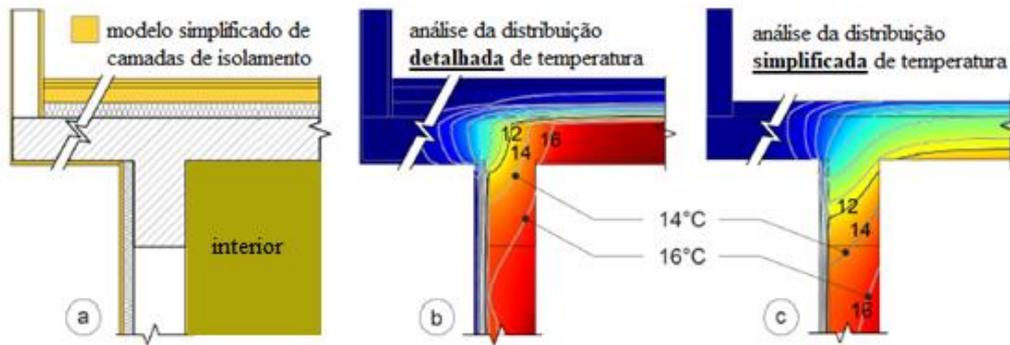
**Figura 2.4** – Representação esquemática da metodologia de cálculo prevista na ISO 10211 (Itecons, 2011b).

### 2.2.1 Cálculo da Taxa de Transferência de Calor de acordo com a ISO 10211

Já existem inúmeros programas desenvolvidos com o propósito de estudar fenómenos de transferência de calor recorrendo a programas de cálculo numérico bidimensional baseados em métodos como o método dos elementos finitos (MEFi), o método das diferenças finitas (MDF) ou o método dos elementos de fronteira (MEFr). A condução, mecanismo de transferência de calor num sólido, é regida pela lei de Fourier.

Embora eventuais simplificações relativas às características do elemento construtivo sirvam para a maioria dos casos de estudo, estas acrescentam uma fonte de erro e de incerteza, pois

podem afetar consideravelmente os fluxos de calor, especialmente em casos onde os elementos construtivos são envoltos por isolamento térmico de baixa espessura, como é possível observar na figura 2.5. Nesta figura ilustramos o impacto que algumas simplificações podem ter na distribuição de temperaturas.



**Figura 2.5** – Detalhe de uma ligação (a) e análise de distribuição de temperaturas detalhada (b) e simplificada (c) (Adaptado de T. Theodosiou *et al.*, 2021).

T. Theodosiou *et al.* (2021) referiram que, na abordagem numérica aplicada neste tipo de construção, todos os materiais usados são considerados e têm elevada relevância. A espessura das camadas e a condutibilidade térmica associada também são consideradas, com o objetivo de alcançar a representação mais exata dos elementos de construção. O facto das espessuras reais das camadas terem sido consideradas no contexto da abordagem numérica, conduz a uma importante diferença entre este método e os outros, em que a espessura real do isolamento do material é contabilizada e afeta a estimativa linear que se pretende obter.

### 2.2.2 Modelo Geométrico

O modelo geométrico deve ser elaborado de acordo com regras impostas pela ISO 10211. As linhas de corte do modelo geométrico correspondem a planos/secções através dos quais não existem trocas de calor (condições adiabáticas). A extensão do modelo geométrico deve ser suficiente para que as linhas isotérmicas junto aos planos/secções de corte do modelo sejam paralelas entre si, ou seja, que as linhas do fluxo de calor deixem de apresentar a influência da ligação. O valor da extensão corresponde ao maior valor entre o corte do elemento e a PTL, devendo este ser o valor máximo entre 1 m e o triplo do valor da espessura do elemento a estudar. Segundo a norma ISO 10211 as medições podem ser efetuadas pelo exterior ou pelo interior desde que se mantenha o mesmo tipo de medição para todas as zonas do edifício. Em Portugal, na nossa regulamentação, assume-se que as medições são feitas pelo interior.

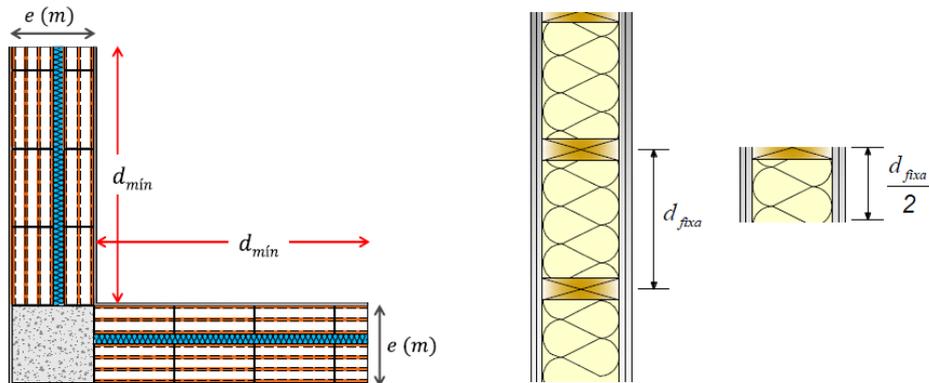


Figura 2.6 - Modelo geométrico de acordo com a ISO 10211 (ITEcons, 2011b).

### 2.2.3 Condições de Fronteira

Para determinar o valor de  $\Phi$  devemos ter em conta todos os detalhes construtivos da solução associados à PTL em estudo, desde materiais que compõem o sistema, as suas espessuras e os respetivos coeficientes de condutibilidade térmica. Também é necessário definir a temperatura interna, externa e do local não aquecido adjacente caso o sistema esteja circunscrito por um espaço não útil (ENU). A resistência térmica superficial também tem de ser considerada de modo a contabilizar o efeito da radiação e da convecção na superfícies exteriores e interiores das PTL. Os valores estão tabelados nas tabelas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (Santos & Matias, 2006).

### 2.2.4 Programas de Cálculo

Com o objetivo de determinar a transferência de calor entre ambientes que ocorre na PTL, escolhemos dois programas que permitem estimar a taxa de transferência bidimensional de calor e assim, determinar os valores de  $\psi$  das PTL: o *UCanPsi* e o *THERM*.

#### 2.2.4.1 UCanPsi

O *UCanPsi* é um programa de uso gratuito, que funciona na plataforma de programação Visual Basic e permite uma análise numérica das PT com MDF, calculando o valor de  $\Phi$  e a distribuição da temperatura através da utilização de modelos numéricos bidimensionais e tridimensionais em regime permanente. O erro numérico associado a cada cálculo realizado vai variar consoante o detalhe da malha aplicada ao modelo geométrico (Anderlind & Byggnadsfysik, 2015).

Este programa é baseado na norma ISO 10211 para determinar o valor de  $\psi$  em ligações de PTL. Ao valor total de transferência de calor pelo pormenor construtivo (L2D) é retirada a perda

de calor pelos elementos (paredes, pavimentos) calculado à parte para obter a perda na PTL, como é explicado na subsecção 2.1.3 (ver figura 2.7).

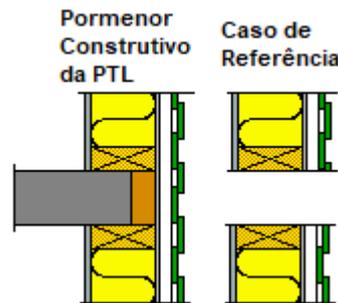


Figura 2.7 - Cálculo do  $\psi$  da PTL através do *UCanPsi*.

#### 2.2.4.2 THERM

O *THERM* é um programa de análise bidimensional de transferência de calor por condução, desenvolvido pela Universidade de Califórnia para o Departamento de Energia dos Estados Unidos da América. Este programa baseia-se no MEFi, no qual é possível modelar as mais distintas e complexas geometrias de pormenores construtivos. Apresenta um interface simples e interativo. Embora tenha sido desenvolvido principalmente para modelar as propriedades térmicas das janelas, este programa também é apropriado para a modelação de outros componentes de edifícios, tais como paredes, portas, coberturas e pavimentos e de PTL. Este programa estima fluxos de calor aplicando o conceito explorado na secção 2.2 (Huizenga *et al.*, 1999).

Neste programa conseguimos observar diferentes características do pormenor a estudar: a malha de elementos finitos (a que é usada pelo programas para determinar os fluxos), linhas isotérmicas (que nos dão a ideia da distribuição de temperaturas no pormenor construtivo), vetores com os fluxos de calor (que nos dão a perceção da orientação e sentido da transferência de energia através do pormenor construtivo) e um diagrama com a distribuição de temperaturas. Também podemos obter diretamente os valores de  $U$  e de  $R_T$  relativos ao pormenor construído.

### 2.3 Integração das Pontes Térmicas Lineares nos Métodos de Cálculo em Regime Sazonal de Edifícios

As normas de construção correntes são utilizadas como um fundamento para definir padrões e requisitos globais, de modo a que o desempenho térmico do pormenor construtivo seja estável, em todas as envolventes do edifício e em todos os edifícios construídos. De facto, no decorrer dos últimos anos, o aumento progressivo dos requisitos energéticos da construção forçou uma tendência para um maior uso de isolamento na envolvente dos edifícios (Parlamento Europeu e do Conselho, 2018).

A análise de PTL em edifícios é crucial para determinar os pontos mais suscetíveis ao desenvolvimento de patologias, sendo por isso crucial evitar que estas sejam recorrentes e de grande amplitude. Quando se elabora um estudo de PTL, em regime sazonal, temos de ter em conta que não vamos obter uma resposta tão precisa como se estivéssemos a elaborar uma análise em regime dinâmico. Contudo, esta opção é a mais comum, pelo facto de reduzir e facilitar imenso os cálculos de transferência de calor.

Os valores de  $\psi$  usados no cálculo em regime permanente são obtidos através de uma das formas enunciadas em 2.1. Estes valores vão ser tanto mais corretos quanto melhor a aproximação e detalhe usado. O valor de  $\psi$  é calculado de acordo com a ISO 10211. Ao multiplicar este valor pelo comprimento total da ligação ( $L$ ) obtemos uma das parcelas do coeficiente de transferência de calor pela envolvente exterior ( $H_{ext}$ ), representado na equação (2-5), que é um dos termos de cálculo do coeficiente de transferência de calor por condução ( $H_{tr}$ ).

$$H_{ext} = \sum_j (A_j * U_j) + \sum_j (L_j * \psi_j) \quad (2-5)$$

Para realizar estes cálculos sazonais em edifícios é necessário respeitar a ISO 13790. Esta norma descreve a metodologia de cálculo do desempenho energético dos edifícios, analisando em detalhe a transferência de energia pela envolvente que vai servir de base ao cálculo das necessidades de aquecimento e arrefecimento. Este método requer o conhecimento prévio de dados referentes a parâmetros físicos da envolvente do edifício. Sabendo que esta análise será realizada em regime sazonal, os dados são trabalhados consoante a estação que se pretende analisar e o local em estudo (Jacinto, 2014).

Com o objetivo de determinar a transferência de calor por transmissão ( $Q_{tr}$ ) necessitamos de dados climáticos, pelo que é necessário escolher uma das seguintes equações, sendo a equação (2-6) referente a um período de aquecimento e a equação (2-7) ao período de arrefecimento (ISO 13790, 2014).

$$Q_{tr} = H_{tr} * (\theta_{i,H} - \theta_e) * t' \quad (2-6)$$

$$Q_{tr} = H_{tr} * (\theta_{i,C} - \theta_e) * t' \quad (2-7)$$

Fouda *et al.* (2014) evidenciaram que existe uma interligação entre a quantidade de energia necessária para aquecer um edifício de referência e as propriedades das soluções usadas na construção do mesmo. Contudo, o mesmo autor refere que cada edifício tem características próprias, devido à sua construção, bem como parâmetros relativos à sua localização, sendo necessário estudar cada edifício individualmente, de forma a avaliar o seu comportamento térmico e poder otimizar a sua envolvente. A carga de aquecimento representa a quantidade de

calor que deve ser adicionada numa hora para manter uma temperatura ambiente para determinadas condições climáticas exteriores.

Este valor é denominado por carga específica de aquecimento ( $Q_{hd}$ ) que pode ser determinada a partir da equação (2-8). Existem quatro termos nesta equação, que são: o ganho de calor no edifício através dos elementos exteriores de construção ( $Q_{hg}$ ), a perda de calor no edifício por ventilação ( $Q_v$ ), a perda de calor no edifício por infiltração de ar através de aberturas ( $Q_{inf}$ ) e a perda de calor interno por utilização habitacional ( $Q_d$ ). Estes termos são dependentes das características do sistema, como detalhes dos pormenores construtivos, localização, ventilação, iluminação, calor humano, entre outros:

$$Q_{hd} = Q_{hg} + Q_v + Q_{inf} - Q_d \quad (2-8)$$

Num estudo realizado por Fouda & Melikyan (2010) associado à fase de arrefecimento, foi possível concluir que a metodologia de cálculo de arrefecimento estudada pode ser aplicada em qualquer edifício e em qualquer local. De forma semelhante ao método usado para determinar as necessidades energéticas de aquecimento de um edifício, este método pretende determinar a carga térmica de arrefecimento. Neste caso, e alterando os parâmetros necessários, foi possível concluir que é extremamente importante definir não só as quantidades energéticas no período diurno como também durante o período noturno, onde se nota que a discrepância entre ambas as fases do dia é significativa.

#### **2.4 Abordagem para Integração das Pontes Térmicas Lineares nos Métodos de Cálculo Dinâmico de Edifícios**

Apesar de muitos cálculos serem realizados com base em regime estacionário, estes têm erros associados e não consideram todos os parâmetros que permitam resultados mais precisos. A PTL é normalmente tomada em consideração na fase de projeto do edifício, assumindo condições não variáveis. No entanto, a análise da PTL deve envolver a variação da temperatura ao longo do tempo, de modo a ser possível considerar a influência da inércia térmica dos materiais (Prata *et al.*, 2014). Tendo também em conta que a simulação bidimensional de transferência dinâmica de calor é extremamente complexa, muitos dos estudos realizados sobre o comportamento térmico dos elementos de construção adotam abordagens em estado estacionário. Contudo, estes não consideram a variação de temperatura ao longo do tempo e, por isso, não permitem estimar a influência da capacidade calorífica dos materiais, que é responsável pelo atraso térmico (Tadeu *et al.*, 2011).

Por serem mais precisos, os métodos de cálculo dinâmico são de grande utilidade na determinação de fluxos de calor nas PTL. Esta precisão é importante quando se está a fazer cálculo energético do edifício. O detalhe conseguido através destes métodos encontra-se no facto de que os mesmos se baseiam num estudo em regime variável, sendo assim possível estudar as permutas de energia ao longo do tempo. Estes estudos, por norma, são realizados de

forma horária (também podem ser realizados numa menor escala temporal, consoante o “erro” desejado e as capacidades computacionais dos equipamentos usados).

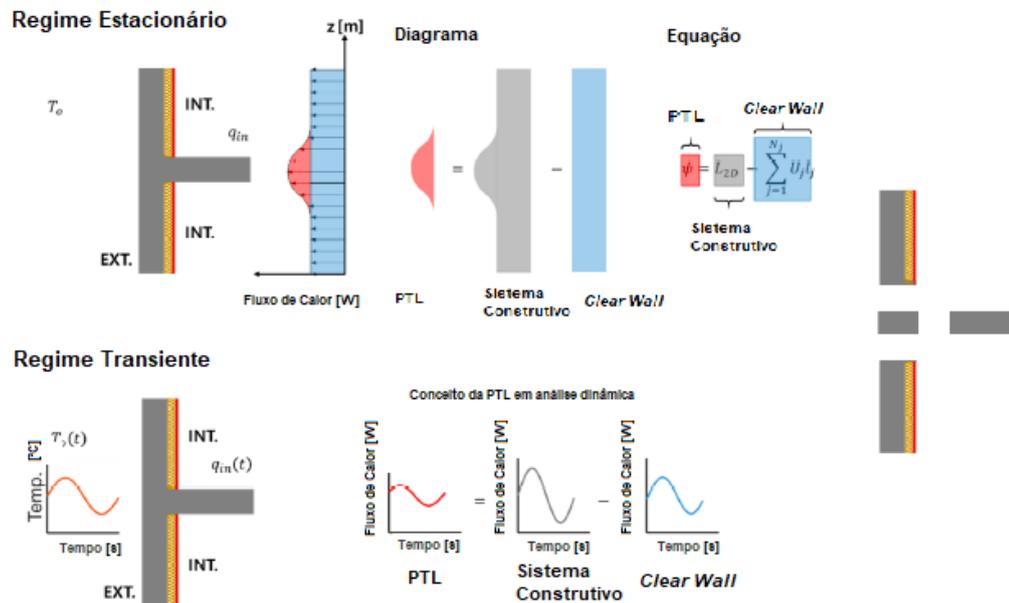
Além disso, devido à inércia térmica da PTL, a análise deve ser realizada em condições dinâmicas, a fim de verificar com rigor o  $\Phi$  através da PTL. A inércia térmica está fortemente relacionada com o atraso térmico que é a capacidade que está adjacente à solução construtiva de libertar, de forma gradual e lenta, a energia em forma de calor absorvida pela envolvente. Este atraso térmico é importante para estes estudos porque nos permite, na análise dinâmico, ter a perceção da variação da temperatura consoante diferentes fases do dia. Portanto, a análise dinâmica da PTL é um problema multidimensional complexo, mas continua a ser necessária na Simulação Energética de Edifícios, SEE (Kim & Yeo, 2020), sendo assim necessário e útil por em prática estas metodologias.

Existem dois métodos de cálculo dinâmico: simples e detalhado. O método simples segue a metodologia demonstrada na ISO 13790 e é baseado no cálculo horário, sendo trabalhoso mas de baixo grau de complexidade. Já o método detalhado, apesar da sua complexidade é o mais usual por ser tão preciso. Os métodos de cálculo dinâmico detalhados, mais usualmente conhecidos por métodos de simulação dinâmica, exigem o recurso a programas computacionais que permitam analisar o desempenho energético do edifício, através dos quais é possível avaliar, de forma quantitativa, os potenciais consumos e necessidades de energia do edifício para determinadas condições de utilização e funcionamento dos mesmos. Estes programas têm a capacidade de simular as variações das condições do edifício em períodos inferiores a uma hora, prevendo o comportamento térmico e respetivas necessidades de energia associadas (Rodrigues, 2020). Um dos exemplos de programas mais difundido é o *EnergyPlus*.

### 2.4.1 Cálculo Dinâmico Aplicado a Programas de Simulação

Atualmente, são poucos os programas destinados a cálculo energético que incluam PTL e que recorrem a metodologias dinâmicas. Apesar de ser uma metodologia conhecida, o método da parede equivalente estudada primeiramente por Kossecka & Kosny (1997) é uma abordagem particularmente interessante. Akihiro Nagata, Koldo Escudero, Elżbieta Kossecka, entre outros, já realizaram estudos sobre a construção de paredes equivalentes e as suas benesses em estudos comparativos relativamente a paredes existentes e a validação da simulação das mesmas. Recentemente, Kim & Yeo (2020) adaptaram o método de forma a conseguir estudar as PTL em programas de SEE, desenvolvendo a parede termicamente equivalente.

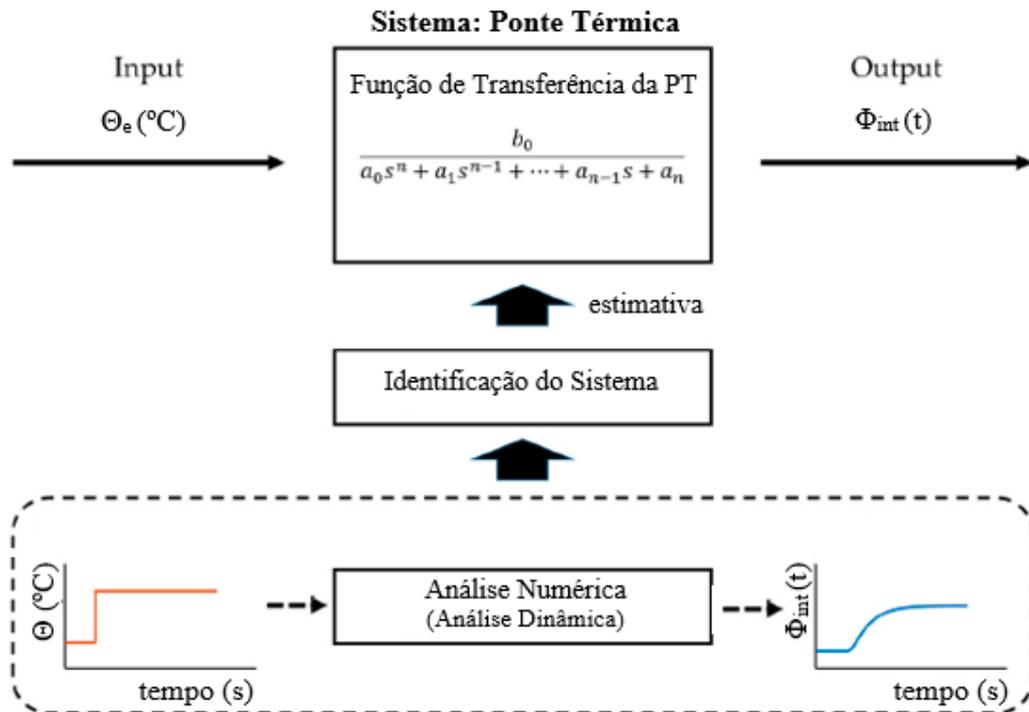
O método de determinação de valores através da parede termicamente equivalente é estruturado de forma idêntica ao método usado regularmente para o cálculo dinâmico do comportamento térmico de uma solução construtiva de um projeto de simulação energética, como é possível observar na figura 2.8 (Kossecka & Kosny, 1997).



**Figura 2.8** - Comparação de cálculo de fluxo de calor de diferentes regimes (Adaptado de: Kim & Yeo, 2020).

A grande vantagem deste método é que permite calcular as propriedades térmicas equivalentes, tais como condutibilidade térmica, densidade e calor específico para as diferentes camadas homogêneas da parede equivalente (Martin *et al.*, 2012), tendo a *clear wall* um grande impacto nos resultados deste método, que é explicado mais adiante. Com estes dados podemos introduzir em programas de SEE e calcular fatores de resposta direta ou coeficientes de transferência de energia, sendo este último o grande objetivo destes programas para este trabalho. Desta forma é possível calcular apenas o fluxo total de calor para o sistema que contém a PT ao invés de calcular todas as temperaturas da superfície interior da PT de acordo com a temperatura exterior (Kim & Yeo, 2020).

O método de análise dinâmica de PT proposto por Kim & Yeo (2020) é fundamentado na ideia de que serão realizadas duas análises em separado, tal como no método estacionário. A primeira é concretizada em condições dinâmicas, onde é efetuado um estudo sobre o  $\Phi$  através da *clear wall* nas paredes adjacentes à ligação entre elementos, que pode ser analisada de forma imediata nos programas de SEE. A *clear wall* tem como finalidade representar um sistema que não é interrompido por detalhes construtivos, tendo a vantagem de permitir analisar e obter resultados de forma uniforme. A outra análise é realizada na PT sobre a qual vai ser assumida um sistema linear invariável no tempo (SLIT). O SLIT permite obter uma função que represente o  $\Phi$  na PT de acordo com  $\theta_e$ , que é constante. Este sistema é determinado através de uma função de transferência de energia por condução que nos permite obter a taxa da  $\Phi$  apenas com  $\theta_e$ , como se pode observar na figura 2.9.



**Figura 2.9** - Estratégia de identificação da PT (Adaptado de Kim & Yeo, 2020).

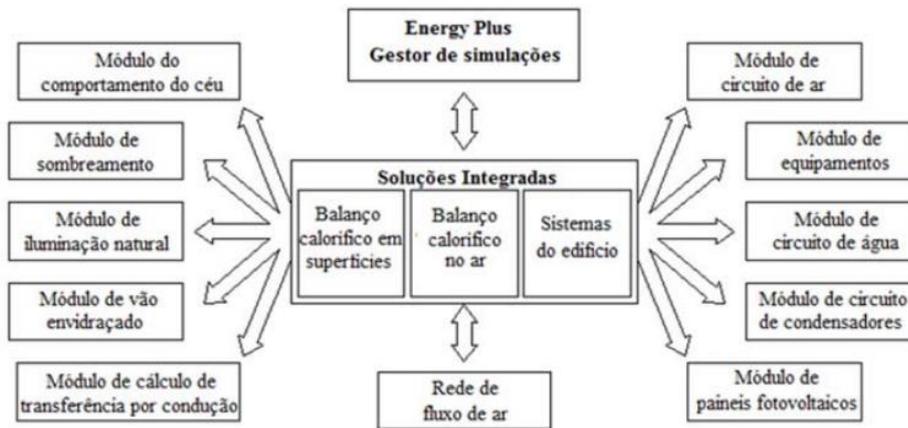
Para estes sistemas é necessário a introdução de dados de forma a que o programa de simulação consiga formular o sistema e calculá-lo. Este processo é realizado através de uma análise dinâmica, simulando o  $\Phi$  em vários dias, usando MDF ou de MEFi.

#### 2.4.2 EnergyPlus

O programa *EnergyPlus* é uma ferramenta informática, cuja finalidade é a simulação dinâmica do comportamento térmico e energético de edifícios. Foi desenvolvido à medida que crescia a percepção da necessidade de ter um programa que assegurasse soluções integradas e que permitissem uma análise próxima do real de um sistema, tal como o cálculo de cargas térmicas e o impacto dos sistemas de climatização e ventilação nos consumos energéticos totais de um edifício (Rodrigues, 2020). O *EnergyPlus* foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América e realiza simulações integradas, o que significa que ao contrário dos programas que o precederam, *BLAST* e *DOE-2*, o cálculo de cargas térmicas nas “zonas” (conjunto de espaços que se encontram sujeitos ao mesmo controlo térmico), bem como os sistemas de tratamento de ar, ventilação e as centrais de produção de energia térmica são calculados simultaneamente e a sua interação é tida em conta (Cartas, 2011).

O método de cálculo fundamental do *EnergyPlus* baseia-se no balanço de energia no qual a temperatura do ar contido dentro dos espaços é considerada uniforme. Este programa tem como base três componentes que determinam o seu funcionamento: um controlador da simulação, um

módulo de simulação do balanço de calor e massa e um módulo de simulação dos sistemas da edificação, sendo o controlador da simulação o responsável pela coordenação dos módulos de simulação nas suas ações individuais (EnergyPlus, 2010).



**Figura 2.10** - Estrutura dos módulos do *EnergyPlus* (Fonte: *EnergyPlus*, 2010 (Adaptado de Almeida, 2016)).

Uma das grandes vantagens do *EnergyPlus* é a sua metodologia de cálculo. Este programa integra todos os aspetos relacionados com a simulação energética de um edifício: cargas térmicas, centrais de produção de energia térmica e sistemas de ventilação e ar novo. O cálculo é feito de modo que seja tido em conta o impacto dos sistemas na resposta térmica do edifício ao invés de calcular primeiro as cargas térmicas e depois aplicar as soluções de climatização ao processo (Cartas, 2011).

O *EnergyPlus* realiza a simulação do balanço energético de uma determinada zona de um edifício, pelo que é estritamente necessário definir “zonas” e respetiva “ocupação”. Estas zonas podem interagir entre si pelas superfícies de contacto através de fluxos de calor. Para cada zona podem ser introduzidos os respetivos sistemas de climatização de forma a serem obtidos os consumos referentes às temperaturas interiores (P. Miguel, 2012).

Com esta ferramenta é possível simular, tendo em conta vários fatores, como a variação da inclinação da luz solar incidente, a variação das temperaturas exteriores consoante o local em questão, entre outros. Com o *EnergyPlus* é possível realizar simulações bastante precisas, sendo necessário definir a geometria do edifício, os materiais que o constituem, as “zonas” onde se pretende avaliar o comportamento térmico e a respetiva utilização. Também é necessário definir um período de simulação no qual se pretende estudar o edifício.

À partida, os valores de  $\psi$  a usar no programa são calculados previamente. A análise do fluxo de calor é depois realizada em base horária.

## 2.5 Método para Avaliar Risco de Condensações Superficiais

Atualmente, um dos grandes objetivos de toda a regulamentação térmica passa por reduzir o risco de ocorrência de condensações. As PTL podem contribuir em grande escala para o desenvolvimento de humidade provocada pela condensação. “O arrefecimento de uma massa de ar pode provocar a condensação do vapor de água existente, sempre que a temperatura desça abaixo da temperatura de saturação (temperatura que corresponde ao limite de saturação). Este abaixamento de temperatura no paramento interior das paredes exteriores acontece quando a temperatura exterior desce e as perdas térmicas através das paredes são grandes. Estas serão tanto maiores quanto maior for o seu coeficiente de transmissão térmica, U.” (Silva, 2009).

Por norma, o risco de condensações aumenta com a produção de vapor de água e com a redução da temperatura. Atualmente, as construções novas possuem isolamento térmico de forma a garantir um U das paredes suficientemente baixo para que a temperatura superficial interior não desça abaixo da temperatura de saturação (trata-se de uma imposição do REH). Todavia, em muitos dos casos, a aplicação deste isolamento não é bem conseguida, agravando o efeito das PT (Silva, 2009).

Em geral, quando não se verificam condensações superficiais, conseguimos estimar que cerca de 95% da humidade é transportada por renovação do ar e 5% atravessa as paredes por difusão. Estes 5% de humidade que atravessam as paredes podem originar patologias caso ocorram “condensações internas”, ou seja quando a pressão parcial do vapor de água iguale a pressão de saturação (Silva, 2009).

Como disposições de projeto/construção/utilização que permitirão minorar o efeito das condensações podemos apontar: aplicação de isolamento térmico, quer em zona corrente quer nas zonas das pontes térmicas, boas condições de ventilação, aquecimento e produção de vapor controlada (Silva, 2009).

De forma a avaliar se uma determinada solução construtiva vai correr riscos de sofrer condensações superficiais podemos determinar o fator de temperatura superficial interior ( $f_{Rsi}$ ). Este parâmetro “é adimensional e pode ser calculado para qualquer ponto do paramento interior através do quociente entre a diferença de temperatura superficial interior e a temperatura ambiente exterior e a diferença de temperatura ambiente interior e a exterior.” (Pechincha, 2011):

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (2-9)$$

Quanto menor for o valor do  $f_{Rsi}$ , maior o risco de ocorrência de condensações superficiais e de desenvolvimento de bolores.” (Pechincha, 2011). Para averiguar se o elemento construtivo está em condições desfavoráveis, este tem de ser maior que os valor mínimo referidos na ISO 13788, determinados de acordo com a indicação desta norma.

### 3. IMPACTO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS NOS COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA LINEAR

#### 3.1 Introdução

O uso de isolamento térmico tem, quando bem dimensionado, impacto positivo relativamente à eficiência térmica do edifício. T. Theodosiou *et al.* (2021) realizaram um estudo em que determinam a eficácia dos métodos baseados na ISO 10211 para a estimativa da  $\Phi$  através de múltiplas ligações, tendo em conta diversos tipos de isolamento térmico, analisando os valores de  $\psi$  e de  $U$ .

Através deste estudo foi possível constatar que mesmo seguindo o regulamento de forma exaustiva, a magnitude da  $\Phi$  sofre sempre uma variação que está relacionada, em grande parte, com o material isolante e com a sua espessura. De notar que existem outras variáveis a ter em atenção, tais como a temperatura, os materiais construtivos dos elementos e a geometria da ligação.

Berggren & Wall (2013) também analisaram o efeito do isolamento nas PT em climas mais frios e constataram que as PT têm uma grande influência nos cálculos de transferência de calor. No entanto, quando corrigidas de forma adequada, as PT são pontos menos suscetíveis a trocas de energia entre ambientes, pelo que quanto melhor a solução corretiva, menor o valor do fluxo de calor associado. Se se pretende utilizar valores normalizados para PT, é necessário diferenciá-los por sistemas de construção e especificidade de isolamento. Assim, conseguimos compreender que qualquer edifício beneficia do uso de isolamento térmico, independentemente do clima no qual ele se insere. A posição do isolamento na solução construtiva tem grande impacto no comportamento térmico.

#### 3.2 Casos de Estudo

Nesta secção são analisados quatro casos de PTL muito comuns nos edifícios que estão indicados na tabela 3.1. Seguidamente, da subsecção 3.4.1 até à subsecção 3.4.4, são apresentados os resultados dos cálculos do coeficiente de transmissão térmica linear para cada caso de PTL analisado.

**Tabela 3.1** - Casos de estudo apresentados na secção 3.4.

Subsecção	Caso de Estudo
3.4.1	Ligação entre Fachada e Pavimento Intermédio
3.4.2	Ligação entre Fachada e Pavimento sobre ENU
3.4.3	Ligação entre Duas Fachadas
3.4.4	Ligação entre Fachada e Cobertura

Os materiais de construção considerados nos estudos realizados neste capítulo são apresentados na tabela 3.2, juntamente com os valores respetivos de  $\lambda$ . Contudo, existem ligações que têm certas particularidades que são referidas na subsecção específica. Para esta primeira análise foi usado o programa *UCanPsi* de modo a obter os valores de  $\psi$ . Para tal, foi considerado que a temperatura interior média seria de 20.0 °C e a temperatura exterior média 0.0 °C.

**Tabela 3.2** - Condutibilidade térmica dos materiais de construção considerados.

	Material Construtivo	Condutibilidade Térmica, $\lambda$ (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )
1	Alvenaria de tijolo 0.150 m	0.385
2	Betão	2.000
3	Betão de Limpeza	1.650
4	Madeira	0.140
5	Material Isolante (XPS)	0.037
6	Revestimento Exterior	1.300
7	Revestimento Interior	1.300
8	Revestimento Pavimento (Flutuante)	0.700

Os resultados são apresentados em gráficos que têm como termos de comparação os valores por defeito propostos no âmbito do D.L. n.º 118/2013 de 20 de agosto, mais especificamente no Despacho n.º 15793-K/2013.

Como já foi discutido na subsecção anterior, o *THERM* é importante nesta análise, especialmente na obtenção de valores em sistemas com detalhes complexos, validando os resultados obtidos pelo *UCanPsi*.

### 3.3 Validação do Método de Cálculo (*UCanPsi* vs. *THERM*)

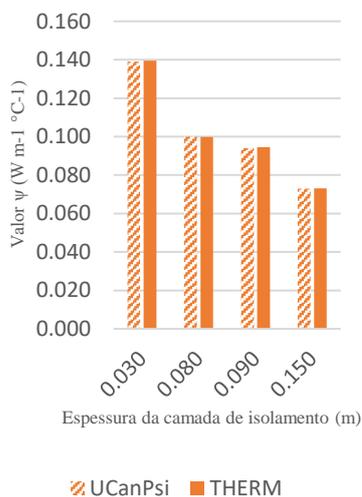
Os dois programas previamente descritos em 2.2.4, o *UCanPsi* e o *THERM*, são usados inicialmente e comparados com resultados do catálogo online de PTL desenvolvido pelo Itecons. Apesar de ambos terem erros associados, os valores obtidos variam entre 1% e 10% (já em casos extremos em que pequenas variações têm grande impacto em termos comparativos), pelo que podemos considerar que estas ferramentas são adequadas ao estudo. Para além da validação de resultados, este estudo comparativo pretende avaliar pequenas variações de geometria que o *UCanPsi* não consegue analisar (devido à dificuldade em criarmos pormenores construtivos diversificados).

Na tabela 3.3 e nas figuras 3.1, 3.2 e 3.3 é possível observar os valores obtidos para o  $\psi$  no caso da ligação entre duas fachadas com isolamento térmico aplicado pelo exterior. Os resultados obtidos pelo *UCanPsi* e pelo *THERM* são muito próximos, pelo que é possível analisar na coluna “Erro comparativo (*UCanPsi* vs. *THERM*)” o impacto da diferença de espessura para materiais iguais (em percentagem) calculada por programas distintos. Na coluna “Diferença de

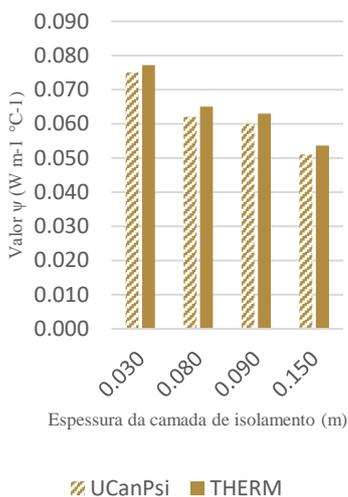
Espressuras” conseguimos comparar a diferença relativa entre a espessura do isolamento obtida previamente. Com estes valores conseguimos ter a perceção do impacto do aumento da espessura do isolamento térmico. Sendo o erro associado tão baixo, consideramos os resultados válidos.

**Tabela 3.3** - Comparação de  $\psi$  entre programas.

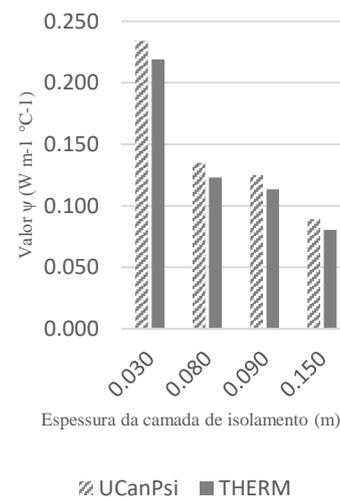
Espessura do Isolamento Aplicado pelo Exterior (m)	Ligação entre Duas Fachadas					
	Erro Comparativo (UCanPsi vs THERM)			Diferença entre Espessuras		
	Espessura Tijolo = 0.150 m	Espessura Madeira = 0.130 m	Espessura Betão = 0.150 m	Espessura Tijolo = 0.150 m	Espessura Madeira = 0.130 m	Espessura Betão = 0.150 m
0.030	0%	3%	-6%	-	-	-
0.080	0%	5%	-9%	-28%	-16%	-44%
0.090	1%	5%	-9%	-5%	-3%	-8%
0.150	0%	5%	-10%	-23%	-15%	-29%



**Figura 3.1** - Variação de  $\psi$  entre programas para alvenaria de tijolo.



**Figura 3.2** - Variação de  $\psi$  entre programas para madeira.

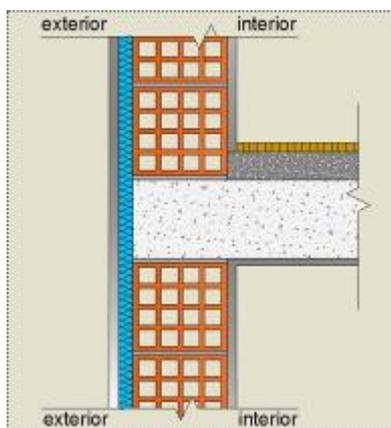


**Figura 3.3** - Variação de  $\psi$  entre programas para betão.

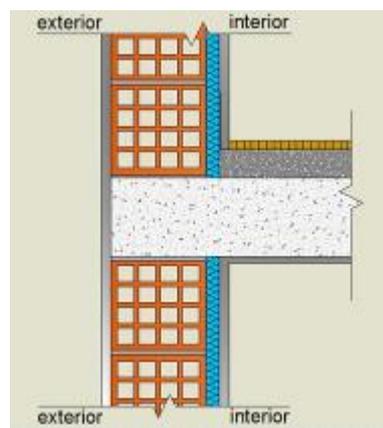
### 3.4 Resultados

#### 3.4.1 Espessura do Isolamento e a sua Influência

Para verificar a influência da espessura do isolamento térmico no sistema construtivo vamos analisar a ligação entre fachada e pavimento intermédio, no qual o pormenor construtivo do isolamento pelo exterior está representado na figura 3.4 e pelo interior na figura 3.5.



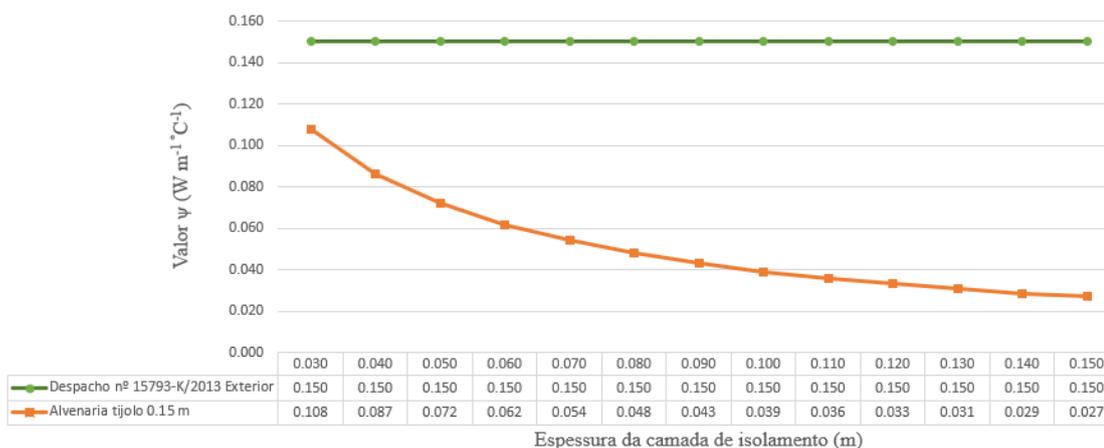
**Figura 3.4** - Pormenor construtivo da ligação entre fachada e pavimento intermédio isolado pelo exterior (Itecons, 2011a).



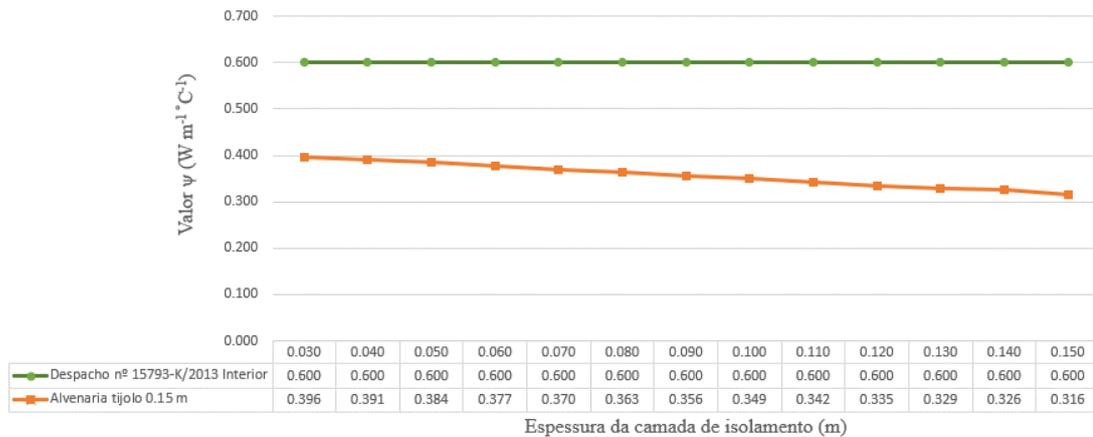
**Figura 3.5** - pormenor construtivo da ligação entre fachada e pavimento intermédio isolado pelo interior (Itecons, 2011a).

As soluções disponíveis no catálogo do Itecons só fazem referência a espessuras de camada entre os 0.030 m e os 0.060 m, sendo a diferença entre estes valores e os valores obtidos pelo programa *UCanPsi* baixa, variando entre os 1% e os 6%.

Os gráficos da variação de  $\psi$  com a espessura da camada de isolamento, obtidos com o *UCanPsi*, são apresentados de seguida pela figura 3.6 e figura 3.7, em que se apresentam resultados até aos 0.150 m de espessura. Estes gráficos são apresentados juntamente com os valores a eles associados, através de uma tabela associada à respetiva figura. No gráfico, os valores obtidos com o *UCanPsi* são comparados com o valor por defeito do Despacho n.º 15793-K/2013.



**Figura 3.6** - Variação de  $\psi$  com isolamento térmico pelo exterior para o caso 3.4.1 (*UCanPsi*).



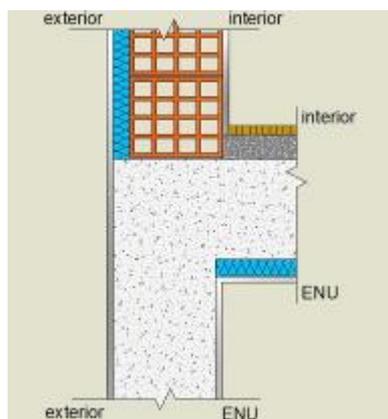
**Figura 3.7** - Variação de  $\psi$  com Isolamento Térmico pelo Interior para o caso 3.4.1 (*UCanPsi*).

A diferença observada entre os valores obtidos pelo UCanPsi e o Despacho varia, em média, 20%, pelo facto do Despacho ser muito conservador na maioria dos casos. Com estes gráficos conseguimos perceber que os valores de  $\psi$  irão estabilizar em ambos os casos. Desta forma é possível compreender que, a partir de um certo valor de espessura do isolamento, o valor de  $\psi$  não tem grande variação. Para cada curva podemos associar uma reta polinomial com os valores da espessura a variarem dos 0.030 m aos 0.150 m com um coeficiente de correlação linear muito elevado. Esse estudo pode ser observado na secção 3.5.

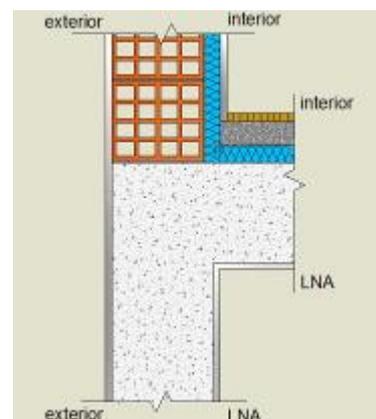
### 3.4.2 Impacto do Coeficiente de Redução de Perdas no Espaço Não Útil

O coeficiente de redução de perdas,  $b_{Tr}$ , traduz a redução da transmissão de calor que um determinado espaço pode provocar em função das suas condições interiores. Este coeficiente é um fator de ajuste da temperatura que temos de ter em conta na redução da diferença de temperaturas e consequentemente na redução da transferência térmica. De forma simplificada, o  $b_{Tr}$  varia consoante as características do ENU e as áreas de contacto com o interior e o exterior, sendo assim possível determinar a transferência de calor entre o interior e o ENU (ou local não aquecido (LNA)). “A determinação do coeficiente de transmissão de calor da envolvente interior é similar ao da envolvente exterior, com a diferença de se afetar pelo coeficiente de redução de perdas. Como a envolvente está em contacto com um espaço interior, a quantidade de trocas pela envolvente é condicionada pela temperatura no interior desse espaço refletida no respetivo  $b_{Tr}$ .”(ADENE, 2015).

Para verificar o impacto do  $b_{Tr}$  no sistema construtivo vamos analisar a ligação entre fachada e pavimento sobre ENU, sendo os pormenores construtivos com o isolamento pelo exterior e com o isolamento pelo interior apresentados na figura 3.8 e figura 3.9, respetivamente.



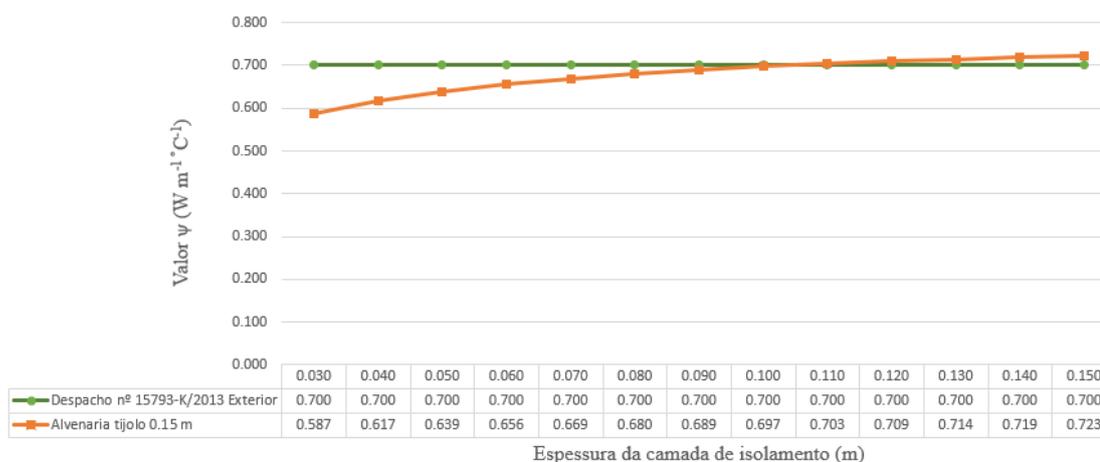
**Figura 3.8** - Pormenor Construtivo da Ligação entre Fachada e Pavimento sobre ENU Isolado pelo Exterior (Itecons, 2011a).



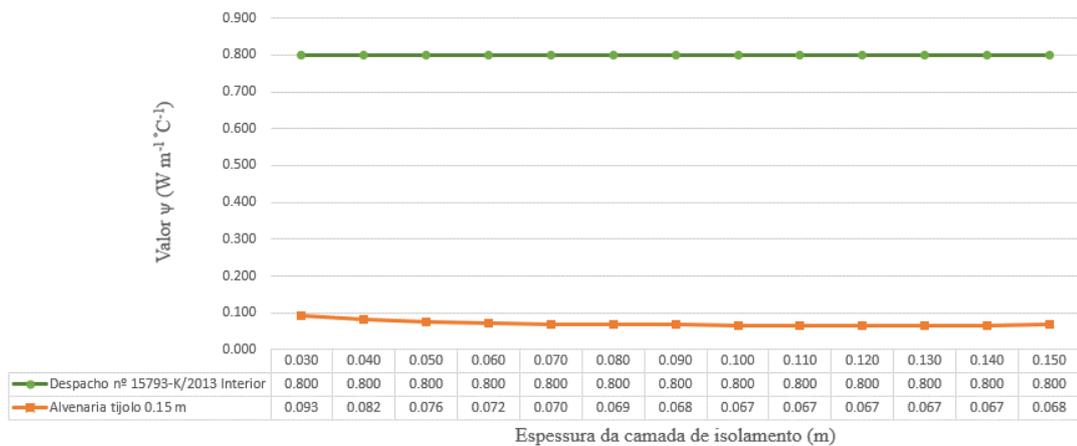
**Figura 3.9** - Pormenor Construtivo da Ligação entre Fachada e Pavimento sobre ENU Isolado pelo Interior (Itecons, 2011a).

As soluções disponíveis no catálogo do Itecons só fazem referência a espessuras de camada entre os 0.030 m e os 0.080 m, sendo a diferença entre estes valores e os valores obtidos pelo programas *UCanPsi* baixa, variando entre os 1% e os 3% em 10 dos 12 casos. Estes dois casos que não têm valores entre o intervalo referido são observados quando se aplica isolamento pelo interior com uma espessura de 0.050 m e 0.060 m. A diferença é justificada pelo facto do valor de  $b_{Tr}$  estudado não ter sido exatamente o mesmo, tendo sido considerado uma temperatura do ENU ( $\theta_{ENU}$ ) de 16.0 °C.

Os gráficos das figuras 3.10 e 3.11 apresentam a variação do valor de  $\psi$  com a espessura do isolamento térmico, quando aplicado pelo exterior e pelo interior do pormenor construtivo, respetivamente. Os gráficos apresentam os valores obtidos com *UCanPsi* e o valor por defeito do Despacho n.º 15793-K/2013.



**Figura 3.10** - Variação de  $\psi$  com a espessura do isolamento térmico aplicado pelo exterior para o caso 3.4.2 (*UCanPsi*).



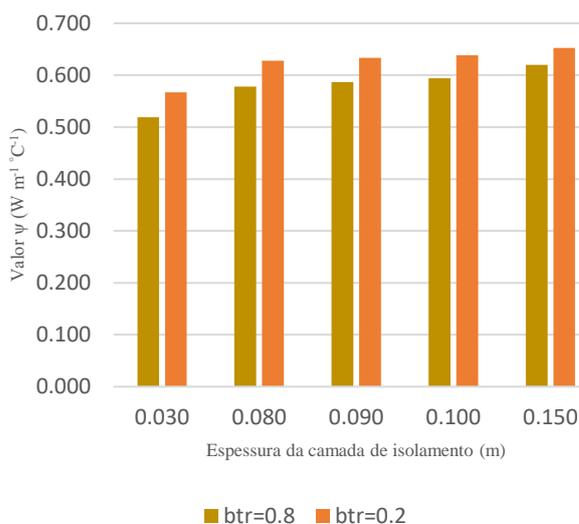
**Figura 3.11** - Variação de  $\psi$  com a espessura do isolamento térmico aplicado pelo interior para o caso 3.4.2 (*UCanPsi*).

Também conseguimos ter a perceção, após a análise destes gráficos, que há um valor para o qual o  $\psi$  estabiliza. Apesar da tendência observada no gráfico apresentado na figura 3.10 ser do valor de  $\psi$  aumentar quanto mais isolamento se aplique, este aumento é insignificante. No gráfico da figura 3.11 também observamos uma estabilização de valores. Contudo, a diferença entre os valores definidos pelo Despacho e os valores calculados pelo *UCanPsi* ronda os 80%, obrigando, para esta solução construtiva, uma atenção redobrada visto que o Despacho está claramente a sobrevalorizar esta PTL. Tal como na subsecção anterior, vamos obter expressões polinomiais e o valor de regressão linear através destas curvas e determinar o ponto ótimo desta ligação na secção 3.5.

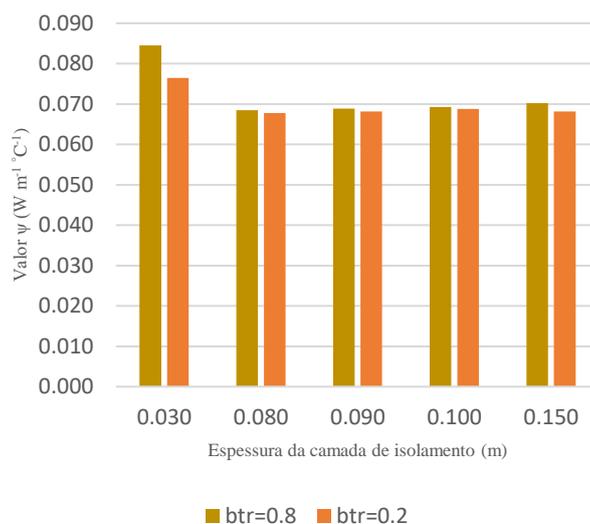
Contudo, é necessário analisar o efeito que o  $b_{Tr}$  provoca nos resultados de  $\psi$ . Deste modo, adaptamos o sistema utilizado neste caso, em que a temperatura do ENU varia, de modo a ser possível obter um valor de  $b_{Tr}$  diferente. Para obter o  $b_{Tr}$ , é necessário estabelecer um conjunto de temperaturas do ENU, sendo estas apresentadas na tabela 3.4. Os valores de  $b_{Tr}$  considerados na tabela foram calculados de modo a ser possível observar a variação de resultados que nos permitisse detetar uma diferença de  $\psi$  entre diferentes temperaturas, sem que estas fossem muito díspares. Estes resultados foram obtidos para uma espessura de isolamento de 0.10 m. Foram também estudados valores de  $b_{Tr}$ , 0.2 e 0.8, num maior detalhe. Os valores de  $\psi$  correspondentes aos referidos valores  $b_{Tr}$ , foram determinados com o programa *THERM* para diferentes espessuras de isolamento aplicado pelo exterior e pelo interior e são apresentados na figura 3.12 e figura 3.13, respetivamente. Já na figura 3.14 e na figura 3.15, também para uma espessura de isolamento de 0.100 m, são apresentados os valores de  $\psi$  para diferentes valores de  $b_{Tr}$ .

**Tabela 3.4** - Valores de  $b_{Tr}$  para uma espessura de isolamento térmico constante (0.100 m).

$b_{Tr}$	$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\theta_{ENU}$ (°C)	Espessura da Camada de Isolamento (m)
0.8	20.0	0.0	16.0	0.100
0.6	20.0	0.0	12.0	
0.4	20.0	0.0	8.0	
0.2	20.0	0.0	4.0	

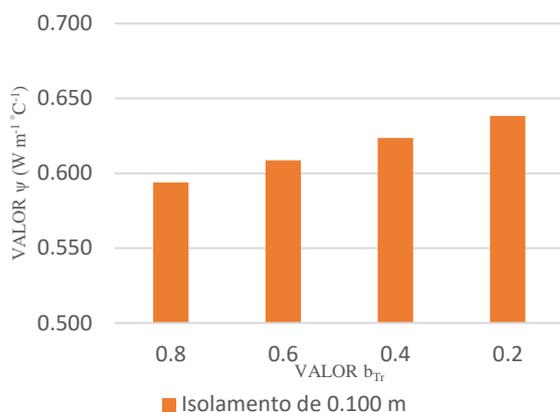


**Figura 3.12** - Variação de  $\psi$  consoante a variação extrema de  $b_{Tr}$  com isolamento exterior (*THERM*).

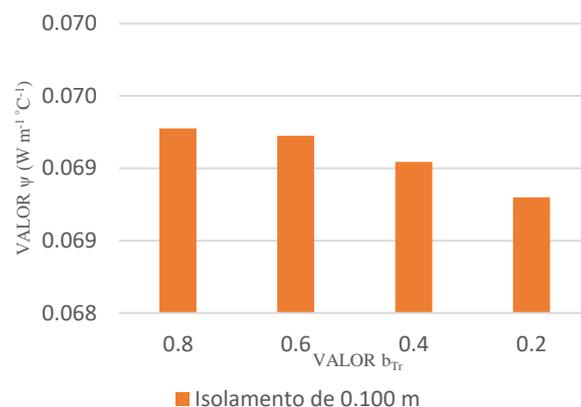


**Figura 3.13** - Variação de  $\psi$  consoante a variação extrema de  $b_{Tr}$  com isolamento interior (*THERM*).

Nas figuras 3.12 e 3.13 é possível observar que, para os valores extremos do  $b_{Tr}$  definidos previamente, o valor de  $\psi$  aumenta quando isolamos esta solução construtiva pelo exterior. Caso optemos por isolar a solução pelo interior, os valores de  $\psi$  diminuem. Estes resultados podem ser justificados pelo impacto da utilização do isolamento da solução, sendo que isolando pelo interior, os valores do  $\Phi$  são menores. Mais ainda, estes valores estabilizam para um valor de isolamento mais elevado. Contudo, não é possível observar uma grande discrepância de  $\psi$  para diferentes valores de  $b_{Tr}$  e diferentes espessuras, concluindo-se assim que o valor da espessura do isolamento aplicado pelo interior só tem impacto para diferentes  $b_{Tr}$  numa fase inicial, quando a espessura é menor. Notar que a ordem de grandeza dos valores é distinta.



**Figura 3.14** - Variação de  $\psi$  consoante o  $b_{Tr}$  para uma espessura constante de 0.100 m com isolamento exterior (*THERM*).

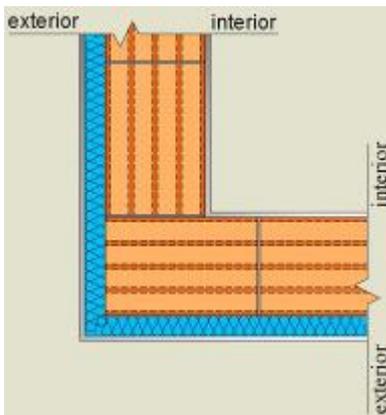


**Figura 3.15** - Variação de  $\psi$  consoante o  $b_{Tr}$  para uma espessura constante de 0.100 m com isolamento interior (*THERM*).

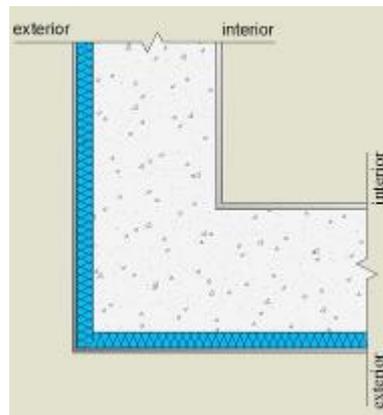
Já na figura 3.14 e na figura 3.15 é possível observar que o comportamento se mantém idêntico ao observado previamente, sendo que, para um isolamento aplicado pelo exterior, há um acréscimo do valor de  $\psi$ , e no isolamento pelo interior há um decréscimo do mesmo coeficiente. Todavia, é importante observar que para valores distintos de  $b_{Tr}$  há uma gradual variação de  $\psi$ , embora essa variação varie 2% para o caso do isolamento pelo exterior e quase não varie quando é aplicado pelo interior (perto de 0%). Estes valores são justificados pela diferença de temperatura, que provoca um maior fluxo de temperaturas e de transferência das mesmas, respeitando o princípio base da transferência de energia. De notar que a escala dos gráficos é distinta.

### 3.4.3 Influência do Material Construtivo

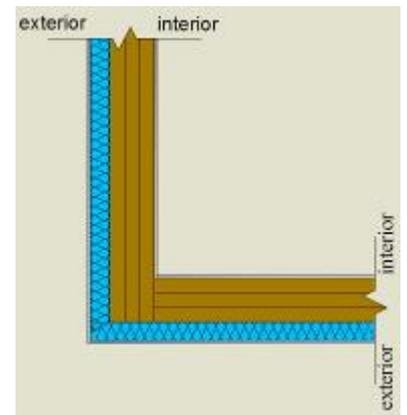
Dependendo do tipo de construção, inúmeros materiais construtivos podem ser o suporte da estruturas aplicadas. Hoje em dia existem variadas opções de construção com diferentes tipos de materiais, sendo os mais utilizados para esse efeito a alvenaria de tijolo, a madeira e o betão. Qualquer um destes três materiais tem vantagens construtivas associadas, tal como têm as suas desvantagens, daí a variedade de opções de soluções. Nas seguintes figuras (da figura 3.16 até à figura 3.21) é possível observar o pormenor construtivo de algumas soluções mais comuns.



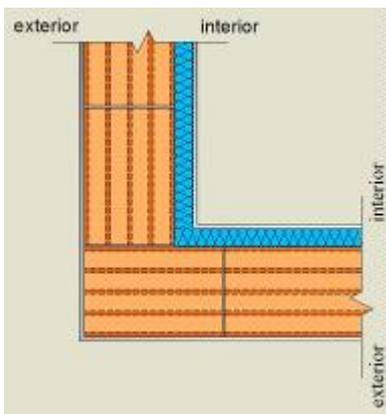
**Figura 3.16** - Pormenor construtivo da ligação entre duas fachadas com alvenaria de tijolo isolado pelo exterior (Itecons, 2011a).



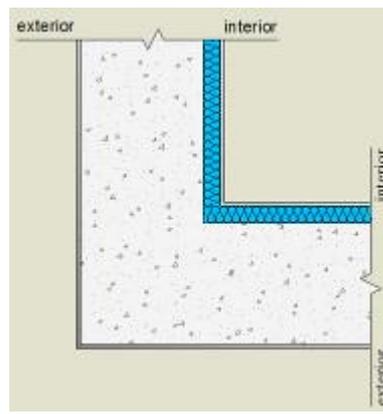
**Figura 3.17** - Pormenor construtivo da ligação entre duas fachadas com betão isolado pelo exterior (Itecons, 2011a).



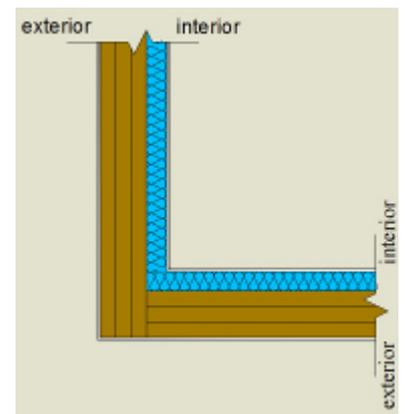
**Figura 3.18** - Pormenor construtivo da ligação entre duas fachadas com madeira isolado pelo exterior (Itecons, 2011a).



**Figura 3.19** - Pormenor construtivo da ligação entre duas fachadas com alvenaria de tijolo isolado pelo interior (Itecons, 2011a).



**Figura 3.20** - Pormenor construtivo da ligação entre duas fachadas com betão isolado pelo interior (Itecons, 2011a).



**Figura 3.21** - Pormenor construtivo da ligação entre duas fachadas com madeira isolado pelo interior (Itecons, 2011a).

Estas soluções, encontram-se identificadas no catálogo de PTL desenvolvido pelo Itecons (2011a), no qual são apresentados valores de  $\psi$  para espessuras entre os 0.030 m e os 0.080 m. Os valores retirados do catálogo foram novamente comparados com os valores obtidos pelo *UCanPsi*. Neste estudo há valores que apresentam uma discrepância de 15% (em média) quer para o exterior quer pelo interior, o que implica uma amplitude de resultados elevada. No entanto, sabemos que os valores determinados pelo Itecons são conservativos, isto é, os resultados apresentados são estudados para o pior cenário construtivo (em termos térmicos), nomeadamente devido à condutibilidade térmica assumida para o isolamento. Após uma análise comparativa entre o programa utilizado e o *THERM*, foi possível comprovar que os valores obtidos são aceitáveis, uma vez que a diferença entre estes valores não excede os 10% nos casos mais críticos (por norma variam entre os 2 e os 4%).

Contudo, estes materiais têm as suas diferenças, e a influência dos mesmos tem de ser tida em conta, como iremos ver de seguida. Os materiais têm diferentes valores de  $\lambda$ , o que implica diferentes opções de construção. Para esta subsecção, foram considerados panos de parede com espessuras de 0.150 m para todas as soluções, excetuando para o pormenor em madeira, onde se considerou uma espessura de 0.130 m. A condutibilidade térmica da madeira é de  $0.140 \text{ (W m}^{-1} \text{ °C}^{-1}\text{)}$  e do betão  $2.000 \text{ (W m}^{-1} \text{ °C}^{-1}\text{)}$ , sendo os resultados da variação do  $\psi$  com a espessura da camada do isolamento obtidos para cada solução de parede apresentados, na figura 3.22 (referente ao isolamento aplicado pelo exterior) e figura 3.23 (referente ao isolamento aplicado pelo interior). As figuras apresentam ainda o valor por defeito do Despacho n.º 15793-K/2013.

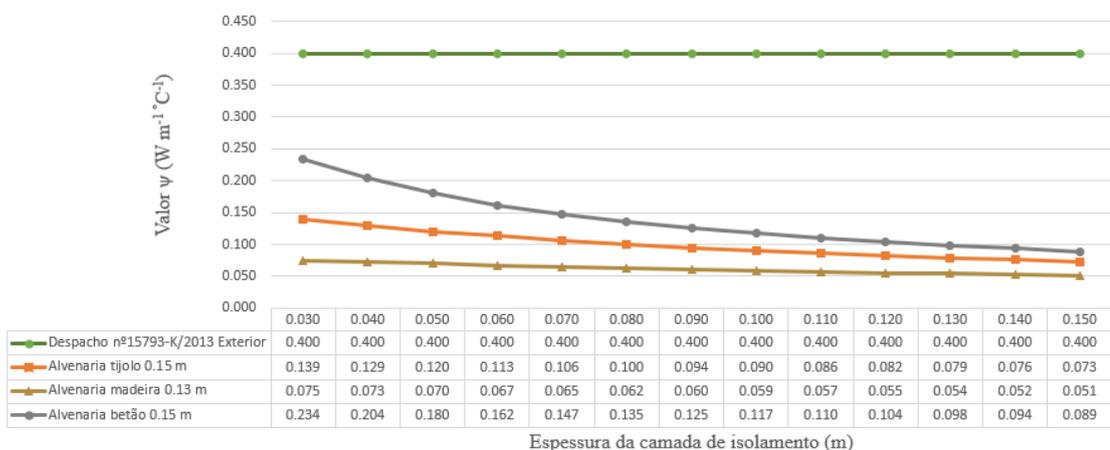


Figura 3.22 - Variação de  $\psi$  com a espessura do isolamento térmico pelo exterior para o caso 3.4.3 (UCanPsi).

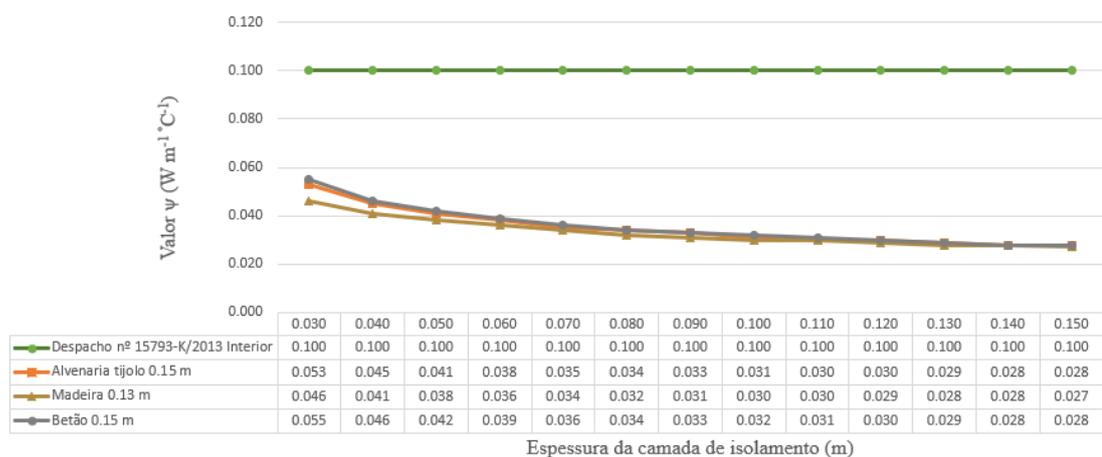


Figura 3.23 - Variação de  $\psi$  com a espessura do isolamento térmico pelo interior para o caso 3.4.3 (UCanPsi).

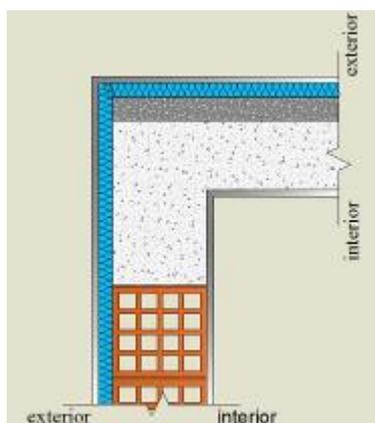
Como é possível observar na figura 3.22, existe uma variação progressiva e quase constante entre os três elementos construtivos, no que toca ao valor de  $\psi$ . Quando a espessura já tem um valor considerável (cerca de 0.120 m), é notório que este coeficiente praticamente não se altera, sendo possível concluir que existe um valor de espessura para o qual o  $\psi$  estabiliza. Também é

possível notar que nessa mesma espessura, a diferença entre  $\psi$  é constante, o que implica que o material só tem grande impacto para um valor de espessuras relativamente baixo. Já na figura 3.23, é fácil observar que existe uma pequena discrepância nos valores iniciais de  $\psi$  entre a alvenaria de tijolo e o betão, em comparação com a madeira, sendo que essa diferença pode ser justificada pela diferença de espessuras e propriedades destes materiais.

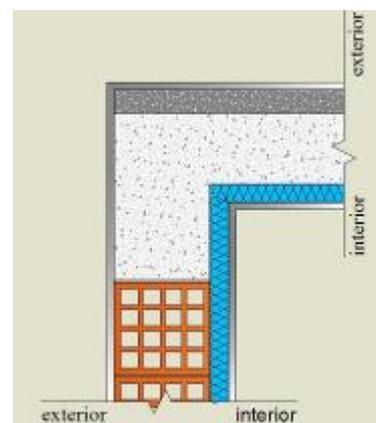
Assim sendo, é visível que, quando isolado pelo interior, o material tem impacto mínimo na variação de  $\psi$ . Com estes gráficos ganhamos uma noção do impacto do material em termos térmicos. Estas curvas são apresentadas na secção 3.5 com o intuito de associar uma expressão polinomial e registar o valor da correlação linear.

#### 3.4.4 Influência da Condutibilidade Térmica

Existem diversos isolantes, e cada isolante tem a sua vantagem, quer seja em termos económicos, quer de trabalhabilidade, adaptação aos sistemas construtivos, entre outros. Para tal, foram estudados vários tipos de isolantes para a mesma ligação. O caso de estudo para esta subsecção é a ligação entre fachada e cobertura, como é demonstrado na figura 3.24 e na figura 3.25.



**Figura 3.24** - Pormenor construtivo da ligação entre fachada e cobertura isolado pelo exterior (Itecons, 2011a).



**Figura 3.25** - Pormenor construtivo da ligação entre fachada e cobertura isolado pelo interior (Itecons, 2011a).

O catálogo do Itecons permite obter valores de  $\psi$  para espessuras entre os 0.030 m e os 0.060 m, sendo que a diferença entre os valores obtidos pelo catálogo e pelo *UCanPsi* varia dos 14% aos 31%, para ambos os casos (exterior e interior). Tal diferença é extremamente elevada, mas novamente pode ser justificado pela conservação usada nos catálogos. Fazendo a mesma análise comparativa entre programas (*UCanPsi* e *THERM*), é possível concluir que a diferença ronda os 2% (para todos os casos), validando assim os resultados obtidos.

Nas figuras 3.26 e 3.27 conseguimos observar a variação de  $\psi$  com a espessura do isolamento térmico quando aplicado pelo exterior e pelo interior do pormenor construtivo, respetivamente,

sendo novamente crucial notar a ordem de grandeza apresentada para cada gráfico relativamente ao valor de  $\psi$ .

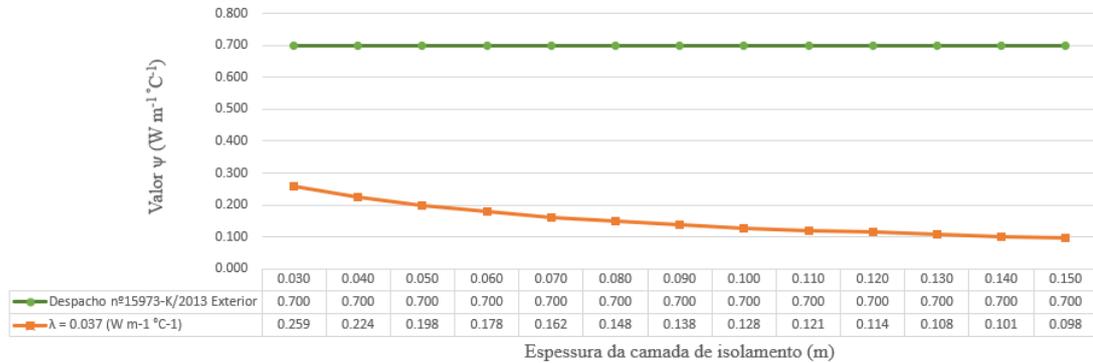


Figura 3.26 - Variação de  $\psi$  com isolamento térmico pelo exterior para o caso 3.4.4 (*UCanPsi*).

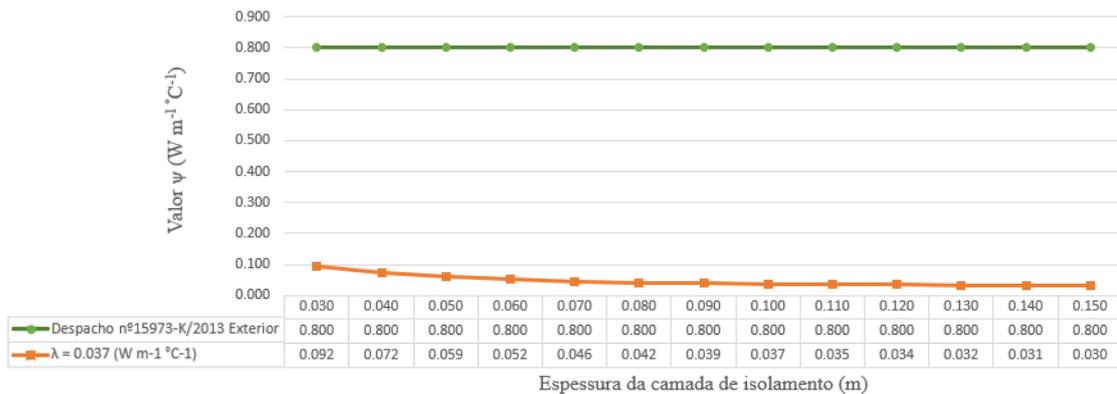


Figura 3.27 - Variação de  $\psi$  com isolamento térmico pelo interior para o caso 3.4.4 (*UCanPsi*).

Mediante as imagens apresentadas, ficamos com a ideia de que o Despacho está a sobrevalorizar, para estas situações, os valores de  $\psi$ , sendo a diferença entre o valor do Despacho e o valor real das soluções (valores do catálogo/*UCanPsi/THERM*) muito elevada. Contudo, esta discrepância é justificada pelo facto da ligação analisada ter um menor valor de  $\Phi$  associado. Nos gráficos que são apresentados de seguida, é possível observar que os valores obtidos para outros isolamentos são semelhantes aos apresentados. De notar que em todos os casos é associada à curva descrita uma reta polinomial e o valor da sua regressão linear, que serão apresentados na secção 3.5.

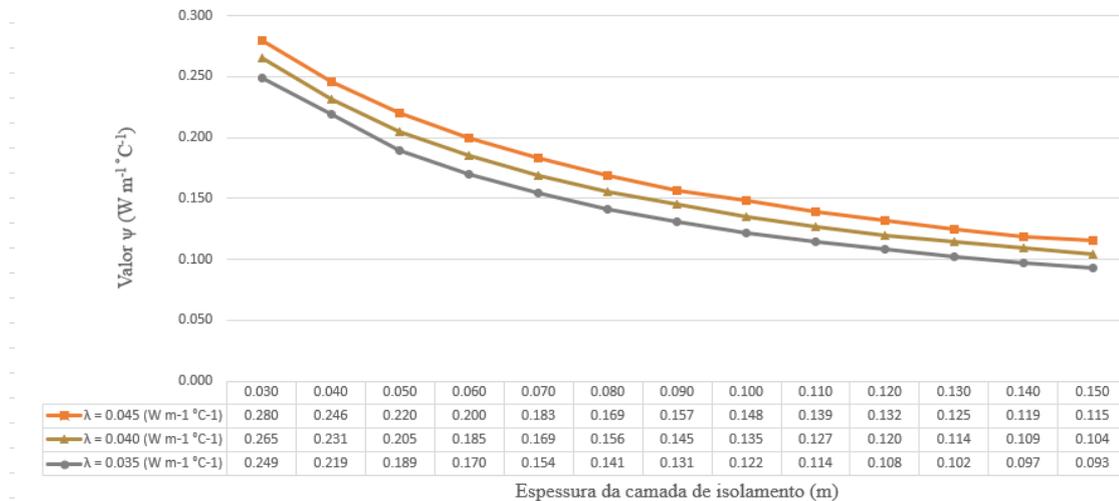


Figura 3.28 - Variação de  $\psi$  com isolamento térmico pelo exterior para diferentes isolantes (*UCanPsi*).

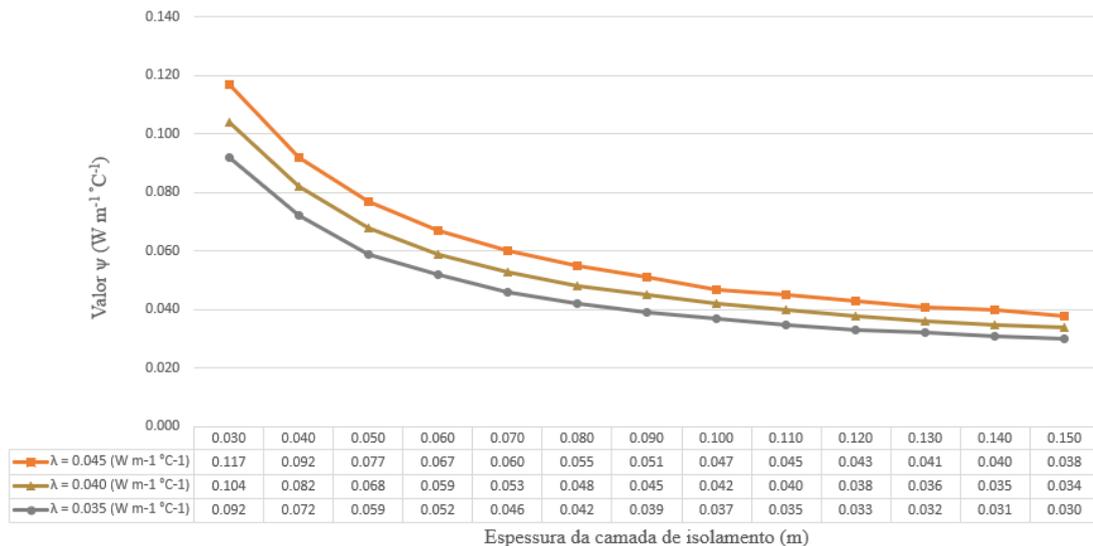


Figura 3.29 - Variação de  $\psi$  com isolamento térmico pelo interior para diferentes isolantes (*UCanPsi*).

Através da análise à figura 3.28 e à figura 3.29, podemos verificar que apesar da curvatura inicial ser diferente (os valores de  $\psi$  variam de forma ligeiramente mais constante para uma espessura inicial, até 0.060 m de isolamento), todas as curvas são paralelas entre si, o que indicia que quanto menor o valor da condutibilidade térmica do material isolante, menor o  $\Phi$  associado ao pormenor construtivo e menor será o valor de  $\psi$ . Assim sendo, podemos concluir que, sempre que possível, devemos adotar materiais isolantes com menor valor de condutibilidade térmica. Também é notório que estes valores vão estabilizar, ainda que só estabilizem para valores de espessura de isolante bastante elevados.

Também é importante considerar que, nesta análise, o isolamento aplicado, quer pelo exterior quer pelo interior, é contínuo, não deixando, assim, uma anomalia geométrica que comprometesse este estudo. T. Theodosiou *et al.* (2021) realizaram um estudo onde demonstraram que no caso de cantos com uma espessura de camada de isolamento superior a

0.100 m, a magnitude das PTL é insignificante em comparação com os outros tipos de PTL, caso este que se verifica nesta subsecção.

### 3.5 Proposta de Equações para Determinação de $\Psi$

Após a análise efetuada na secção anterior, verificámos que é possível tirar algumas conclusões sobre o comportamento do isolamento e parâmetros (espessura,  $b_{Tr}$ , material construtivo e condutibilidade térmica). Para tal, propomos expressões que descrevem o comportamento destas variantes. Também são apresentados os fatores de correlação linear de cada uma das curvas, de modo a validar os resultados obtidos (ver tabela 3.5).

**Tabela 3.5** – Expressões polinomiais associadas às curvas aplicável de 0.030 m a 0.150 m da variação de  $\psi$ .

Figura	Descrição	Expressões Polinomial	R <sup>2</sup>
Figura 3.6	-	$y = 6.6658x^2 - 1.7891x + 0.149$	0.983
Figura 3.7	-	$y = 0.1973x^2 - 0.7045x + 0.4179$	0.998
Figura 3.10	-	$y = -9.3407x^2 + 2.7088x + 0.522$	0.991
Figura 3.11	-	$y = 3.4066x^2 - 0.7692x + 0.1086$	0.930
Figura 3.22	alvenaria de tijolo	$y = 3.1768x^2 - 1.1037x + 0.1682$	0.999
	betão	$y = 10.057x^2 - 2.9168x + 0.3054$	0.993
	madeira	$y = 0.7592x^2 - 0.3389x + 0.0848$	0.998
Figura 3.23	alvenaria de tijolo	$y = 2.1379x^2 - 0.5606x + 0.0651$	0.971
	betão	$y = 2.2328x^2 - 0.5904x + 0.0675$	0.969
	madeira	$y = 1.4585x^2 - 0.3999x + 0.0552$	0.982
Figura 3.26	-	$y = 11.144x^2 - 3.2339x + 0.3373$	0.992
Figura 3.27	-	$y = 5.9241x^2 - 1.4872x + 0.1238$	0.961
Figura 3.28	$\lambda = 0.045$ (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	$y = 10.969x^2 - 3.2481x + 0.3599$	0.994
	$\lambda = 0.040$ (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	$y = 10.979x^2 - 3.207x + 0.3432$	0.993
	$\lambda = 0.035$ (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	$y = 11.284x^2 - 3.2283x + 0.3287$	0.992
Figura 3.29	$\lambda = 0.045$ (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	$y = 7.2827x^2 - 1.8537x + 0.1571$	0.963
	$\lambda = 0.040$ (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	$y = 6.5734x^2 - 1.6656x + 0.1401$	0.966
	$\lambda = 0.035$ (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	$y = 5.9491x^2 - 1.4934x + 0.124$	0.963

### 3.6 Considerações Finais

Os resultados apresentados neste capítulo indicam que o valor de  $\psi$  é claramente influenciado pela espessura do isolamento dos elementos de ligação do edifício. Esta influência faz variar a magnitude de  $\Phi$  da PTL estudada e do detalhe geométrico de cada ligação apresentada neste capítulo. No entanto, é evidente que de todos os parâmetros apresentados, o aumento da espessura do isolamento térmico é o que mais influencia os resultados. Em média, o aumento de 0.010 m de isolamento térmico implica uma redução de cerca de 11% no valor de  $\psi$ . Também concluímos que o valor de  $\psi$  é um parâmetro central dos cálculos para uma adequada estimativa das perdas de calor pela envolvente dos edifícios.

Através destes estudos é possível concluir que existe uma diferença de valores de  $\psi$  para os casos onde o isolamento é adotado pelo interior ou pelo exterior. Uma investigação elaborada por Berggren & Wall (2011) confirma a consideração previamente feita. Os autores concluíram que as perdas por transmissão de calor devido a PT podem aumentar quando se utiliza mais isolamento em paredes exteriores. Além disso, os autores referem o aumento relativo da transmissão de calor através das PT através do aumento da espessura do isolamento, nota esta que também é possível observar no decorrer dos cálculos realizados.

Deste modo ficamos a saber que, de facto, existem muitos parâmetros que influenciam o valor de  $\Phi$  e os consequentes valores de  $\psi$ , sendo imprescindível realizar um bom dimensionamento térmico da envolvente. É também imperativo conhecer bem o espaço e as suas características.

## 4. ESTUDO DE INTEGRAÇÃO DAS PONTES TÉRMICAS LINEARES NO MÉTODO DE CÁLCULO DINÂMICO DE EDIFÍCIOS

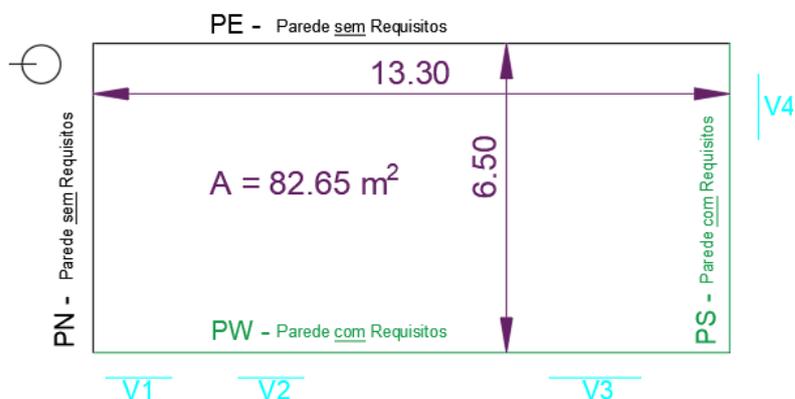
### 4.1 Introdução

Desde que se iniciaram estudos relacionados com o comportamento térmico e eficiência energética em habitações, constatou-se que o elemento mais relevante da envolvente opaca é o isolamento térmico.

Neste capítulo vamos analisar em termos energéticos, uma fração e fazer uma análise comparativa entre métodos de cálculo, sendo a análise inicial realizada em regime sazonal e posteriormente comparada com uma análise em regime dinâmico. O objetivo deste estudo passa, sobretudo, por detetar as diferenças entre as duas análises e a sua relevância quando se alteram certos parâmetros do isolamento, nomeadamente a sua espessura e a sua condutibilidade térmica (tipo de isolante a usar). Como foi descrito no capítulo 2, os regimes a aplicar baseiam-se em metodologias de cálculo distintas, sendo lógico esperar resultados diferenciados.

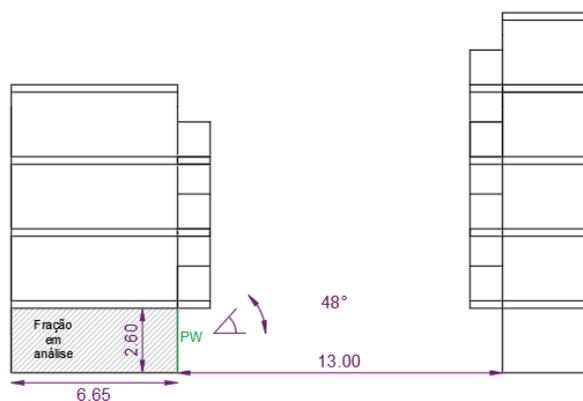
### 4.2 Caso de Estudo

Para realizar a análise comparativa, é necessário definir um caso de estudo, tendo sido escolhido neste caso uma fração de um edifício multifamiliar com pouca complexidade geométrica. A fração pertence a uma edifício situado em Lisboa, Portugal. É uma fração de tipologia T2 com uma área útil de  $82.65 \text{ m}^2$  e um pé direito médio ponderado de  $2.60 \text{ m}$ . Na figura 4.1 é possível observar as dimensões da fração e na figura 4.2 ver a existência de um edifício a oeste do mesmo, sendo de prever algum grau de sombreamento. O ângulo de sombreamento é de  $48^\circ$ . As paredes com requisitos de comportamento térmico encontram-se orientadas a Sul (PS) e a Oeste (PW).

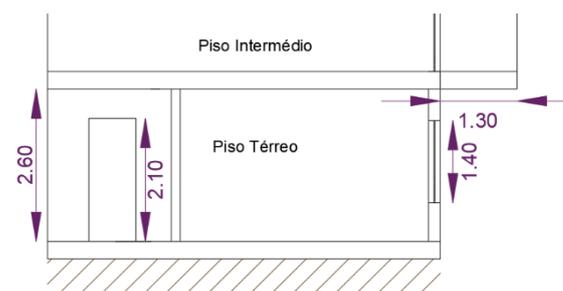


**Figura 4.1** - Planta simplificada da fração: PE – parede a Este sem requisitos; PN – parede a norte sem requisitos; PW- parede a oeste com requisitos; PS – parede a sul com requisitos;  $V_n$ -vão envidraçado n.

A fração situa-se no rés-do-chão. O edifício onde a fração se insere é constituído por rés-do-chão e três andares, com uma elevação de 50.00 m desde o nível médio das águas do mar. Já na figura 4.3 apresentamos um corte transversal da fração.



**Figura 4.2** – Corte transversal do edifício em análise.



**Figura 4.3** - Corte transversal da fração em análise.

A fração encontra-se na zonas climáticas de verão V3 e de inverno I1. Os graus-dia (GD) para esta fração são de 976 (°C dia). Para efeitos de estudo foi considerada uma temperatura ambiente da fração de 18.0 °C.

De modo a realizar a análise comparativa entre o método sazonal e o dinâmico, é necessário limitar ao máximo as discrepâncias entre as variáveis a usar, como os valores de condutibilidade dos materiais (tabela 4.2) ou a localização do caso de estudo. Este último fator é de extrema importância na análise, pois quanto mais próximos forem os dados climáticos da fração do clima real, menor será a discrepância entre os resultados. No caso da análise sazonal, o clima é definido em função da localização e da cota, altura do terreno onde é implantado. Na análise dinâmica, para além de alguns fatores comuns definidos na análise sazonal, tal como a altitude ou ação do vento sobre a fração, o clima é definido através de um ficheiro climático que é estudado com apoio de um conjunto de dados estatísticos que se baseiam na interpolação espacial de dados climáticos públicos publicados pelo Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA) entre 1951 e 1980, combinados com dados fornecidos e da propriedade do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) e outras fontes de dados livremente disponíveis. Através da conjugação destes dados foi possível obter uma fonte fiável da variação temporal da temperatura deste local, Lisboa (Lisboa 085360, INETI) (EnergyPlus, 2005).

A envolvente da fração analisada é constituída por cinco tipos distintos de elementos construtivos: paredes, interiores e exteriores, pavimentos inferior em contacto com o solo e superior (separação de frações), e vãos envidraçados. A constituição dos diferentes elementos construtivos é apresentada na tabela 4.1.

**Tabela 4.1** - Detalhe construtivo dos elementos da fração em estudo.

Elemento Construtivo	Detalhe do Elemento Construtivo
Parede Exterior	Argamassa, Tijolo 0.110 m, Caixa de Ar, Material Isolante (XPS), Tijolo 0.110 m, Reboco Interior
Parede Interior	Argamassa, Tijolo 0.110 m, Isolamento Térmico (EPS), Tijolo 0.070 m, Reboco Interior
Pavimento Inferior	Enrocamento (gravilha), Manta geotêxtil, Laje de Betão, Material Isolante (XPS), Argamassa de Regularização, Revestimento Cerâmico
Pavimento Superior	Reboco Interior de Gesso, Laje de Betão, Material Isolante (XPS), Betonilha de Regularização, Argamassa de Regularização, Revestimento Cerâmico
Vão Envidraçado	Vidro Duplo (incolor) com Caixa de Ar, Caixilharia de Metal com Corte Térmico

Já na tabela 4.2 podemos encontrar as propriedades dos materiais usados nos elementos construtivos da fração, sendo os elementos e os valores referidos os mais usuais do projeto de construção. Tal como na tabela 3.2, estes valores foram obtidos nas tabelas do LNEC.

**Tabela 4.2** - Condutibilidade térmica dos materiais de construção considerados na fração em estudo.

Material Construtivo	Condutibilidade Térmica, $\lambda$ ( $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )	Resistência Térmica, $R_t$ ( $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$ )
Alvenaria de Tijolo 0.110 m	-	0.270
Alvenaria de Tijolo 0.070 m	-	0.190
Argamassa	1.300	-
Betão	2.300	-
Betonilha	1.650	-
Enrocamento (gravilha)	0.230	-
Material Isolante (XPS)	0.037	-
Material Isolante (EPS)	0.042	-
Reboco Interior de Gesso	0.250	-
Revestimento Cerâmico	1.300	-
Vidro Duplo	2.300	-

Para esta análise foram estudados cinco casos distintos. O primeiro é referente à fração sem alterações no seu isolamento, isto é, com os valores base de espessura e condutibilidade térmica. Nos restantes casos variou-se a espessura e o valor da condutibilidade térmica do isolamento, como se pode observar na tabela 4.3.

**Tabela 4.3** - Casos de estudo da fração.

Caso de Estudo	Variáveis a Estudar	
	Espessura Isolamento, e (m)	Condutibilidade Térmica, $\lambda$ ( $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )
1	0.040	0.037
2	0.080	0.019
3	0.020	0.074
4	0.080	0.037
5	0.040	0.019

Para este estudo foram consideradas cinco tipos de PTL que têm um impacto variado no balanço energético. O maior ou menor número de PTL associadas à fração terá um maior ou menor impacto nos resultados. Na tabela 4.4 é feita uma descrição mais detalhada das PTL usadas, com valores de  $\psi$  determinados para o caso 1, no qual se está a considerar uma parede dupla. Por sua vez, na tabela 4.5, é apresentada a diferença de áreas para cada tipo de superfície, sendo que a EOE é composta por duas paredes, a parede orientada a oeste (PW) e a parede orientada a sul (PS) (rever figura 4.1).

**Tabela 4.4** - Pontes térmicas lineares associadas à fração para o caso 1.

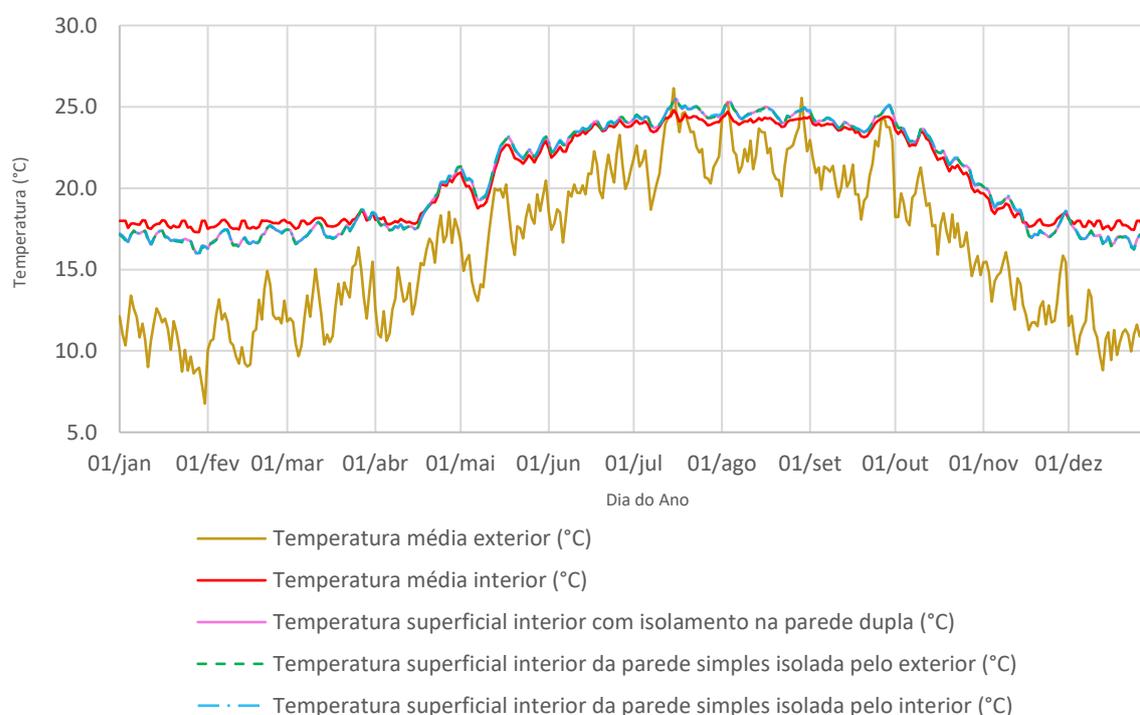
Descrição da PTL:	Valor $\psi$ ( $\text{W/m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ):	Dimensões Singulares de $\psi$ (m):	Nº de PTL Associadas à Fração:	Dimensões Totais de $\psi$ (m):
Duas Paredes Verticais em Ângulo Saliente (1)	0.50	2.60	1	2.60
Fachada com Pavimento Térreo (2)	0.80	19.95	1	19.95
Zona de Caixa de Estores (3)	0.30	1.40	5	7.00
Fachada com Caixilharia (4)	0.10	1.40	5	12.95
Fachada com Laje Intermédia <sup>(2)</sup> (5)	0.25	40.50	1	40.50

**Tabela 4.5** - Áreas das superfícies a estudar para o caso 1.

Área da PTL ( $\text{m}^2$ )	Área da EOE ( $\text{m}^2$ )
(1) = 1.27	PW = 34.58
(2) = 15.63	PS = 16.90
(3) = 2.06	-
(4) = 1.27	-
(5) = 9.92	-
$\Sigma$ = 30.15	$\Sigma$ = 51.48

Tomando estes valores em consideração e tendo também uma ideia global da fração em estudo, já é possível analisar e comparar valores entre os tipos de regimes que se pretendem estudar.

A figura 4.1 apresenta a variação ao longo do tempo da temperatura média exterior, da temperatura média interior e das temperaturas médias superficiais interiores para diferentes localizações da camada de isolamento (isolamento pelo exterior; isolamento pelo interior e isolamento entre panos de alvenaria da parede dupla). Esta figura permite observar que, para as diferentes posições do isolamento, não estamos a obter grandes diferenças para a temperatura média diária das superfícies interiores. Nesta mesma figura observamos que a temperatura superficial interior está sempre muito próxima da temperatura interior. Também é importante referir que todas as três soluções garantem temperaturas interiores de conforto. Este conjunto de resultados é referente ao caso 1.



**Figura 4.4** – Temperatura média diária nas superfícies interiores da envolvente opaca exterior para as diferentes localizações do isolamento térmico referente ao caso 1.

### 4.3 Descrição e Tratamento de Dados dos Métodos de Cálculo

#### 4.3.1 Métodos de Cálculo em Regime Sazonal de Edifícios

Sabendo que o regime sazonal é o regime menos exigente em termos computacionais, o estudo energético da fração foi concretizado com o apoio da folha de cálculo de avaliação do comportamento térmico e do desempenho energético de edifícios disponibilizada pelo Itecons. Foi usada a versão V3.15 de 23 de julho de 2020 e com esta folha de cálculo conseguimos

calcular, de forma facilitada, todos os parâmetros necessários para o cálculo adequado das necessidades energéticas da fração.

É necessário compreender os parâmetros associados às variáveis que são calculadas nas folhas de cálculo e a magnitude dos valores associada à mesma, pelo que são apresentados na subsecção 4.3.1.1 as variáveis mais importante para definir o cálculo energético neste regime.

#### 4.3.1.1 Parâmetros da Classe Energética e do Balanço Energético

Para realizar um estudo completo da fração e posteriormente obter uma classificação energética, é necessário estudar indicadores energéticos. Cada um dos indicadores representa uma variável essencial ao estudo do balanço energético global da fração, sendo para tal necessário estudar diversos elementos constituintes da fração, como as paredes, a cobertura, as PTL, entre outros.

De forma a obter uma classe energética, é necessário fazer um estudo comparativo entre os valores a estudar e os valores de referência, valores estes que são obtidos num estudo entre a fração real e uma fração fictícia na qual se impõem parâmetros de referência. De acordo com o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), a classificação energética de um edifício de habitação varia numa escala pré-estabelecida em intervalos que dependem do valor do rácio da classe energética,  $R_{Nt}$ , definido pelo quociente entre as necessidades nominais anuais de energia primária,  $N_{tc}$ , e o valor limite regulamentar para as necessidades nominais anuais de energia,  $N_t$ . No Despacho n°15793-J/2013 é possível estudar a regulamentação com maior profundidade.

Contudo, para o estudo da influência das PTL, é necessário estudar a equação (4-1) que é essencial para obter os valores de transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento:

$$Q_{tr,i} = 0.024 \times GD \times H_{tr} \quad (4-1)$$

Esta equação é de grande relevância visto que nos permite determinar os valores reais de transferência de energia em cada componente da fração, neste caso nas PTL e nas EOE. De modo a ser possível obter toda a informação necessária para realizar o estudo entre PTL e a EOE, é necessário estudar os parâmetros da equação,  $H_{tr}$  e  $GD$ .

Neste método de estudo, os valores de  $\psi$  podem ser obtidos através de catálogos ou através de cálculo normativo, com apoio de programas descritos previamente. Assim sendo, e devido às inúmeras condicionantes que nos são apresentadas pelas PTL descritas neste caso de estudo, optamos por usar o programa *UCanPsi*, pois os valores a estudar não se encontram disponíveis em catálogos. Todas as PTL foram recriadas e estudadas de modo a ser possível obter os valores de  $\psi$  necessários para analisar o impacto das PTL neste método de estudo.

É importante ressaltar que o valor de  $\theta_e$  neste caso é de 22.0 °C e é definido de forma automática através das condições iniciais definidas pela localização geográfica da fração em estudo, apesar do método de cálculo deste regime não ser tão exato quanto o dinâmico.

### 4.3.2 Métodos de Cálculo em Regime Dinâmico de Edifícios

Como foi descrito na secção 2.4, o regime dinâmico é um regime mais detalhado, com um maior grau de trabalhabilidade e mais minucioso, sendo, por isso, necessário uma descrição mais pormenorizada da fração, bem como uma análise mais aprofundada da mesma, com apoio de equipamentos mais sofisticados e mais capazes de realizar um cálculo tão preciso. Para tal, e numa primeira fase, foi usado o programa *EnergyPlus*, descrito na subsecção 2.4.2, para obter esses valores.

Para descrever a fração no *EnergyPlus*, é necessário preencher todos os campos relativos aos parâmetros de simulação, tais como: a descrição da localização geográfica, as coordenadas da fração, o período de estudo a considerar, que neste caso foi um ano inteiro (ao qual se teve especial atenção a feriados e datas simbólicas, pois estas representam um maior ou menor uso da fração), o clima da envolvente, os materiais de construção superficiais, as zonas térmicas, sendo este último parâmetro essencial para estudar as PTL.

O programa permite ter acesso facilitado sobre parâmetros relativos ao isolamento e à sua espessura, bem como todos os materiais aplicados nos elementos constituintes. As fronteiras sobre as quais os elementos construtivos estão em contacto também são de grande relevância, uma vez que através deste programa, o acesso às condições de fronteira dos elementos em contacto com outros sistemas é facilitado e diversificado, tendo sido imposta, nas paredes exteriores, uma condição em que o clima afeta as trocas energéticas, e nas restantes envolventes opacas foi considerada uma condição adiabática. Também o sombreamento é estudado e caracterizado em detalhe, garantindo a maior semelhança entre ambientes, reais e fictícios (a introduzir no programa *EnergyPlus*). Pormenores como o impacto dos materiais que fornecem energia em forma de calor (equipamentos elétricos e luzes) e o maior (ou menor) uso da fração por residentes foram tidos em conta, contribuindo para uma análise mais detalhada e realista, tendo um impacto significativo nos resultados a obter.

O *EnergyPlus* é um programa que permite estudar inúmeras variáveis, apenas as mais necessárias foram selecionadas de modo a completar o estudo comparativo. Para tal, cinco *outputs* foram adicionados ao conjunto base de *outputs* disponíveis pelo *EnergyPlus*, descritos na subsecção 4.3.2.1, onde, posteriormente, serão usadas para realizar um balanço energético da taxa de transferência de energia entre as EOE e as PTL.

#### 4.3.2.1 Parâmetros de Avaliação de Transferência de Energia

Apesar do *EnergyPlus* já fornecer diversos *outputs* que nos permitem recolher, de forma simplificada, os valores necessários para analisar a transferência de energia entre ambientes, cinco *outputs* foram adicionados, sendo que estas nos indicam, com maior detalhe, a forma como a energia flui entre o interior da fração e o exterior da mesma. Assim, cinco *outputs* foram estudados:

- Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção da Superfície no Interior da Face ( $\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), que descreve a transferência de calor por convecção. A utilidade desta variável encontra-se na percepção do valor global da transferência de energia entre a parede e o ambiente interior.
- Taxa de Perda de Calor por Condução de Superfície no Interior da Face (W), combina os dados da condução da face interna e externa, descrevendo a situação de condução numa superfície de transferência de calor, de forma nominal. Esta variável é simplesmente a média das taxas de condução entre a face interna e externa. A importância desta variável reside na ligação entre ambientes através de trocas de energias nas paredes construtivas.
- Taxa de Perda de Calor por Condução da Superfície Exterior (W), descreve o fluxo de calor por condução diretamente da face exterior de uma superfície opaca. Um valor positivo indica que a condução apenas ocorre no interior da face externa em direção à face exterior. Já um valor negativo significa que a condução ocorre da face exterior para o núcleo da superfície. De notar que a condução da face exterior, quando positivo, não indica o fluxo de calor da superfície para o ar circundante, que é regido pelo Coeficiente de Convecção.
- Taxa de Ganho de Calor Interno (W), representa a energia, em forma de calor, transferida para o ar ambiente a partir de todos os tipos de ganhos internos, incluindo pessoas, luzes, equipamento. Esta variável permite obter as componentes de carga térmica da zona.
- Taxa de Transferência de Calor por Condução de Calor por Área de Superfície Exterior ( $\text{W m}^{-2}$ ).

#### 4.3.2.2 Enquadramento dos Parâmetros de Cálculo Dinâmico

Numa fase inicial, foram estudados diferentes elementos construtivos e diferentes posições do isolamento na parede e os seus parâmetros, como a sua condutibilidade térmica e espessura, pelo que analisamos o impacto no balanço energético de paredes e de PTL, como se demonstrará na subsecção 4.4.4.

Neste estudo, diversificamos a posição do isolamento, tendo sido este estudado como se a EOE fosse uma parede dupla e o isolamento estivesse anexo à parede interior da cavidade, uma parede simples, de 0.150 m de espessura com isolamento pelo exterior e uma parede simples, de 0.150 m de espessura com isolamento pelo interior. Assim, tal como na análise realizada no

regime sazonal, os valores de  $\psi$  usados nesta análise foram os valores obtidos pelo *UCanPsi* para todas as PTL estudadas, como podemos observar na tabela 4.6, cujos valores são referentes ao caso 1, no qual se está a considerar uma parede dupla.

Uma vez que o *EnergyPlus* não contempla a introdução direta dos valores de  $\psi$ , a quantificação das PTL foi realizada criando uma superfície fictícia equivalente ao somatório de todas as PTL (ver tabela 4.6).

**Tabela 4.6** - Quantificação das PTL para o *EnergyPlus* para o caso 1.

PTL	$\psi$	L	$\psi * L$
1	0.500	2.600	1.300
2	0.800	19.950	15.960
3	0.300	7.000	2.100
4	0.100	12.950	1.295
5	0.250	40.500	10.125
$\Sigma =$	1.950	-	30.780

Posteriormente, com apoio das variáveis estudadas em 4.3.2.1, obtivemos os valores energéticos das EOE e das PTL. De seguida, foram realizadas três simulações para o mesmo caso de estudo, para as três posições diferentes do isolamento, de modo a estudar o potencial efeito da EOE na transferência de energia para o mesmo tipo de isolamento.

Focando na variável “Taxa de Perda de Calor por Condução de Superfície no Interior da Face” obtivemos valores de fluxo de energia de cada parede da EOE e das PTL, sendo possível analisar os valores de transmissão de energia da EOE e dos pontos termicamente mais frágeis, as PTL. Com o objetivo de comparar resultados, também apresentamos os resultados obtidos na simulação em regime sazonal. A temperatura ambiente interior considerada para realizar os cálculos nesta fração foi de 18.0 °C.

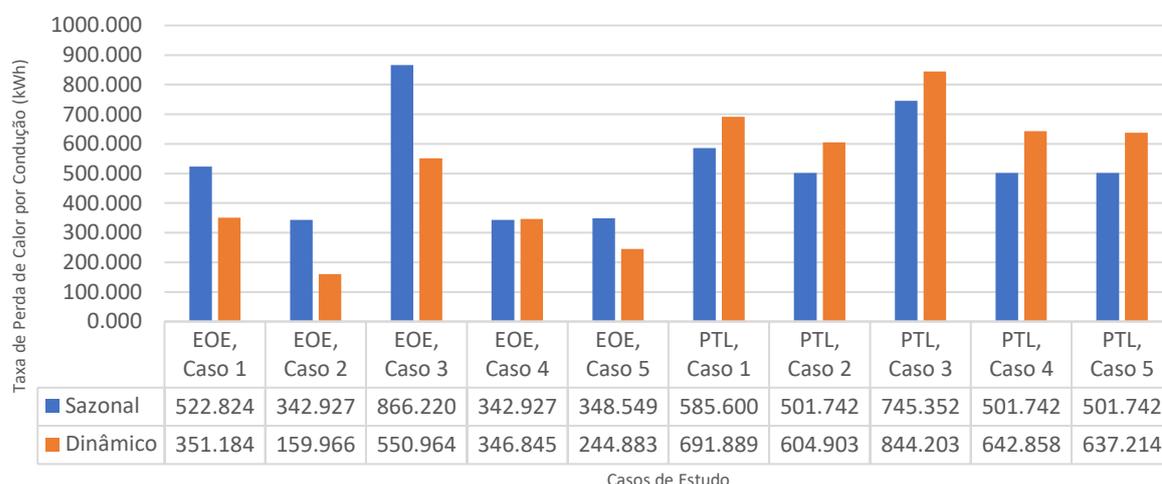
## 4.4 Discussão de Resultados

De modo a comparar os diferentes casos estudados e ter uma perceção mais global da influência da quantidade de troca de energia entre as PTL e a EOE, são apresentados, de seguida, dois tipos de gráficos. Os mesmos vão ser apresentados em subsecções subsecções distintas, de 4.4.1 a 4.4.3, dependendo do tipo de elemento construtivo estudado. A análise e os resultados incluem a comparação entre os regimes sazonal e dinâmica.

### 4.4.1 Isolamento na Parede Dupla

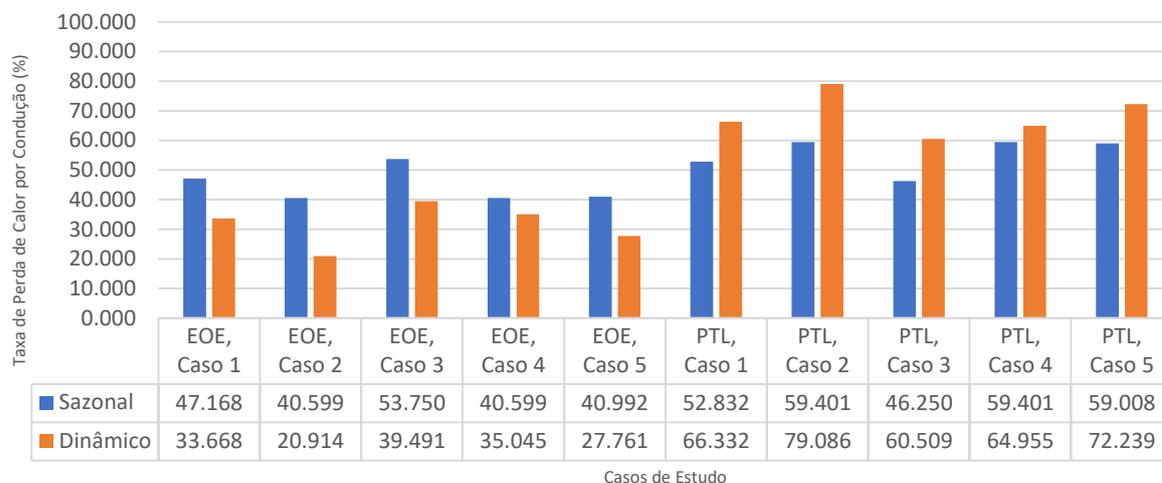
Após termos realizado diversas análises no regime sazonal e termos executado simulações no *EnergyPlus*, observamos os valores obtidos para a transmissão de energia entre o ambiente exterior e interior na EOE e nas PTL, na qual, neste caso, o isolamento se encontra na face

interior da cavidade da parede dupla. O gráfico da figura 4.5 apresenta discrepâncias de resultados. É também importante referenciar que a EOE apresenta uma menor quantidade de perda de calor no regime dinâmico, o que indicia que o isolamento está a ter um impacto significativo. Já nas PTL, os valores apresentados indicam que há uma maior taxa de transferência de energia nestas superfícies, como seria de esperar, por ser um ponto frágil no elemento construtivo. De notar que, quanto melhor é o isolamento, menor é a quantidade de energia transferida pela EOE, o que implica que vai haver maior  $\Phi$  nas PTL. Contudo, o caso 3 é um caso delicado devido às más propriedades do isolamento. Logo, é de esperar uma maior quantidade de energia transferida, especialmente nas PTL. O caso 2, que representa um excelente isolamento, é onde se nota que existe uma menor quantidade de energia transferida em todas as superfícies, especialmente na EOE.



**Figura 4.5** - Comparação entre casos da taxa de perda de calor por transferência em valores absolutos para isolamento na parede dupla.

No gráfico da figura 4.6 analisamos os valores deste estudo numa escala percentual. Os resultados são obtidos através do quociente entre as diferentes superfícies, PTL ou EOE, sobre a energia total dissipada no caso de estudo. Tal como no gráfico anterior, observamos que as PTL são claramente pontos frágeis. Existe uma diferença considerável entre os dois regimes para as duas superfícies, dando assim a entender que o regime sazonal peca por subvalorizar o impacto das PTL.

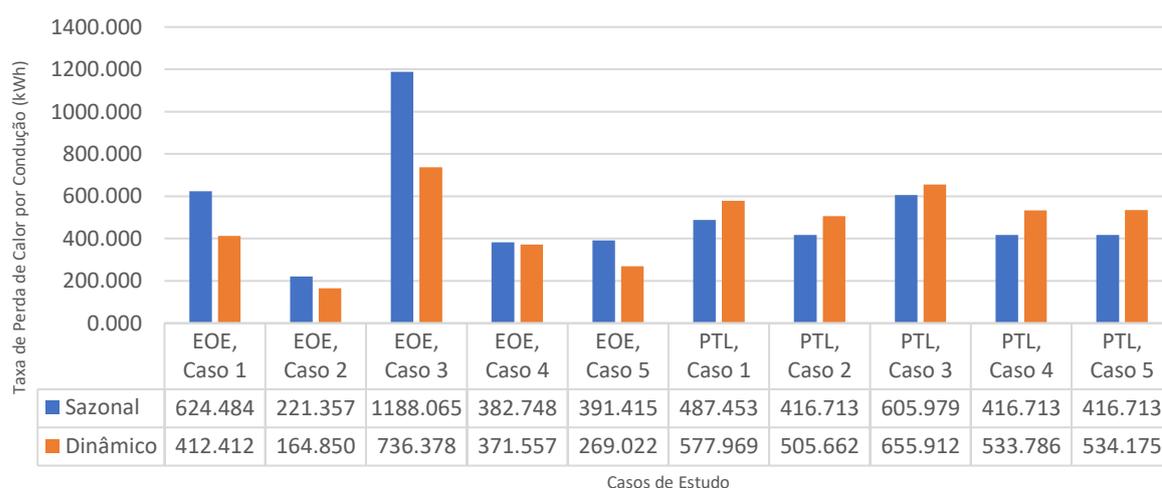


**Figura 4.6** - Comparação entre casos da taxa de perda de calor por transferência em valores percentuais para isolamento na parede dupla.

#### 4.4.2 Isolamento na Parede pelo Exterior

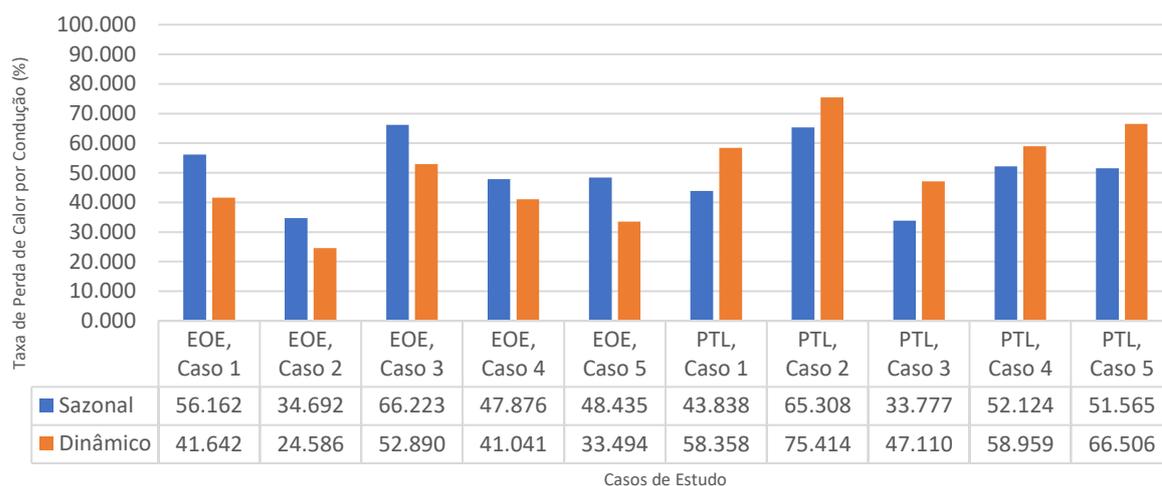
Neste estudo, em que o isolamento se encontra aplicado pelo exterior da parede, observamos na figura 4.7 que existe uma maior quantidade de energia a ser transferida entre ambientes pela EOE, o que implica que as PTL não se revelam ser pontos tão frágeis.

Pelo facto de o isolamento pelo exterior não ter tanto impacto nas EOE como tinha nas paredes duplas (4.4.1), a quantidade de energia a atravessar as superfícies da EOE é inferior, o que significa que quando isolamos paredes pelo exterior temos uma envolvente mais equilibrada e menos sujeita a patologias.



**Figura 4.7** - Comparação entre casos da taxa de perda de calor por transferência em valores absolutos para isolamento pelo exterior.

Tal como nas paredes duplas, o cálculo percentual foi realizado seguindo a mesma metodologia. Apesar dos valores percentuais não serem muito diferentes dos que observamos em 4.4.1, concluímos que não nos podemos guiar por estes valores por não transmitirem a ideia real dos valores associados à transferência de energia. Contudo, conseguimos perceber que existe equilíbrio no que toca a uma comparação dos valores absolutos, como se pode ver na figura 4.8.

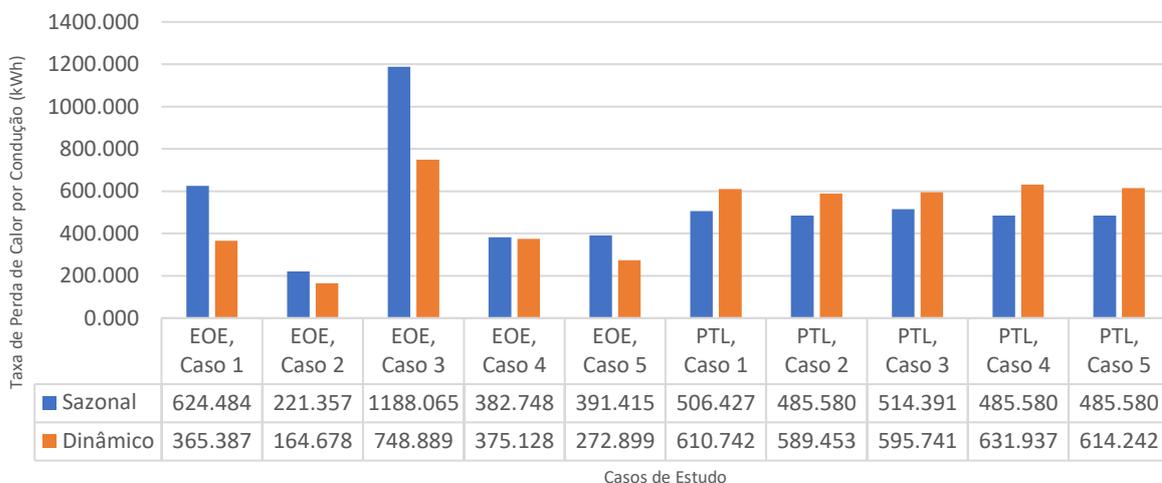


**Figura 4.8** - Comparação entre casos da taxa de perda de calor por transferência em valores percentuais para isolamento pelo exterior.

#### 4.4.3 Isolamento na Parede pelo Interior

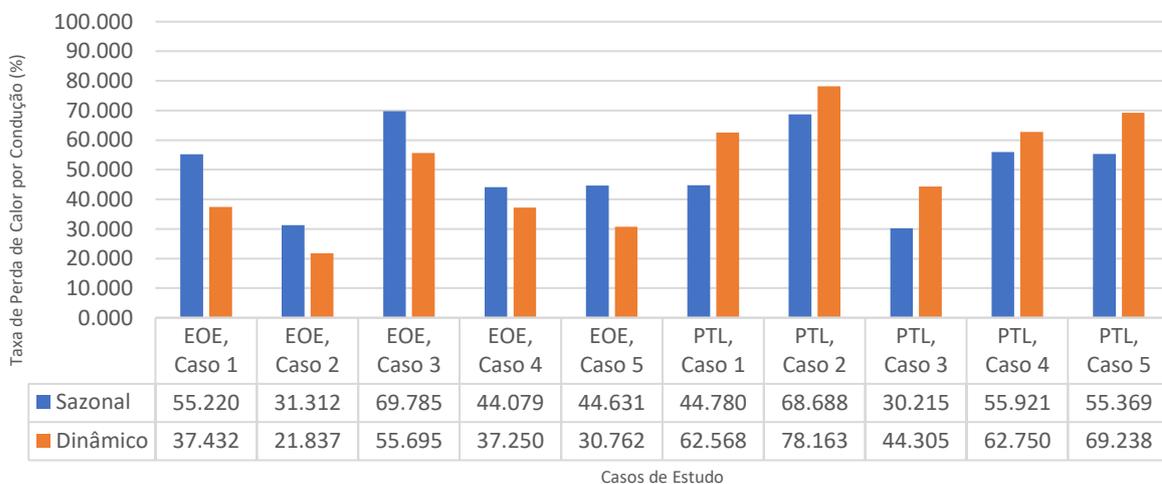
Quando se considera isolar a parede pelo interior, vamos ter diferenças nos resultados obtidos comparativamente aos outros dois tipos de paredes. Os valores do regime sazonal deste estudo são muito semelhantes aos valores do regime sazonal na situação em que se isola a parede pelo exterior pelo facto de se apenas estar a estudar a resistência da parede e não a inércia adjacente à mesma.

Fazendo uma análise comparativa entre o isolamento pelo interior e o isolamento localizado no exterior de uma parede simples, conseguimos concluir que o isolamento pelo interior tem um impacto muito semelhante, apenas sendo benéfico para casos onde o isolamento adotado afigure menor capacidade térmica (notar que neste caso existe uma maior taxa de energia a ser considerada, o que implica uma maior perda de calor). Todavia, quando se compara com o isolamento aplicado na parede dupla notamos que há diferença de resultados e que a parede isolada pelo interior é mais eficaz na minimização das perdas de energia, como se pode ver na figura 4.9.



**Figura 4.9** - Comparação entre casos da taxa de perda de calor por transferência em valores absolutos para isolamento pelo interior.

Na figura 4.10 notamos que a componente mais requisitada, no que toca a transferências de energia, são as PTL. Desta forma, conseguimos concluir que o isolamento pelo interior tem um menor impacto na proteção das PTL por não garantir uma menor percentagem de perdas de calor quando comparado com o isolamento aplicado pelo exterior, que aparenta ser a melhor solução.



**Figura 4.10** - Comparação entre casos da taxa de perda de calor por transferência em valores percentuais para isolamento interior.

#### 4.4.4 Análise Comparativa

Nas tabelas 4.7 e 4.8 conseguimos comparar todos os valores obtidos previamente.

**Tabela 4.7** - Valores globais da análise comparativa entre regimes.

	Caso 1				Caso 2			
	EOE/PTL				EOE/PTL			
	Sazonal		Dinâmico		Sazonal		Dinâmico	
	W	%	W	%	W	%	W	%
Superfície/ Localização do Isolamento	Parede Dupla				Parede Dupla			
EOE	522.824	47.168	351.184	33.668	342.927	40.599	159.966	20.914
PTL	585.600	52.832	691.889	66.332	501.742	59.401	604.903	79.086
Superfície/ Localização do Isolamento	Exterior				Exterior			
EOE	624.484	56.162	412.412	41.642	221.357	34.692	164.850	24.586
PTL	487.453	43.838	577.969	58.358	416.713	65.308	505.662	75.414
Superfície/ Localização do Isolamento	Interior				Interior			
EOE	624.484	55.220	365.387	37.432	221.357	31.312	164.678	21.837
PTL	506.427	44.780	610.742	62.568	485.580	68.688	589.453	78.163

**Tabela 4.8** - Valores globais da análise comparativa entre regimes (2).

	Caso 3				Caso 4				Caso 5			
	EOE/PTL				EOE/PTL				EOE/PTL			
	Sazonal		Dinâmico		Sazonal		Dinâmico		Sazonal		Dinâmico	
	W	%	W	%	W	%	W	%	W	%	W	%
Superfície/ Localização do Isolamento	Parede Dupla				Parede Dupla				Parede Dupla			
EOE	866.220	53.750	550.964	39.491	342.927	40.599	346.845	35.045	348.549	40.992	244.883	27.761
PTL	745.352	46.250	844.203	60.509	501.742	59.401	642.858	64.955	501.742	59.008	637.214	72.239
Superfície/ Localização do Isolamento	Exterior				Exterior				Exterior			
EOE	1188.065	66.223	736.378	52.890	382.748	47.876	371.557	41.041	391.415	48.435	269.022	33.494
PTL	605.979	33.777	655.912	47.110	416.713	52.124	533.786	58.959	416.713	51.565	534.175	66.506
Superfície/ Localização do Isolamento	Interior				Interior				Interior			
EOE	1188.065	69.785	748.889	55.695	382.748	44.079	375.128	37.250	391.415	44.631	272.899	30.762
PTL	514.391	30.215	595.741	44.305	485.580	55.921	631.937	62.750	485.580	55.369	614.242	69.238

Após observar estas análises é possível obter diversas conclusões:

- os valores obtidos no regime sazonal são mais constantes entre si, contudo os valores obtidos no regime dinâmico são mais precisos e mais fiáveis;
- o tipo de isolamento usado e a sua posição tem uma grande influência na superfície pelo qual o fluxo de calor se vai dirigir;
- existem variações de valores de energia quando se observa a EOE para isolamentos com parâmetros semelhantes (caso 4 e 5), sendo que as PTL não têm grande alteração, para qualquer tipo de parede, consoante o tipo de isolamento adotado. O fluxo de calor é quase constante nas PTL;

- o fluxo de calor que atravessa as PTL é similar em todos os casos no regime dinâmico, o que reforça o impacto do isolamento no EOE e a veracidade destes resultados obtidos neste regime.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

No decorrer desta dissertação foi possível analisar o impacto do isolamento no cálculo do coeficiente de perdas lineares. Cada parâmetro deste material construtivo influencia, em grande escala, o fluxo de calor entre ambientes. O uso deste material é crucial, tanto para evitar anomalias como para obter um maior conforto nos edifícios.

Nestes trabalho avaliámos o impacto do aumento da espessura de isolamento nas situações de ligações entre duas fachadas, fachada e cobertura, fachada e pavimento intermédio e entre fachada e pavimento sobre ENU. Para uma determinada gama de valores de espessura elevada, o valor de  $\psi$  já varia pouco quando se aumenta a espessura. Avaliámos também a posição do isolamento sobre a solução construtiva. A situações de isolamento pelo interior são as que têm valor de  $\psi$  mais baixo desde que o isolamento não seja interrompido, como ocorre nas pontes térmicas lineares. Existem muitos parâmetros que influenciam o valor do  $\Phi$  e os consequentes valores de  $\psi$ , pelo que é imprescindível aplicar isolamento térmico e realizar um bom dimensionamento do mesmo para os ambientes habitacionais.

Posteriormente, com o apoio do caso de estudo apresentado no capítulo 4, que se refere a uma fração de referência em Lisboa, Portugal, aplicamos dois métodos, sazonal e dinâmico, permitindo avaliar as diferenças entre resultados. Foi possível concluir que:

- a magnitude do  $\Phi$  sofre uma variação relacionada com as diferentes parâmetros do material isolante, especialmente a espessura;
- a espessura é o parâmetro com maior impacto no valor de  $\psi$ ;
- a posição do isolamento também se reflete nos cálculos energéticos da fração e no valor de  $\psi$ , sendo que, quando aplicado pelo exterior, os níveis de transferência de energia entre ambientes têm são menores;
- quanto melhor for o isolamento da fração e dos pontos frágeis, menor será a quantidade de energia a ser transferida entre ambientes pelas PTL;
- o regime sazonal, pela falta de precisão, pode subvalorizar ou sobrevalorizar valores de perda linear;
- a perda de calor pode ser controlada de forma eficaz com o isolamento, tendo a superfície onde se dá essa troca de energia um papel secundário;
- o fluxo de calor nas PTL é menos impactante quando se adota isolamento pelo exterior.

### 5.2 Desenvolvimentos Futuros

Na sequência do trabalho desenvolvido, sugerimos que se realize um estudo muito idêntico ao estudo concretizado no capítulo 3, trabalhando em casos mais diversificados de PTL, bem como

em diferentes tipos de isolamentos. Também é importante obter equações que nos permitam determinar de forma global, a variação dos valores de  $\psi$  para uma gama mais vasta de espessuras. Existem inúmeros estudos a serem realizados sobre esta temática, sobretudo relativamente ao tipo de isolamento e às suas características. Um material a ser considerado nestes estudos é o aerogel devido às suas propriedades físicas e mecânicas.

Uma outra sugestão a ser trabalhada é referente ao programa *EnergyPlus*, pois este programa não consegue determinar valores de  $\psi$ , sendo por isso necessário obter estes valores por outros métodos, originando um erro associado quando se adota uma abordagem simplificada, sendo para tal necessário realizar uma comparação entre esta análise simplificada com uma análise modelada, onde se determinam as PTL em regime dinâmico. Também existe uma limitação neste programa, visto que o mesmo não consegue estimar temperaturas superficiais das PTL, o que implica que não conseguimos detetar, de forma prática, os pontos mais frágeis do espaço estudado. Assim, só é possível determinar o impacto das PTL de forma global e não de forma objetiva, não conseguindo perceber, apenas usando o *EnergyPlus*, quais os efeitos da transferência de energia nestes pontos. De modo a desenvolver ainda mais os resultados obtidos no trabalho até agora realizado, sugerimos que se faça um estudo com um programa ainda mais eficaz ou com este mesmo programa após versão melhorada do programa relativo a esta variável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENE - Agência para a Energia. (2015). *Guia SCE – Indicadores de desempenho energético (RECS)*. Disponível em: [https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2020/04/4.4-Guia-SCE-Indicadores-de-desempenho-REH\\_V1-1.pdf](https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2020/04/4.4-Guia-SCE-Indicadores-de-desempenho-REH_V1-1.pdf)
- Almeida, H. (2016). *Análise comparativa dos métodos da ISO 13790 e sua adequabilidade na estimativa das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento e da temperatura do ar interior* [Universidade de Lisboa]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10451/24140>
- Anderlind, G., & Byggnadsfysik, G. (2015). *A new model for calculating the effects of two- and three-dimensional. August 1999*. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/279954556\\_A\\_new\\_model\\_for\\_calculating\\_the\\_effects\\_of\\_two-\\_and\\_three-dimensional\\_thermal\\_bridges](https://www.researchgate.net/publication/279954556_A_new_model_for_calculating_the_effects_of_two-_and_three-dimensional_thermal_bridges)
- Asdrubali, F., & Baldinelli, G. (2011). Thermal transmittance measurements with the hot box method: Calibration, experimental procedures, and uncertainty analyses of three different approaches. *Energy and Buildings*, 43(7), 1618-1626. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.005>
- Berggren, B., & Wall, M. (2011). *Thermal bridges in passive houses and nearly zero-energy building*. Disponível em: <https://lup.lub.lu.se/record/3515947>
- 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, 331–339. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.021>
- Cabral, P. H. G. D. geral. (2013). Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013. *Diário Da Republica*, 2º série(58), 30.
- Cartas, J. F. D. N. (2011). *Simulação dinâmica de um edifício de escritórios com os programas EnergyPlus e Trace 700* [IST]. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/memec/dissertacao/2353642337443>
- Douguet, R., Ha, T.-T., Feuillet, V., Meulemans, J., & Ibos, L. (2018). *A novel experimental method for the in situ detection of thermal bridges in building envelopes based on active infrared thermography and singular value decomposition analysis*. Disponível em: <https://doi.org/10.21611/qirt.2018.029>
- EnergyPlus. (2010). Engineering Reference. *US Department of Energy, c*, 1–847. Disponível em: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:EnergyPlus+Engineering+Reference,+The+Reference+to+EnergyPlus+Calculations#1>
- EnergyPlus, U. S. D. of E. (2005). *Dados Meteorológicos por Localização*. Disponível em: <https://energyplus.net/weather/sources#INETI>
- Fouda, A., & Melikyan, Z. (2010). Assessment of a modified method for determining the cooling load of residential buildings. *Energy*, 35(12), 4726–4730. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.022>
- Fouda, A., Melikyan, Z., Mohamed, M. A., & Elattar, H. F. (2014). A modified method of calculating the heating load for residential buildings. *Energy and Buildings*, 75, 170–175. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.047>
- François, A., Ibos, L., Feuillet, V., & Meulemans, J. (2021). In situ measurement method for the quantification of the thermal transmittance of a non-homogeneous wall or a thermal

- bridge using an inverse technique and active infrared thermography. *Energy and Buildings*, 233. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110633>
- Garrido, I., Lagüela, S., Arias, P., & Balado, J. (2018). Thermal-based analysis for the automatic detection and characterization of thermal bridges in buildings. *Energy and Buildings*, 158, 1358–1367. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.031>
- Ge, H., & Baba, F. (2017). Effect of dynamic modeling of thermal bridges on the energy performance of residential buildings with high thermal mass for cold climates. *Sustainable Cities and Society*, 34(June), 250–263. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.016>
- Grinzato, E., Vavilov, V., & Kauppinen, T. (1998). Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*, 29(1), 1–9. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(97\)00039-x](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(97)00039-x)
- Huizenga, C., Arasteh, D., Finlayson, E., Mitchell, R., Griffith, B., Kohler, C., & Curcija, D. (1999). *THERM 2 . 0 : A Building Component Model for Steady-State Two-Dimensional Heat Transfer University of California 1 Cyclotron Road Berkeley , CA 94720 USA Department of Mechanical Engineering THERM 2 . 0 : A BUILDING COMPONENT MODEL FOR STEADY-STATE TWO-DI. May*, 0–6.
- ISO, 10211. (2017). ISO 10211 - Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures — Detailed calculations. *61010-1 © Iec:2001*.
- ISO, 13788. (2012). ISO 13788 - Hygrothermal performance of building components and building elements — Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation — Calculation methods. *61010-1 © Iec:2001, 2012*, 13.
- ISO, 13790. (2014). ISO 13790 - Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling. *61010-1 © Iec:2001, 2014*, 13.
- ISO, 14683. (2003). ISO 14683 - Thermal bridges in building construction — Linear thermal transmittance — Simplified methods and default values. *61010-1 © Iec:2001, 2003*, 13.
- ITEcons. (2011a). *Catálogo online de Pontes Térmicas Lineares do ITEcons*. Disponível em: <https://www.itecons.uc.pt/catalogoptl/index.php>
- ITEcons. (2011b). *Catálogo Online de Pontes Térmicas Lineares Guia de utilização*.
- Jacinto, J. (2014). *Metodologias de cálculo das necessidades de aquecimento na ISO 13790*. [Universidade de Lisboa]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10451/16099>
- Kim, H., & Yeo, M. (2020). Thermal bridge modeling and a dynamic analysis method using the analogy of a steady-state thermal bridge analysis and system identification process for building energy simulation: Methodology and validation. *Energies*, 13(17), 1–22. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13174422>
- Kossecka, E., & Kosny, J. (1997). Equivalent Wall as a Dynamic Model of a Complex Thermal Structure. *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, 20(3), 249–268. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/109719639702000306>
- Martin, K., Escudero, C., Erkoreka, A., Flores, I., & Sala, J. M. (2012). Equivalent wall method for dynamic characterisation of thermal bridges. *Energy and Buildings*, 55, 704–714. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.024>
- Miguel, B., Santos, C., Térmicas, P., Em, L., Com, E., Miguel, B., & Santos, C. (2018). *Estrutura Metálica Leve (LSF): Ligação Pontes Térmicas Lineares em Edifícios com Estrutura metálica LEve (LSF)* [Universidade de Coimbra]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10316/84884>
- Miguel, P. (2012). *Análise Dinâmica do Comportamento Térmico de Edifícios* [Universidade

- de Aveiro]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10773/10473>
- Parlamento Europeu e do Conselho. (2018). Directiva 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018 que altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética. *Jornal Oficial Da União Europeia, L156*, 75–91. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844&from=EN>
- Pechincha, J. (2011). *Avaliação do impacte das pontes térmicas no desempenho térmico dos edifícios do Campus da FCT / UNL – análise experimental* [Universidade Nova de Lisboa - FCT]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/6721>
- Prata, J. (2017). Dynamic behaviour of linear and point thermal bridges of buildings – Numerical and experimental simulations. *Universidade de Coimbra, November*.
- Prata, J., Tadeu, A., & Simões, N. (2014). Influence of material properties and boundary conditions on the dynamic thermal behaviour of a building corner. *WIT Transactions on the Built Environment, 142*, 333–345. Disponível em: <https://doi.org/10.2495/ARC140291>
- Quinten, J., & Feldheim, V. (2016). Dynamic modelling of multidimensional thermal bridges in building envelopes: Review of existing methods, application and new mixed method. *Energy and Buildings, 110*, 284–293. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.003>
- Rodrigues, S. M. E. (2020). *Análise de metodologias para determinação da classe energética de edifícios de habitação no âmbito do Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE)*. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10451/45462>
- Santos, C. (LNEC), & Matias, L. (LNEC). (2006). ITE 50. In *Informações Científicas e Técnicas* (p. 171). LNEC. <https://doi.org/697.133>
- Silva, J. A. R. M. da. (2009). Humidade na construção síntese das causas e estratégias de reabilitação. *Cadernos de Apoio Ao Ensaio Da Tecnologia Da Construção e Da Reabilitação de Anomalias Não Estruturais Em Edifícios, 58*.
- Simões, N., Prata, J., & Tadeu, A. (2014). Contribution of linear thermal bridges to the overall thermal performance of the building envelope: Dynamic analysis. *WIT Transactions on the Built Environment, 142*, 321–332. Disponível em: <https://doi.org/10.2495/ARC140281>
- Tadeu, A., Simões, I., Simões, N., & Prata, J. (2011). Simulation of dynamic linear thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain. *Energy and Buildings, 43*(12), 3685–3695. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.001>
- Theodosiou, T. G., Tsikaloudaki, A. G., Kontoleon, K. J., & Bikas, D. K. (2015). Thermal bridging analysis on cladding systems for building facades. *Energy and Buildings, 109*, 377–384. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.037>
- Theodosiou, T., Tsikaloudaki, K., Kontoleon, K., & Giarma, C. (2021). Assessing the accuracy of predictive thermal bridge heat flow methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 136*(September 2020), 110437. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110437>