



Diogo Alexandre Rodrigues Cardoso

# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO FUNCIONAL DE UMA HABITAÇÃO COM ESTRUTURA EM LSF

FUNCTIONAL EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF A LSF HOUSING.

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,  
orientada pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus.

Coimbra, 25 de Julho de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

Diogo Alexandre Rodrigues Cardoso

# **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO FUNCIONAL DE UMA HABITAÇÃO COM ESTRUTURA EM LSF**

**FUNCTIONAL EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF A LSF HOUSING**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,  
orientada pelo Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus.

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.

Coimbra, 25 de Julho de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Neste espaço deixo o meu agradecimento a todos os que me acompanharam de uma forma ou outra neste percurso, tornando-o numa experiência para a vida.

Ao Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus pela forma amigável que sempre me recebeu, por toda a orientação, disponibilidade no auxílio à realização de todos os ensaios necessários e por todos os conhecimentos prestados durante a elaboração deste trabalho.

A toda a minha família por todo o apoio e motivação que me deram ao longo de todo este percurso. Um obrigado muito especial aos meus pais, que fizeram com que tudo isto tenha sido possível, e a quem devo a pessoa que hoje sou.

Aos meus colegas com quem dividi o teto, Rodolfo Silva, Cristiano Silva e Ana Moreno, por todos os momentos especiais, conversas, brincadeiras e gargalhadas que partilhámos. Guardarei com muita saudade todo este tempo que passámos juntos.

A todos os meus amigos pela paciência, carinho e companheirismo prestado nos bons e maus momentos destes últimos anos.

Aos meus colegas de curso, por toda a ajuda, incentivo e conselhos prestados durante este percurso. Um obrigado especial a quem me acompanhou de mais perto nesta última fase, ao David Abrantes, Rui Ramos, Jéssica Freitas e Carolina Sanches.

À empresa Evohouse por toda a ajuda prestada e cedência da habitação para elaboração desta dissertação. Um agradecimento especial ao André Gaspar e ao Tiago Nunes por se mostrarem disponíveis e interessados na realização deste trabalho.

## RESUMO

A construção em aço leve (*Lightweight Steel Framing*) tem vindo a ganhar espaço/mercado como solução construtiva face à construção tradicional um pouco por toda a Europa, e mais recentemente em Portugal. Trata-se de um sistema construtivo com elevada resistência e durabilidade, em que o principal elemento resistente é o aço enformado a frio.

Devido a esta solução usar como base paredes finas e leves, tem como desvantagem ter uma baixa inércia térmica e apresentar muitas pontes térmicas derivadas à forte utilização do aço, que é um elemento com uma condutibilidade térmica muito elevada. Este sistema requer, portanto, muita atenção ao nível de desempenho térmico e acústico, para poder oferecer aos ocupantes a comodidade desejada.

Pretende-se com esta dissertação medir e avaliar o desempenho térmico e acústico de uma construção em LSF, onde foram realizadas medições “in situ” de uma habitação tipo em Portugal, de modo a monitorizar o desempenho real da mesma.

Foram registadas as variações de temperatura durante uma semana, dentro e fora da moradia, de modo a compreender como é que esta solução se comporta durante a estação fria, e se os valores obtidos pelo cálculo das necessidades energéticas do edifício (através do regulamento nacional em vigor) se aproximam ou não dos valores medidos. Para a vertente da acústica foram realizados os ensaios segundo as normas ISO 16283, com o intuito de perceber se esta habitação cumpre com os requisitos mínimos de conforto dos ocupantes. Foi também efetuado um estudo de paramétrico ao edifício, onde foram alterados certos parâmetros do sistema, de modo a perceber quais os consumos provocados por cada um deles. Com estes resultados, foi assim possível perceber que alterações ao sistema provocam um maior impacto nas necessidades energéticas finais do edifício e em que percentagem.

Nesta dissertação, concluiu-se que este sistema apresenta um grau de isolamento térmico e acústico adequado às necessidades dos seus ocupantes, ao mesmo tempo que oferece um consumo energético bastante reduzido.

**Palavras-chave:** *Lightweight Steel Framing*, LSF, Comportamento Térmico, Condicionamento Acústico, “In-situ”, Avaliação Experimental

## ABSTRACT

Lightweight Steel Framing has been gaining space/market as a constructive solution to traditional construction a little throughout Europe, and more recently in Portugal. It is a constructive system with high strength and durability, in which the main resistant element is cold formed steel.

Due to the use of thin and lightweight walls, it has the disadvantage of having a low thermal inertia and having many thermal bridges derived from the strong use of steel, which is a very high thermal conductivity element. This system therefore requires a lot of attention to the level of thermal and acoustic performance in order to offer the occupants the desired comfort.

The aim of this dissertation is to measure and evaluate the thermal and acoustic performance of a building in LSF, where "in situ" measurements of a typical housing were carried out in Portugal, in order to monitor the real performance of the same.

Temperature variations were recorded for one week, inside and outside the building, in order to understand how this solution behaves during the cold season, and whether the values obtained by calculating the energy needs of the building (through the national regulation in effect), are approximate or not the measured values. For the acoustics evaluation, tests according to ISO 16283 were carried out, in order to understand if this housing meets the minimum requirements of occupants comfort. A parametric study was also carried out on the building, where certain parameters of the system were altered, in order to perceive the consumptions caused by each one of them. With these results, it was possible to perceive that changes to the system cause a greater impact on the final energy needs of the building and in what percentage.

In this dissertation, it was concluded that this system presents a level of thermal and acoustic insulation suited to the needs of its occupants, while offering a very low energy consumption.

**Keywords:** Lightweight Steel Framing, LSF, Thermal Behavior, Acoustic Conditioning, "In-situ", Experimental Evaluation

## ÍNDICE

|   |      |
|---|------|
| AGRADECIMENTOS .....                                      | i    |
| RESUMO .....  | ii   |
| ABSTRACT .....  | iii  |
| ÍNDICE.....   | iv   |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                   | vi   |
| ÍNDICE DE TABELAS .....                                   | vii  |
| SIMBOLOGIA .....  | viii |
| ABREVIATURAS .....  | x    |
| 1 INTRODUÇÃO.....   | 1    |
| 1.1 Enquadramento geral .....                             | 1    |
| 1.2 Objetivos do trabalho.....                            | 2    |
| 1.3 Estrutura da dissertação .....                        | 2    |
| 2 A CONSTRUÇÃO EM AÇO LEVE .....                          | 4    |
| 2.1 Breve introdução.....                                 | 4    |
| 2.2 Estruturas em aço leve .....                          | 5    |
| 2.2.1 Construção stick-build.....                         | 5    |
| 2.2.2 Construção por painéis .....                        | 6    |
| 2.2.3 Construção modular.....                             | 6    |
| 2.3 Materiais usados neste tipo de construção .....       | 6    |
| 2.3.1 Materiais metálicos.....                            | 7    |
| 2.3.2 OSB .....   | 8    |
| 2.3.3 Lã mineral.....                                     | 8    |
| 2.3.4 Sistema ETICS .....                                 | 9    |
| 2.3.5 Placas de gesso cartonado.....                      | 10   |
| 2.3.6 Painéis sanduíche.....                              | 10   |
| 3 DESEMPENHO TÉRMICO E ACÚSTICO DE UM EDIFÍCIO .....      | 11   |
| 3.1 Desempenho térmico e energético .....                 | 11   |
| 3.1.1 Introdução .....                                    | 11   |
| 3.1.2 Inércia térmica .....                               | 11   |
| 3.1.3 Coeficiente de transmissão térmica .....            | 13   |
| 3.1.4 Localização do isolamento .....                     | 14   |
| 3.1.5 Projeto, orientação e localização do edifício ..... | 15   |
| 3.1.6 Ventilação .....                                    | 16   |
| 3.1.7 Vãos envidraçados .....                             | 17   |
| 3.1.8 Pontes térmicas .....                               | 18   |
| 3.1.9 Certificado SCE.....                                | 20   |
| 3.2 Desempenho acústico .....                             | 21   |
| 3.2.1 Introdução .....                                    | 21   |

---

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.2.2 | Procedimento adotado na avaliação do edifício ..... | 23 |
| 4     | CASO DE ESTUDO .....                                | 30 |
| 4.1   | Caracterização do edifício.....                     | 30 |
| 4.1.1 | Zona climática .....                                | 30 |
| 4.1.2 | Identificação de áreas .....                        | 30 |
| 4.1.3 | Pontes térmicas lineares.....                       | 37 |
| 4.1.4 | Sistemas técnicos .....                             | 38 |
| 4.2   | Procedimento experimental .....                     | 39 |
| 4.2.1 | Medições térmicas e energéticas .....               | 39 |
| 4.2.2 | Medições acústicas .....                            | 42 |
| 5     | RESULTADOS E ANÁLISES .....                         | 45 |
| 5.1   | Medições térmicas e energéticas.....                | 45 |
| 5.2   | Medições acústicas .....                            | 49 |
| 5.2.1 | Isolamento fachada.....                             | 49 |
| 5.2.2 | Isolamento entre compartimentos.....                | 54 |
| 5.3   | Estudo paramétrico .....                            | 57 |
| 6     | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....                | 63 |
| 6.1   | Conclusões .....                                    | 63 |
| 6.2   | Trabalhos futuros .....                             | 64 |
|       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                    | 66 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Perfil em (i) U, em (ii) C, em (iii) Z e em (iv) ómega (adaptado de (Soares <i>et al.</i> , 2017)).                                 | 7  |
| Figura 2.2 – Camadas constituintes do sistema ETICS (Futureng@2018).   | 9  |
| Figura 3.1 – Imagem ilustrativa das variações de temperatura interior em função da inércia térmica (adaptação de (Simões <i>et al.</i> , 2016)). | 12 |
| Figura 3.2 – Ilustração de (i) Ventilação natural e (ii) Ventilação forçada.   | 17 |
| Figura 3.3 – Níveis de pressão sonora segundo Brüel & Kjær (2001).   | 22 |
| Figura 3.4 – Incidência da fonte de ruído com a fachada (Tadeu <i>et al.</i> , 2016).  | 24 |
| Figura 3.5 – Ilustração de como é medido o tempo de reverberação (Mateus, 2014).   | 26 |
| Figura 3.6 – Curva de referência sobreposta a curva de índices de isolamento (Tadeu <i>et al.</i> , 2016).                                       | 28 |
| Figura 4.1 – Planta e alçados da moradia em estudo.  | 30 |
| Figura 4.2 – Identificação da envolvente do edifício.  | 31 |
| Figura 4.3 – Descrição da parede exterior da habitação em estudo.  | 32 |
| Figura 4.4 – Representação de pontes térmicas lineares escolhidas do catálogo do ITeCons.  | 38 |
| Figura 4.5 – Localização dos termómetros e do sistema AC.  | 40 |
| Figura 4.6 – Preparação para realização do ensaio de fachada.  | 42 |
| Figura 4.7 – Preparação para realização da medição do tempo de reverberação.   | 43 |
| Figura 4.8 – Ilustração do posicionamento de tomadas (i) em obra e (ii) como deveriam ser aplicadas.   | 44 |
| Figura 5.1 – Valores U das várias soluções analisadas.   | 59 |



## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Classes de inércia térmica interior (Despacho n.º 15793-K/2013).....                    | 12 |
| Tabela 3.2 – Valores das resistências térmicas superficiais, $R_{se}$ e $R_{si}$ (REH). .....        | 14 |
| Tabela 3.3 – Impacte da orientação num edifício (Pacheco <i>et al</i> , 2012).....                   | 16 |
| Tabela 3.4 – Tabela de valores por defeito para as PTL de acordo com o REH.....                      | 20 |
| Tabela 3.5 – Valores de referência para sons aéreos. ....  | 28 |
| Tabela 3.6 – Valores das curvas de referência para cálculo dos valores $R_{Rosa}$ e $R_{traf}$ ..... | 29 |
| Tabela 4.1 – Levantamento dimensional do edifício.....   | 31 |
| Tabela 4.2 – Resistência térmica de espaços não ventilados (REH). ....                               | 33 |
| Tabela 4.3 – Resumo dos constituintes da parede exterior. ....                                       | 34 |
| Tabela 4.4 – Condutibilidade térmica e emissividade dos vãos envidraçados. ....                      | 35 |
| Tabela 4.5 – Localização, orientação e área dos envidraçados. ....                                   | 35 |
| Tabela 4.6 – Materiais constituintes do teto falso. ....   | 36 |
| Tabela 4.7 – Constituição da laje. ....  | 37 |
| Tabela 4.8 – Pontes térmicas lineares exteriores. ....   | 37 |
| Tabela 4.9 – Pontes térmicas lineares interiores.....  | 38 |
| Tabela 5.1 – Resumo de temperaturas interiores e exteriores. ....                                    | 46 |
| Tabela 5.2 – Valores do desempenho térmico calculados pelo REH. ....                                 | 47 |
| Tabela 5.3 – Resultados obtidos para o nível de ruído no exterior da fachada. ....                   | 50 |
| Tabela 5.4 – Resultados obtidos para o nível de pressão sonora no compartimento recetor. .           | 51 |
| Tabela 5.5 – Resultados obtidos para o nível de ruído de fundo no compartimento recetor. .           | 51 |
| Tabela 5.6 – Resultados obtidos para o tempo de reverberação no compartimento recetor. ..            | 52 |
| Tabela 5.7 – Cálculo do valor $D_{2m,nT}$ .....  | 53 |
| Tabela 5.8 – Cálculo do valor $D_{2m,nT,w}$ (C,Ctr).....   | 53 |
| Tabela 5.9 – Resultados obtidos para o nível de ruído no compartimento emissor. ....                 | 54 |
| Tabela 5.10 – Resultados obtidos para o nível de ruído no compartimento recetor.....                 | 55 |
| Tabela 5.11 – Cálculo do valor $D_{nT}$ .....  | 55 |
| Tabela 5.12 – Cálculo do valor $D_{nT,w}$ (C,Ctr).....   | 56 |
| Tabela 5.13 – Parâmetros energéticos referentes ao edifício em estudo. ....                          | 57 |
| Tabela 5.14 – Parâmetros energéticos relativos a ganhos solares. ....                                | 58 |
| Tabela 5.15 – Pontes térmicas lineares exteriores e interiores. ....                                 | 58 |
| Tabela 5.16 – Parâmetros energéticos relativos a PTL. ....   | 58 |
| Tabela 5.17 – Parâmetros energéticos relativos a camadas de isolamento. ....                         | 60 |
| Tabela 5.18 – Parâmetros energéticos para ventilação mecânica.....                                   | 61 |
| Tabela 5.19 – Parâmetros energéticos para ventilação natural.....                                    | 61 |
| Tabela 5.20 – Parâmetros energéticos para sistemas técnicos.....                                     | 62 |
| Tabela 5.21 – Parâmetros com mais influência no consumo final. ....                                  | 62 |

## SIMBOLOGIA

$A_p$  – Área interior útil de pavimento [ $m^2$ ]

$B_{ur}$  – coeficiente de redução de perdas

$C$  – Índice de Ruído Rosa [dB]

$C_{tr}$  – Índice de Ruído de Tráfego Urbano [dB]

$D_{nT}$  – Índice de isolamento sonoro padronizado entre as duas divisões [dB]

$D_{nT,w}$  – Valor único do índice de isolamento sonoro entre as duas divisões [dB]

$D_{2m,nT}$  – Índice de isolamento sonoro padronizado da fachada [dB]

$D_{2m,nT,w}$  – Valor único do índice de isolamento sonoro da fachada [dB]

$GD$  – Número de Graus-Dia da estação de aquecimento

$e$  – Espessura da camada [m]

$F_g$  – Fração envidraçada

$g_{L,vi}$  – Fator solar do vidro para uma incidência solar normal ao vão

$g_{L,tp}$  – Fator solar do vidro para uma incidência solar normal ao vão com os dispositivos de proteção solar existentes

$g_{L,T}$  – Fator solar do vidro para uma incidência solar normal ao vão com todos os dispositivos de proteção solar totalmente ativados

$I_t$  – Inércia térmica do edifício [ $kg/m^2$ ]

$L_p$  – Nível de pressão sonora [dB]

$L_b$  – Nível do ruído de fundo da divisão [dB]

$L_{sb}$  – Nível de pressão sonora corrigido com o ruído de fundo [dB]

$L_{2m}$  – Nível de pressão sonora a 2m da fachada [dB]

$M_{si}$  – Massa superficial útil do elemento  $i$  [ $kg/m^2$ ]

$N_{ic}$  – Necessidades nominais de energia útil para aquecimento [ $kWh/(m^2 \cdot ano)$ ]

$N_t$  – Valor máximo das necessidades nominais anuais de energia primária [ $kWh_{EP}/(m^2 \cdot ano)$ ]

$N_{tc}$  – Necessidades nominais globais anuais de energia primária [ $kWh_{EP}/(m^2 \cdot ano)$ ]

$N_{vc}$  – Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento [ $kWh/(m^2 \cdot ano)$ ]

$n$  – Número de medições efetuadas

$p$  – Pressão sonora [Pa]

$p_0$  – Valor de referência da pressão sonora [Pa]

$Q_a$  – Necessidades de energia útil para preparação de AQS [ $kWh/ano$ ]

$r$  – Fator de redução da massa superficial útil

$R$  – Resistência térmica [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

$R_{ar}$  – Resistência térmica de espaços não ventilados [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

$R_i$  – Resistência térmica de cada camada  $i$  do elemento construtivo [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

$R_{ph}$  – Taxa de renovação de ar no edifício em [ $h^{-1}$ ]

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

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

$R_w$  – Índice de redução sonora

$S_i$  – Área da superfície interior do elemento [ $m^2$ ]

$T$  – Tempo de reverberação [s]

$T_0$  – Tempo de reverberação de referência [s]

$T_{ext}$  – Temperatura média exterior [ $^{\circ}C$ ]

$T_{int}$  – Temperatura média interior [ $^{\circ}C$ ]

$U$  – Coeficiente de transmissão térmica [ $W/m^2^{\circ}C$ ]

$U_{wdn}$  – Coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite do vão envidraçado [ $W/m^2^{\circ}C$ ]

$\lambda$  – Coeficiente de condutibilidade térmica [ $W/m^{\circ}C$ ]

$\Psi$  – Coeficiente de transmissão térmica linear [ $W/(m.^{\circ}C)$ ]

## **ABREVIATURAS**

AC – Ar Condicionado

COP – Coeficiente de Desempenho (eficiência para aquecimento)

DL – Decreto-Lei

EER – Índice de Eficiência de Energia (eficiência para arrefecimento)

EN – Norma Europeia

ENU – Espaço Não Útil

EPS – Poliestireno Expandido

ETICS – “External Thermal Insulation Composite System”

EU – Uniao Europeia

GD – Graus-Dia

ISO – “International Organization for Standardization”

ITeCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção  
Energia, Ambiente e Sustentabilidade

LSF – “Lightweight steel framing”

NP – Norma Portuguesa

OSB – “Oriented Strand Board”

PCE – Pré-certificado Energético

PTL – Pontes Térmicas Lineares

PTP – Pontes Térmicas Planas

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética de Edifícios

VMC – Ventilação Mecânica Controlada

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento geral

O sector da construção civil é dos sectores da indústria que mais energia consome. De acordo com os dados disponíveis no EuroStat (COM, 2016), é estimado que entre 1990 e 2014 na União Europeia, o conjunto dos edifícios residenciais e comerciais, tenham originado um consumo global de energia final de cerca de 40% e cerca de 36% de emissões de gases de efeito de estufa. Além deste elevado consumo, estima-se que cerca de 75% dos edifícios são energeticamente ineficientes. Este é um valor extremamente elevado, e uma vez que a União Europeia já estabeleceu metas para a diminuição de gases poluentes para a atmosfera e promove fortemente a eficiência da energia utilizada (Directiva 2018/844), é necessário adotar métodos de construção que implementem estas medidas, sem reduzir o nível de conforto cada vez mais exigente dos utilizadores dos edifícios. Uma das soluções para este problema pode passar pela utilização de estruturas em aço leve (mais conhecidas por estruturas em LSF, que significa “*Lightweight Steel Framing*”), que é um sistema que tem o princípio de distribuir as cargas aplicadas à estrutura longo das suas paredes resistentes, que são constituídas por perfis de aço enformado a frio.

Este sistema pode trazer grandes vantagens para este ramo, tais como (Martins *et al.*, 2016): Fácil de construir e transportar por serem utilizados elementos leves, fácil produção em série reduzindo tempos e custos de construção, fundações mais ligeiras, os materiais utilizados são facilmente recicláveis ou reutilizáveis, utilização de menos matéria-prima que a construção tradicional e ainda produção de menos desperdícios em obra. Além destas vantagens, oferece ainda uma grande flexibilidade e adaptabilidade arquitetónica, pelo que se torna numa alternativa bastante competitiva e que se adequa aos requisitos funcionais ao longo da sua vida útil (Murtinho *et al.*, 2010).

É um sistema que não tem tido grande relevo em Portugal porque o cliente final ainda se mostra muito reticente quanto à fiabilidade, durabilidade e conforto perante este tipo de construção, dificultando assim a sua evolução e crescimento. Para que o mercado deste sistema construtivo chegue aos valores dos mercados estrangeiros, terá de ser feito um esforço a nível nacional de promoção e divulgação das suas vantagens. Tem esta dissertação como objetivo ajudar a entender o funcionamento deste tipo de solução construtiva.

## 1.2 Objetivos do trabalho

A presente dissertação tem o objetivo de avaliar e apresentar o comportamento térmico e acústico de uma habitação, com o sistema construtivo em aço leve (LSF), construída em Portugal. Sendo que o edifício avaliado tem apenas um piso, esta dissertação foca-se essencialmente na descrição de soluções construtivas e avaliações aplicáveis a edifícios habitacionais da mesma tipologia.

No presente estudo foi utilizado um caso de estudo, para o qual foram realizadas medições de temperatura, medições de consumos energéticos e ensaios de isolamento acústico (entre compartimentos e de fachada), com vista à avaliação dos níveis de conforto térmico e acústico. Paralelamente a esta avaliação experimental foi avaliada a eficiência energética prevista para o edifício, recorrendo à metodologia preconizada no regulamento de desempenho energético de edifícios de habitação, atualmente em vigor em Portugal (REH), com vista a verificar até que ponto os resultados teóricos se aproximavam dos experimentais. Com a aplicação da metodologia preconizada no REH, foi ainda efetuado um estudo paramétrico, de forma a avaliar o impacto que certos elementos construtivos (nomeadamente os vãos envidraçados, pontes térmicas lineares, espessuras e posicionamento de isolamento térmico) e diferentes sistemas técnicos (de ventilação, de eficiência hídrica e de climatização) têm no consumo energético e na própria eficiência energética do edifício.

## 1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

O primeiro, onde é feita a introdução ao tema deste trabalho, tal como a apresentação dos objetivos e a estrutura do mesmo.

O segundo e terceiro capítulo é dedicado à revisão bibliográfica. O segundo apresenta um resumo do sistema que vai ser estudado. É neste capítulo onde se fala brevemente sobre a história da construção em LSF, onde teve origem, em que ponto está a construção com este sistema em Portugal. São também apresentados os diferentes métodos de construção que se pode adotar com este sistema, que materiais são mais utilizados e quais as suas funções. No terceiro capítulo são abordados os conceitos mais técnicos do desempenho térmico e acústico do edifício. É também caracterizado todo o processo de obtenção de valores que vão ser analisados nesta dissertação.

No quarto capítulo, é caracterizado o edifício utilizado como caso de estudo. É explicado como foi executado todo o processo de medição, bem como todas as condições impostas e procedimentos adotados na obtenção dos resultados.

No quinto capítulo são apresentados todos os resultados obtidos conforme descrito no capítulo anterior e é feita uma análise aos mesmos. É também realizado um estudo paramétrico de modo a perceber a influência que alguns elementos têm no comportamento energético do sistema.

O sexto capítulo apresenta as conclusões retiradas deste trabalho bem como possíveis trabalhos futuros.

## 2 A CONSTRUÇÃO EM AÇO LEVE

### 2.1 Breve introdução

Os recursos naturais que o nosso planeta tem para nos oferecer são finitos, e por isso a preocupação de usar materiais sustentáveis na construção tem vindo a crescer. Analisando a União Europeia, o sector da construção consome aproximadamente 50% de todas as matérias-primas extraídas da crosta terrestre, e cerca de 25% de todos os resíduos sólidos produzidos são provenientes desta indústria (Gervásio, 2013).

Nas últimas décadas, a construção metálica tem vindo a aumentar, sendo já muito utilizada em edifícios comerciais e industriais. Como o impacte ambiental deste tipo de solução é muito inferior ao da construção tradicional, prevê-se que a utilização deste sistema construtivo venha a crescer (Simões, 2014). Sobre a sustentabilidade, é importante reforçar que uma grande vantagem da construção é que alguns dos materiais utilizados (como por exemplo o aço) são 100% recicláveis ou até reutilizáveis, e que as quantidades de materiais e matéria-prima utilizados são muito menores comparados com a mesma obra em construção tradicional (Soares *et al.*, 2017).

Por ser um material muito versátil, o aço já desempenha diversas funções na construção civil: pode ser utilizado na construção de vigas, pilares e lajes mistas, coberturas leves de grande vão, ou mais recentemente como elemento principal na construção habitacional (Rego, 2012). Em Portugal, só agora se começou a falar na construção a nível residencial em aço, mas esta vertente já está a ganhar mercado devido às suas vantagens e, portanto, a procura de casas com estrutura em aço tem vindo a crescer. Para além de ser uma solução sustentável, que só por si já é um grande benefício, este tipo de estrutura apesar de ter um custo de mão-de-obra e materiais elevado, apresenta uma grande redução na sua quantidade, o que se reflete num custo final de obra diminuído. Além disso, com o aumento do interesse na reabilitação (SOL@2017), este método apresenta uma grande vantagem face à construção mais tradicional visto que, por utilizar materiais leves, reduz o nível de intrusividade e o impacte nos elementos estruturais antigos.

A construção metálica pode-se dividir em dois grupos: Estruturas em aço laminado a quente, que são já bastante utilizadas para a construção de pavilhões e estruturas de grande porte, e estruturas em aço enformado a frio, mais utilizadas para edifícios de baixo porte. Nesta dissertação, vão ser abrangidas apenas as estruturas em aço enformado a frio, mais conhecidas por estruturas em aço leve.



## 2.2 Estruturas em aço leve

As estruturas em aço leve apareceram nos Estados Unidos da América em meados do século XX, altura em que a população do país se multiplicou, e rapidamente se tornaram populares por ser um tipo de construção simples, rápida e de boa qualidade, oferecendo assim vantagens à construção em madeira e diminuindo o risco de colapso (Silvestre *et al*, 2013).

Ao contrário da construção tradicional, onde os principais materiais resistentes são o aço e o betão, este sistema construtivo tem como principal material resistente apenas o aço galvanizado, e é utilizado maioritariamente em residências unifamiliares de pequeno porte (normalmente até 2 pisos).

Este sistema tem como conceito principal dividir a estrutura num grande número de elementos estruturais, de modo a que as forças aplicadas à estrutura global, sejam suportadas em pequenas parcelas pelos seus elementos. De acordo com uma avaliação feita por Santos *et al.*, (2010), este sistema oferece uma grande flexibilidade e adaptabilidade arquitetónica, muito boa resistência aos sismos, um bom comportamento ao fogo e ainda um bom comportamento térmico e acústico.

Existem três métodos de construção em LSF que se denominam (Rego, 2012):

- Construção stick-build;
- Construção por painéis;
- Construção modular.

### 2.2.1 Construção stick-build

Este é o sistema mais comum entre os três e consiste no corte prévio dos perfis, sendo a construção total da estrutura no local. Primeiro montam-se e aparafusam-se os perfis à laje, e em seguida erguem-se as paredes a partir dos mesmos, formando um esqueleto estrutural capaz de receber os isolamentos e revestimentos. Este método, por ser tudo montado em obra, permite maiores tolerâncias construtivas, um transporte mais eficiente e barato, e ainda dispensa o uso de maquinaria para levantamento dos perfis (Ferreira, 2014). Para edifícios com mais particularidades a nível arquitetónico, este é o sistema mais adequado.

A desvantagem deste tipo de construção é que requer muita mão-de-obra no local, e leva mais tempo a ser construído, o que pode aumentar os custos de produção.

### **2.2.2 Construção por painéis**

Este método apresenta um grau intermédio de pré-fabricação. Os painéis (paredes, pavimentos, treliças e cobertura) vêm montados já de fábrica e são erguidos em obra. Estes podem vir já com os isolamentos e revestimentos finais, reduzindo assim a mão-de-obra no local. A montagem destes painéis faz-se da forma convencional, recorrendo a parafusos auto perfurantes como elementos de fixação (Ferreira, 2014). A montagem em obra é feita com muito mais rapidez comparada com a construção stick-build por os elementos já virem montados de fábrica, o que também se traduz numa maior qualidade e rigor na sua execução.

Como já foi dito, este sistema reduz os custos de mão-de-obra e reduz o tempo de construção no local, mas em contrapartida também se tem de contar com o tempo e despesas relacionadas com o processo de montagem em fábrica, bem como assegurar um transporte adequado dos painéis e o uso de máquinas para a montagem dos mesmos por estes serem elementos pesados, que por sua vez vai agravar o valor final da obra.

### **2.2.3 Construção modular**

Este tipo de construção baseia-se na junção em obra de vários módulos montados em fábrica. Estes módulos podem ser constituídos apenas pela parte estrutural, ou podem já vir com acabamentos finais e prontos a usar. Em obra é apenas necessário construir a laje e organizar as unidades modulares lado a lado ou em altura (Rego, 2012). Tem a vantagem de precisar de muito pouca mão-de-obra no local e ser um tipo de construção muito rápida, mas dos três métodos aqui apresentados, este é o menos personalizável a nível arquitetónico e o que requer mais maquinaria pesada e cuidado no transporte. Este método é mais utilizado em edifícios temporários, escritórios, hospitais e indústrias, tendo muito pouca adesão a nível habitacional (Mcgraw-hill Construction, 2011).

## **2.3 Materiais usados neste tipo de construção**

Para uma melhor perceção do funcionamento do sistema LSF, é fundamental conhecer as características gerais de cada material utilizado nesta construção, bem como para que serve e onde é aplicado.

Os métodos de construção e materiais aplicados na construção em LSF variam de empresa para empresa, mas de modo geral os principais materiais utilizados são os perfis metálicos enformados a frio, painéis OSB, lã mineral, sistema ETICS, gesso cartonado e chapas sandwich. Como se pode observar, este tipo de construção é constituído apenas por elementos secos, pelo que os riscos de patologias relacionadas com humidade vão ser reduzidos. Cada um destes materiais têm funções distintas que são apresentadas a seguir.

### 2.3.1 Materiais metálicos

Estes materiais são os que vão dar estabilidade e suportar as cargas aplicadas à estrutura. A estrutura metálica é composta por perfis de aço enformado a frio e fixações (parafusos). A excelente relação resistência/peso do aço faz com que este material seja dos mais utilizados, possibilitando a utilização de elementos muito mais leves que na construção em betão para vencer os mesmos vãos (Silvestre *et al.*, 2013).

Os perfis estruturais, que são os principais constituintes da estrutura, são fabricados a partir de chapa fina, que normalmente tem entre 1.5 e 2.5mm de espessura, e que são dobrados em fábrica a frio, daí serem chamados “perfis enformados a frio”. Estes perfis são fabricados segundo a norma EN1993-1-3 do Eurocódigo 3, Eurocódigo este que também regula o projeto, dimensionamento e verificação da segurança das estruturas metálicas (Silvestre *et al.*, 2013).

Os perfis mais utilizados em obra apresentam uma secção transversal em U, em C, em Z e em  $\Omega$  (Soares *et al.*, 2017) (Figura 2.1), são normalmente de classe S235, S275 ou S355 e têm um espaçamento médio entre eles de 40cm a 60cm (Silvestre *et al.*, 2013). Para as habitações mais comuns, a largura destes perfis varia entre os 90mm e os 250mm (Futureng@2018). Normalmente aos perfis horizontais são chamados canais, e aos verticais montantes. Os montantes são mais estreitos que os canais para facilitar o “encaixe” e aumentar assim a rapidez de montagem em obra. Os perfis em Z e em ómega ( $\Omega$ ) são habitualmente usados no suporte da cobertura por terem uma grande resistência, e assim permitirem a criação de vãos maiores, sem que comprometam a estabilidade da estrutura.

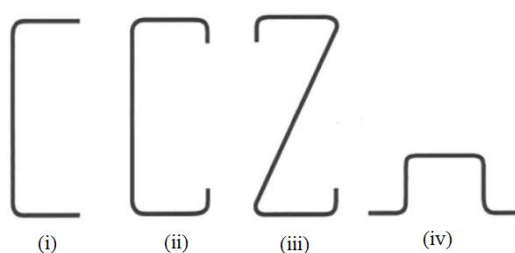


Figura 2.1 – Perfil em (i) U, em (ii) C, em (iii) Z e em (iv) ómega (adaptado de (Soares *et al.*, 2017)).

Quanto às fixações, existem três tipos, ligação entre aço-OSB/gesso cartonado, aço-aço e entre aço-betão. Para a garantia de qualidade e segurança da estrutura, deve-se de fazer uma escolha ponderada de quais as peças a utilizar para cada caso tendo em consideração os materiais a ligar, bem como a que forças vão estar sujeitas. Para o sistema LSF os parafusos são o método de ligação mais eficaz dada a sua eficiência, rapidez e facilidade de aplicação e ainda devido à sua adaptabilidade (Henriques *et al.*, 2017). Para as ligações entre aço, os mais utilizados são os auto-perfurantes, entre aço e o OSB/gesso cartonado basta parafusos auto-roscantes, e na ligação dos perfis ao betão, opta-se pela combinação de bucha química com varões roscados (Silvestre *et al.*, 2013).

### 2.3.2 OSB

O OSB (Oriented Strand Board) é um elemento imprescindível para um bom comportamento estrutural das construções em LSF. Todos os elementos que contribuam para a estabilidade da construção (paredes, pisos e cobertura) devem de ser forrados com este material que serve de diafragma definitivo à estrutura metálica, e que prepara a estrutura para receber o isolamento ou o reboco (Silvestre *et al*, 2013). É constituído por um aglomerado de filamentos de madeira, sendo um dos derivados da madeira mais importantes dos últimos anos na indústria da construção. Os filamentos são dispostos por camadas, orientados em direções diferentes e revestidos com uma resina. Por fim são prensados e submetidos a temperaturas muito elevadas. O resultado final é “um painel estruturalmente denso, muito resistente, dimensionalmente estável e muito durável.” (JULAR@2018). As madeiras utilizadas neste processo são madeiras de crescimento rápido ou de árvores de baixo valor comercial, o que faz com que o custo de produção seja baixo, ao mesmo tempo que se torna num material sustentável (Silvestre *et al*, 2013).

Apesar de não oferecer grande resistência às cargas verticais, este material desempenha a função de contraventear a estrutura e resistir às forças horizontais aplicadas à mesma (o vento por exemplo). Além das suas principais funções garante uma maior estanquidade, impermeabilização e ainda contribui para o isolamento térmico geral (Moreira, 2012).

O OSB tem 4 classes para diferentes aplicações, sendo a primeira a mais básica e a quarta a mais resistente. Para o caso da construção em LSF são utilizadas as classes 3 e 4 por já terem alguma resistência às humidades (Silvestre *et al*, 2013). Já as classes 1 e 2 só podem ser utilizadas no interior como elementos de apoio à estrutura ou como revestimento para deixar à vista.

### 2.3.3 Lã mineral

A lã mineral é fabricada a partir de rochas basálticas e minerais, que são levadas a temperaturas extremamente altas para fundir. Em seguida são transformadas em filamentos, e aglomeradas com resinas e óleos impermeabilizantes para formar um composto semelhante à lã. Este material é muito utilizado tanto como isolante térmico como acústico (Futureng@2018).

No sistema de LSF, a lã mineral é normalmente aplicada entre o espaçamento dos perfis metálicos e fechada verticalmente com o OSB e/ou gesso cartonado. Confere ao sistema um excelente desempenho térmico e acústico, é resistente ao fogo (aguentando temperaturas até os 800°C), permite a passagem do ar, não retém humidades, não contém substâncias contaminantes e é de fácil aplicação, o que faz com que seja um material de excelência (Fibrosom@2018).

### 2.3.4 Sistema ETICS

Atualmente os utilizadores dos edifícios pedem mais conforto térmico no espaço interior que há alguns anos. Por essa razão tem-se vindo a implantar novas medidas que tenham um impacto significativo no controlo da temperatura interior dos edifícios. Estes avanços na área da térmica devem-se também em grande parte ao aparecimento do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). No seguimento desta procura, o sistema ETICS (External Thermal Insulation Composite System) apareceu como uma resposta a estas exigências, proporcionando um melhor conforto térmico e consequentemente uma redução do consumo de energia nas habitações (APFAC@2015). Este sistema teve desde logo grande aderência por não ser uma medida intrusiva, pelo que só se tem de fazer alterações no exterior do edifício. Desta forma, este passou a ser o material mais utilizado para a camada de isolamento exterior (Soares *et al.*, 2017). Este método de isolamento traz grandes vantagens para a construção, entre elas, as mais importantes são (Futureng@2018):

- Redução das pontes térmicas;
- Diminuição do risco de condensações sendo que o isolamento se dá pelo exterior;
- Economia devido à redução da necessidade de aquecimento e arrefecimento do ambiente interior;
- Melhoria da impermeabilização das paredes.

Apesar da sua aplicação sobre o OSB ser facilitada por ser uma superfície lisa, este método requer equipas especializadas para o seu assentamento, visto que tem um sistema bastante complexo e uma ordem de aplicação de materiais bem definida. Na Figura 2.2 podem ser observadas as várias camadas que constituem este isolamento.

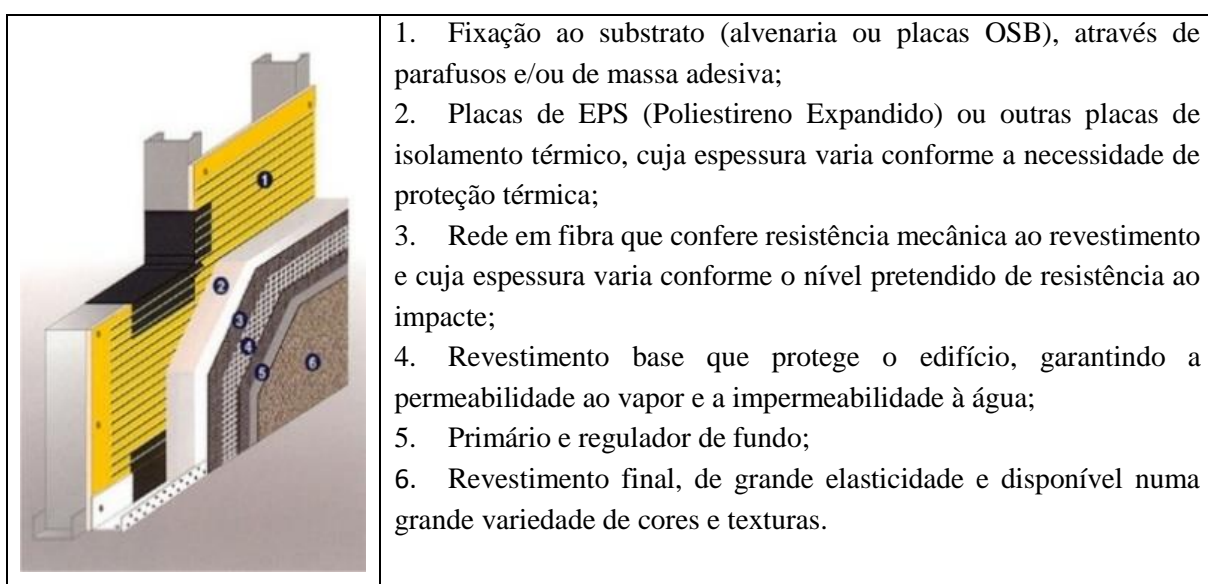


Figura 2.2 – Camadas constituintes do sistema ETICS (Futureng@2018).

### **2.3.5 Placas de gesso cartonado**

O gesso cartonado é fabricado a partir da junção do minério de gesso (gipsita) com papel. Este processo é constituído por duas fases, a moagem e calcinação da gipsita, e a conformação dos painéis, onde se faz uma espécie de sanduiche de papel e gesso. A partir daí, e depois da secagem, os painéis seguem para ser cortados nos mais variados formatos (Rego, 2012). Estes painéis são usados para o revestimento da estrutura metálica e podem ser aparafusados diretamente sobre a mesma ou sobre o OSB. As juntas são rematadas com uma pasta de acabamento e reforçadas com papel ou rede ficando assim a parede pronta para ser lixada e pintada (Futureng@2018).

Este material é muito utilizado na construção pelo seu acabamento final e pela sua rapidez e facilidade de aplicação. Além destas vantagens comporta-se como mais uma barreira contínua face às transferências térmicas e acústicas, ajuda na regulação da humidade do ar por ser um material hidróscopo (possibilita a absorção da humidade em excesso até ao equilíbrio do ambiente) e ainda apresenta um bom comportamento ao fogo (Rego, 2012).

### **2.3.6 Painéis sanduíche**

A cobertura é dos elementos da envolvente que mais contribui para as perdas de calor e ganhos solares do edifício por estar constantemente exposta ao sol (Isolani *et al.*, 2008), ao mesmo tempo que é a primeira barreira contra as infiltrações (Silvestre *et al.*, 2013).

Pode ser constituída por vários materiais não existindo grande restrições para o tipo de acabamento final, podendo este ser em painéis sanduíche, telas ou telha. Destas três opções de acabamento a mais utilizada são os painéis sanduíche por serem uma alternativa que oferece um bom comportamento térmico, ao mesmo tempo que é um material leve, muito versátil e de baixo custo. Estes elementos são aparafusados aos elementos metálicos da cobertura, aos perfis em Z ou ómeças, que foram descritos no ponto 2.3.1.

## 3 DESEMPENHO TÉRMICO E ACÚSTICO DE UM EDIFÍCIO

### 3.1 Desempenho térmico e energético

#### 3.1.1 Introdução

O desempenho térmico do edifício é das características mais valorizadas na perspetiva do conforto. Este desempenho depende de muitos fatores, sendo os mais importantes o tipo de isolamento utilizado, a localização e orientação do edifício, o tipo de ventilação usada, e ainda a área e o tipo de envidraçados aplicados. As pontes térmicas também têm grande importância no comportamento final da construção, e por isso devem de ser minimizadas o quanto possível (Panão, 2008).

Tal como tem acontecido nos últimos anos, é espectável que os requisitos para o isolamento térmico venham a subir progressivamente nos próximos tempos, e com isso os requisitos de outros aspetos relacionados venham a ser mais controlados, tal como as infiltrações e qualidade do ar interior (Grubb *et al*, 2001). Esta mudança já começou a ser imposta pelo Parlamento Europeu na Diretiva 2010/31/EU, sendo alterada e reforçada dois anos depois pela Diretiva 2012/27/EU na medida em que até 2020, a eficiência energética dos edifícios terá de aumentar, de modo a haver uma redução de 20% do consumo de energia primária. No entanto estes valores não estão em vias de ser alcançados dentro do limite estabelecido, tal como concluído no mesmo documento.

Para avaliar o nível de eficiência energética de um edifício e estimar os consumos de energia anuais necessários para a climatização do espaço, é possível recorrer ao certificado SCE (Sistema Nacional de Certificação Energética de Edifícios), que é um documento que tem em conta os componentes mais relevantes da edificação, que contribuem de alguma forma para o maior ou menor consumo energético do edifício.

Em seguida, são analisados os parâmetros com mais influência no comportamento térmico e energético de um edifício, bem como a indicação da forma de atuação mais recomendável de modo a obter uma construção mais sustentável, sem que se diminua o nível de conforto.

#### 3.1.2 Inércia térmica

A inércia térmica de um edifício é a capacidade de armazenar calor nos seus elementos construtivos, e depende da massa superficial útil de cada elemento,  $M_{si}$  (Gomes, 2014). É um fenómeno muito importante nas construções, porque permite que o edifício absorba calor nas horas mais quentes, e o vá libertando durante os períodos mais frios, mantendo assim a

temperatura interior mais estável durante todo o dia. Por esta razão, uma maior inércia térmica significa uma menor dependência de sistemas de climatização.

Para calcular a classe de inércia térmica do edifício pode ser utilizada a expressão (3.1) retirada do Despacho n.º 15793-K/2013 em conjunto com a Tabela 3.1, que de uma forma simplificada nos caracteriza o edifício entre as classes fraca, média e forte.

$$I_t = \frac{\sum_i M_{si} * r_i * S_i}{A_p} \quad (3.1)$$

Onde:

$I_t$  – Inércia térmica do edifício, [kg/m<sup>2</sup>];

$M_{si}$  – Massa superficial útil do elemento  $i$ , [kg/m<sup>2</sup>];

$r_i$  – Fator de redução da massa superficial útil do elemento  $i$ ;

$S_i$  – Área da superfície interior do elemento  $i$ , [m<sup>2</sup>];

$A_p$  – Área interior útil de pavimento, [m<sup>2</sup>].

Tabela 3.1 – Classes de inércia térmica interior (Despacho n.º 15793-K/2013).

| Classe de inércia térmica | $I_t$ [kg/m <sup>2</sup> ] |
|---------------------------|----------------------------|
| Fraca                     | $I_t < 150$                |
| Média                     | $150 \leq I_t \leq 400$    |
| Forte                     | $I_t > 400$                |

A inércia térmica do edifício tem um grande impacto na variação de temperatura interior do mesmo. Ao analisar a Figura 3.1, onde a linha vermelha é a temperatura exterior, a linha azul é a temperatura interior de uma habitação de inércia baixa, e a linha rosa a temperatura interior de uma habitação com uma inércia térmica alta, dá para perceber que quanto maior for a inércia térmica, menos oscilações de temperatura se farão sentir no interior do edifício.

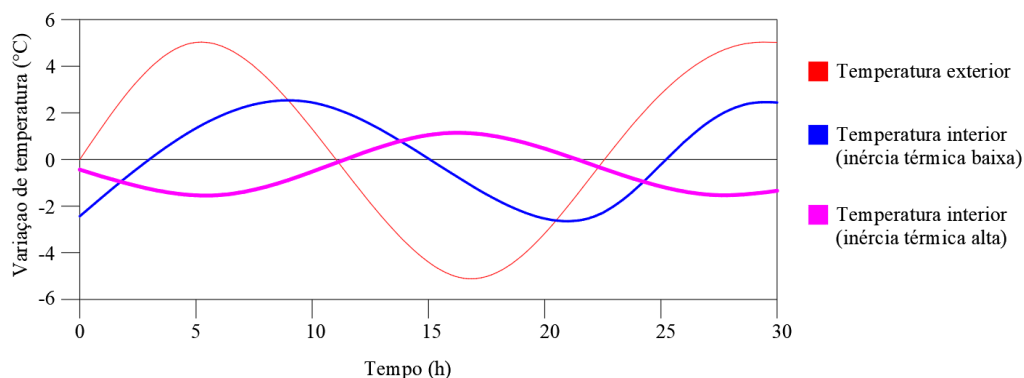


Figura 3.1 – Imagem ilustrativa das variações de temperatura interior em função da inércia térmica (adaptação de (Simões *et al.*, 2016)).



Como no sistema de construção em LSF são utilizados materiais de reduzida massa, estes edifícios são habitualmente classificados como edifícios de baixa ou média inércia térmica, o que leva a pensar que o seu comportamento não será o melhor. Contudo esta falta de inércia tem de ser compensada com o aumento do isolamento térmico, podendo assim ainda ter algumas vantagens (Soares *et al.*, 2013).

Por ser um sistema que não tem capacidade de armazenar calor nos elementos construtivos, mas que também dificulta as trocas de calor com o exterior, faz com que a climatização do espaço interior se faça muito mais rápido que o normal, por se perder menos energia no aquecimento dos elementos construtivos, ao contrário do que acontece na construção pesada, que por exemplo, no inverno, quando as paredes e elementos estruturais estão frios, grande parte do calor interior produzido pelos aparelhos de aquecimento é absorvido pelos elementos pesados.

### 3.1.3 Coeficiente de transmissão térmica

O coeficiente de transmissão térmica,  $U$ , representa a quantidade de calor por unidade de tempo que é transferido por metro quadrado de um determinado material (Ramos, 2018). Este valor é dado por  $W/m^2 \cdot ^\circ C$  e de acordo com o Despacho n.º 15793-K/2013, pode ser calculado pela expressão (3.2):

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se}} \quad (3.2)$$

Onde:

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

$R_i$  – Resistência térmica de cada camada  $i$  do elemento construtivo, [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ];

$R_{se}$  – Resistência térmica superficial exterior, [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ] (no caso de elementos em contacto com espaços não uteis, substituir por  $R_{si}$ ).

A resistência térmica de cada camada pode ser calculada pela expressão (3.3) e depende da espessura da camada ( $e$ ) em metros, e do coeficiente de condutibilidade térmica do material ( $\lambda$ ) em  $W/m^\circ C$ . O valor da resistência térmica do material é normalmente retirado das especificações técnicas fornecidas pelo fabricante do mesmo e é medida em  $m^2 \cdot ^\circ C/W$ , sendo que uma resistência mais pequena significa uma menor capacidade de isolamento térmico.

$$R_i = \frac{e}{\lambda} \quad (3.3)$$

A resistência térmica superficial interior e exterior são valores tabelados (Tabela 3.2). Estes valores podem ser retirados do Regulamento de Desempenho Energético de Habitação (REH) consoante a posição do elemento construtivo e o sentido do fluxo de calor (que vai da superfície mais quente para a mais fria).

Tabela 3.2 – Valores das resistências térmicas superficiais,  $R_{se}$  e  $R_{si}$  (REH).

| Sentido do fluxo de calor |             | Resistência térmica [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ] |                   |
|---------------------------|-------------|--|-------------------|
|                           |             | Exterior $R_{se}$                              | Interior $R_{si}$ |
| Horizontal                |             | 0,04   | 0,13              |
| Vertical                  | Ascendente  | 0,04   | 0,10              |
|                           | Descendente | 0,04   | 0,17              |

Mas embora a expressão (3.2) seja o método mais comum para calcular o coeficiente de transmissão térmica, este só é válido para elementos homogêneos. No caso das estruturas em LSF, onde normalmente os montantes atravessam o isolamento térmico, esta expressão conduz a resultados do lado da insegurança. Por essa razão, nesta dissertação os valores de U vão ser obtidos pelo programa de cálculo THERM, um programa desenvolvido por Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), que calcula as transferências de calor através de uma análise numérica de transferência de calor por condução e radiação de modelos de duas dimensões, baseado em métodos de elementos finitos.

#### 3.1.4 Localização do isolamento

O sistema construtivo em LSF consegue ter coeficientes de transmissão térmica baixos devido à grande espessura de isolamento aplicado na envolvente. Mas não é só a espessura de isolamento que entra para o cálculo, o posicionamento destes elementos têm um grande peso no comportamento final do sistema. De acordo com Roque e Santos (2017) este sistema pode ser dividido em três categorias: Fria, Quente ou Mista.

Na primeira categoria, a fria, o isolamento térmico encontra-se todo entre os perfis metálicos, sendo a camada de isolamento interrompida pelos perfis que, como já foi dito, tem uma influência negativa ao comportamento térmico do edifício, e origina assim condensações intersticiais devido à baixa temperatura que os elementos metálicos vão estar sujeitos. Não é aconselhável a utilização deste método em climas mais frios.

A segunda categoria, a quente, é caracterizada por colocar todo o isolamento do lado de fora da estrutura metálica. É a melhor opção para reduzir as pontes térmicas, e por sua vez o risco de condensação intersticial, sendo que a estrutura mantém uma temperatura superior ao exterior.

Por último, a construção tipo mista, que é uma junção das duas técnicas anteriores, e que combina a aplicação do isolamento entre a estrutura metálica e pelo exterior da mesma. O isolamento tem de ser dividido entre as duas camadas, sendo que pelo menos um terço deve de ser contínuo, ou seja, é aplicado do lado de fora. Para um bom comportamento deste sistema é

recomendado a aplicação de uma barreira de controlo de vapor interno, de modo a diminuir o risco de condensação intersticial ao mesmo tempo que deixa respirar o OSB.

### **3.1.5 Projeto, orientação e localização do edifício**

O projeto, orientação e localização do edifício têm-se mostrado fatores de grande importância na redução do consumo de energia, quer no aquecimento, quer no arrefecimento. Estes parâmetros devem de ter sido em conta logo desde o início do planeamento, na medida em que quanto mais tarde se fizerem alterações no projeto, mais dispendioso e demorado se torna o processo (Santos *et al.*, 2014). Segundo Friess *et al.* (2017) deve ser feito um estudo da localização do edifício de modo a que seja possível um planeamento adequado a cada situação, resultando assim numa maior poupança no futuro que, baseado nos resultados de Aboulnaga *et al.* (2006), conforme citado por Friess *et al.* (2017), pode chegar a uma redução de energia consumida na ordem dos 55%.

A orientação tem um peso muito grande nesta redução, pelo que a maior fatia do consumo total de energia é dada pela climatização e iluminação do espaço, sendo assim de extrema importância orientar o edifício de modo a controlar a energia solar que incide no mesmo (Leal, 2015). São vários os benefícios de um bom planeamento da orientação, tais como (Pacheco *et al.*, 2012):

- É uma medida barata se for pensada no projeto;
- Reduz o consumo de energia;
- Reduz a necessidade de sistemas passivos mais sofisticados;
- Aumenta a quantidade de iluminação natural reduzindo assim a fatura energética;
- Aumenta a eficácia dos coletores solares.

Como Portugal se situa no hemisfério norte, são recomendadas os vãos orientados a sul por permitirem um ganho de calor no Inverno e um maior controlo de radiação solar no verão, diminuindo assim a necessidade de aquecimento e iluminação da habitação. A Tabela 3.3 mostra os resultados de um estudo realizado para demonstrar o impacto que a orientação de um edifício tem em termos da poupança de energia.

Tabela 3.3 – Impacte da orientação num edifício (Pacheco *et al.*, 2012).

| Installation                                      | Change in orientation (in reference to the south) |     |     |
|---|---|-----|-----|
|   | 30°   | 45° | 60° |
| Heating   | 29  | 26  | 36  |
| Cooling   | 58  | 15  | 0   |
| Heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) | 53  | 38  | 23  |
| Total   | 140   | 79  | 59  |

Pela análise desta tabela, podemos concluir que um edifício alinhado 30° a sul pode trazer grandes poupanças na vida útil do edifício sem grande investimento inicial.

A localização do edifício também desempenha um papel importante no seu comportamento, na medida em que a sua exposição solar e ao vento podem ter grande impacto na climatização do edifício. Fazendo uma análise da Europa, há muitas diferenças climáticas entre o Norte e Sul, sendo que no Norte predominam as necessidades de aquecimento, enquanto que no Sul é no arrefecimento que se verificam mais gastos (Leal, 2015). Noutro âmbito, a altitude e os arredores da construção podem trazer vários problemas, tais como o a ventilação excessiva ou até sombreamento resultante de edifícios adjacentes. Estes parâmetros devem de ser tidos em conta durante o planeamento de modo a que se evite gastos energéticos desnecessários.

### 3.1.6 Ventilação

A ventilação é uma das características mais ignoradas durante o projeto do edifício, mas uma boa utilização da ventilação natural permite reduzir custos de climatização no verão, melhorar a qualidade do ar interior e ainda reduzir o risco de humidades. Desta forma, devem de ser estudados os ventos da região de forma a perceber a melhor forma de os aproveitar durante todo o ano.

Existem três métodos de ventilação: (i) ventilação natural, (ii) ventilação forçada e (iii) ventilação mista. A primeira deve de ser utilizada sempre que possível por ser a solução mais económica, mas normalmente não garante a correta qualidade do ar. Para um bom aproveitamento da mesma, deve de se ter um planeamento cuidado de modo a que exista uma abertura em faces opostas da casa possibilitando assim a existência de uma corrente de ar que atravesse a casa de uma ponta a outra. Devido ao avanço das técnicas de construção e da melhoria da estanquidade das portas e janelas, a ventilação natural passou-se a dar somente quando o utilizador sente uma necessidade de renovação do ar, e não de uma forma contínua através de elementos menos estanques (Isolani *et al.*, 2008). Isto significa que nas épocas mais frias, a renovação do ar interior se dê com muito menos frequência que o recomendado por não se abrir as janelas tão frequentemente. Para que a qualidade do ar se mantenha, é necessário então voltar-se para a ventilação forçada, que é um mecanismo de permuta de ar, dado por

condutas de ventilação ligadas aos espaços interiores por extractores, que retiram o ar mais saturado das casas de banho e cozinha, e injeta ar novo nas zonas onde as pessoas se reúnem (salas e quartos) (Polisol@2018). As construções mais recentes têm grandes níveis de estanquidade, pelo que o recurso à ventilação forçada, mais conhecida como Ventilação Mecânica Controlada (VMC) é recomendado. A Figura 3.2 ilustra como se efetuam estas trocas de ar.

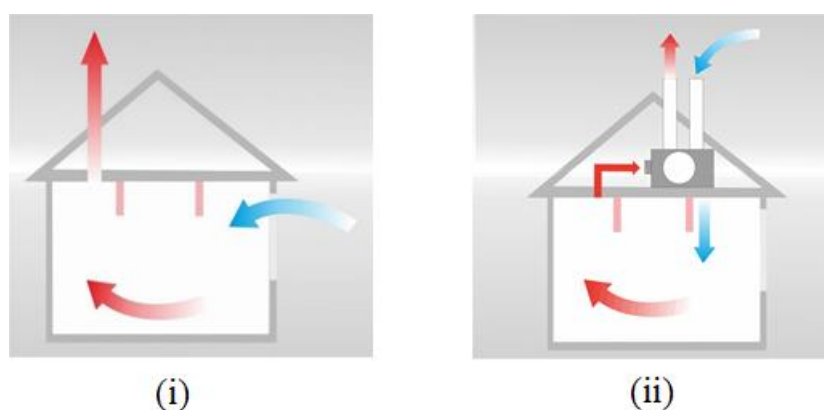


Figura 3.2 – Ilustração de (i) Ventilação natural e (ii) Ventilação forçada

A taxa de renovação de ar no edifício ( $R_{ph}$ ) mínima é de  $0.40h^{-1}$ , mas os valores recomendados variam entre  $0.4 h^{-1}$  e  $0.6 h^{-1}$ , sendo o valor  $0.4 h^{-1}$  recomendado para o inverno e  $0.6 h^{-1}$  para o verão, oferecendo assim o melhor equilíbrio entre eficiência energética e a qualidade do ar interior (Simões *et al.*, 2016).

### 3.1.7 Vãos envidraçados

Os vãos envidraçados são das zonas térmicas mais fracas das construções, pelo que as perdas de energia por esta via numa habitação familiar podem chegar até os 20% (Pacheco *et al.*, 2012) originando assim maiores necessidades de aquecimento. Por esta razão, é de grande importância projetar zonas envidraçadas com as devidas áreas e orientações, prevenindo assim ganhos ou perdas desnecessárias.

No que diz respeito à área, é recomendável que a superfície ocupada por envidraçados da fachada virada a sul seja aproximadamente 40%, sendo que valores acima deste podem dar origem a um aquecimento excessivo durante o verão. A orientação das janelas a Este e Oeste não melhoram o comportamento durante o inverno, e chegam até a piorar o mesmo durante o verão (Isolani *et al.*, 2008). Este acontecimento é justificado pela inclinação do sol na estação, que é praticamente perpendicular às janelas.

Quanto aos envidraçados, é importante o tipo de vidro e de caixilharia usada. Atualmente já há no mercado janelas e caixilhos com muito bom comportamento térmico, sendo que a maioria utiliza vidro duplo por ter uma capacidade de isolamento muito superior ao vidro simples.

Normalmente, quanto maior é o espaçamento entre os vidros duplos, melhor é o seu comportamento térmico. A caixilharia pode ser em PVC, madeira ou alumínio, sendo que ao escolher a última recomenda-se a utilização de caixilharia com corte térmico uma vez que se não tiver, é muito provável haver mais perdas de calor juntamente com problemas de condensação (Isolani *et al.*, 2008).

Para regular a entrada de luz pelos vãos envidraçados podem ser usados dispositivos técnicos. Estes dispositivos podem ser apenas uma película colada no vidro para reduzir parcialmente a radiação da luz solar, ou podem passar pelos métodos mais comuns e mais eficazes de sombreamento, tais como a utilização de *blackouts* ou estores. A proteção, sempre que possível, deve de ser aplicada pelo exterior.

### 3.1.8 Pontes térmicas

As pontes térmicas são zonas onde as perdas de calor se dão mais acentuadamente, ou seja, são um conjunto de fenómenos pontuais situados na envolvente do edifício, que causam uma redução do isolamento térmico desses pontos em relação ao resto da construção (Afonso, 2012).

Estes fenómenos pontuais têm várias causas, entre elas temos (Way *et al.*, 2008):

- Geometria da construção (quando a superfície muda de direção, causando cantos que servem como caminhos adicionais de fluxo de calor);
- Penetrações da envolvente (varandas);
- Ligações entre elementos (Fachada com pavimentos térreos ou intermédios, fachada com varandas, fachada com coberturas, fachada com caixilharia, zonas da caixa de estores e paredes verticais em angulo saliente);
- Materiais construtivos (ex.: estrutura em aço, padieiras);
- Erros na construção (ex.: zonas sem isolamento, caixas de ar com entulho).

Na construção em LSF, os elementos estruturais são constituídos pelo aço, e como se sabe, o aço tem uma elevada condutibilidade térmica, que significa que vai ter um comportamento contrário ao que é desejado. Isto denota que, tanto os montantes como os canais que os seguram junto ao chão e ao teto, vão originar pontes térmicas correspondentes às espessuras do aço. Manter o aço da parte de dentro do isolamento é o método preferido para eliminar estes problemas (Way *et al.*, 2008). De acordo com Soares *et al.* (2017), este isolamento deve de ser contínuo, sendo que desta forma as pontes térmicas são em grande parte mitigadas, contribuindo assim para um melhor comportamento do sistema.

No entanto, num olhar mais geral, onde se considere todo o edifício, conseguimos perceber que a esmagadora maioria da área das paredes e pavimentos não têm qualquer aço, limitando assim

as pontes térmicas. Tendo em conta que os perfis têm 1.5mm de espessura, e são espaçados em média entre 40cm a 60cm (e que este espaço é preenchido com lã mineral), podemos concluir que a percentagem de aço numa parede é  $0.0015/0.4*100\approx 0.375\%$ . Ou seja, aproximadamente 99.625% da área da parede está isolada (Silvestre *et al*, 2013).

Somando à percentagem reduzida de área de aço da parede, com a aplicação do OSB, o gesso cartonado, e o revestimento ETICS, que são camadas contínuas, as pontes térmicas são praticamente eliminadas (Silvestre *et al*, 2013).

Há dois tipos de pontes térmicas: Pontes térmicas planas (PTP) e pontes térmicas lineares (PTL). A diferença entre uma e outra é que nas planas é feito o cálculo do coeficiente de transmissão térmica para a solução por  $m^2$ , e calculada a área em que existe a quebra de isolamento, enquanto que as lineares têm um método de cálculo diferente e são medidas por metro linear.

Para determinar o coeficiente de transmissão térmica linear  $\Psi$ , podem ser utilizados três métodos, o cálculo numérico, os catálogos de pontes térmicas, nomeadamente os disponibilizados pelo ITeCons, ou a utilização de valores catalogados por defeito disponibilizados nas tabelas do REH (Tabela 3.4). O método preferido seria o cálculo numérico adaptado a cada situação, mas sendo um método muito demorado e difícil de aplicar, é pouco utilizado. Para resolver o problema são adotados os valores do ITeCons ou do REH, mas estes apresentam alguma folga, sendo que os primeiros podem apresentar valores com um erro de 20% e os segundos um erro de por volta dos 50%, sendo estes últimos valores tendencialmente mais conservadores (Simões *et al.*, 2016).

Tabela 3.4 – Tabela de valores por defeito para as PTL de acordo com o REH.

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

Um dos problemas destas tabelas é que nenhuma das duas está dimensionada para as construções em LSF, originando assim erros de cálculo bastante significativos numa análise energética. Isto acontece porque as tabelas, tanto a do ITeCons como a do REH, estão calculadas para estruturas em betão, onde as pontes térmicas lineares têm muito mais expressão que no sistema em aço leve, e porque estas não englobam todos os casos possíveis de encontrar numa habitação.

### 3.1.9 Certificado SCE

O certificado SCE é um documento obrigatório para edifícios novos ou sujeitos a grandes intervenções, mas também se aplica a edifícios existentes desde o momento que são postos para venda ou arrendamento. Este documento serve para avaliar o desempenho energético do edifício, classificando este numa escala de 8 patamares, que variam entre A+ e F, sendo o F o nível mais baixo e o A+ o mais alto sendo B- a classe energética mínima para edifícios novos (certificadoenergético@2012). O certificado SCE é um documento emitido no fim da construção, sendo que desde o início, para que a construção seja aprovada, é necessária a emissão de um Pré-certificado Energético (PCE), que é um documento muito idêntico ao SCE e que certifica que os requisitos impostos pelo regulamento (REH) são cumpridos logo em fase de projeto.



Este certificado é um documento emitido por um perito SCE (profissional reconhecido pela Agência para a Energia (ADENE)), e que detalha todas as condicionantes da solução adotada (localização geográfica, orientação do edifício, elementos construtivos, sistemas técnicos, entre outros). Com o recurso a este documento, é possível chegar a uma estimativa para os consumos anuais de energia para a construção em questão, qualificando ao mesmo tempo a qualidade do ar interior do edifício. Nesta dissertação, vão ser comparados os valores estimados para os consumos anuais de energia utilizada para o aquecimento da habitação, calculados pelo método do REH, com os valores reais obtidos experimentalmente.

## 3.2 Desempenho acústico

### 3.2.1 Introdução

A preocupação pelo conforto acústico do espaço não tem tido peso na escolha final de uma habitação, e por essa razão, tem vindo a ser desprezada pelos construtores. Isto deve-se também por não haver uma regulamentação apertada neste campo como existe para a térmica (*Grubb et al.*, 2001).

Para um melhor entendimento de como a performance acústica do edifício funciona, tem de se entender que o isolamento sonoro se refere à capacidade que um elemento construtivo tem de impedir a passagem de energia sonora para o outro lado (Tadeu *et al.*, 2016). Esta energia sonora, ou “som”, é o resultado de uma vibração que é transmitida ao meio de propagação (que pode ser sólido, líquido ou gasoso) provocando uma variação de pressão das partículas desse meio, originando assim uma onda sonora. A velocidade de propagação do som depende da temperatura e do meio onde se encontra, sendo esta maior nos sólidos e menor nos gases. A medida base da amplitude do som é dada pela pressão sonora podendo variar entre os  $20\mu\text{pa}$  e os  $20 \times 10^7 \mu\text{pa}$ , sendo estes valores o mínimo e máximo valor audível ao ser humano. Como o intervalo entre estes dois valores é muito grande, foi criada uma escala logarítmica em função do nível de pressão sonora, de modo a facilitar a caracterização dos níveis do som.

Com o nível de pressão sonora calculado pela expressão (3.4), é possível então recorrer a essa escala onde se comparam os valores obtidos aos ruídos que o ser humano está exposto durante o seu dia-a-dia. Os valores podem variar entre 0 dB e 140 dB e correspondem aos níveis sonoros representados na Figura 3.3.

$$L_p = 10 \log \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (3.4)$$

Onde:

$L_p$  – nível de pressão sonora, [dB];

$p$  – Pressão sonora, [Pa];

$p_0$  – Valor de referência da pressão sonora ( $2 \times 10^{-5}$  Pa).

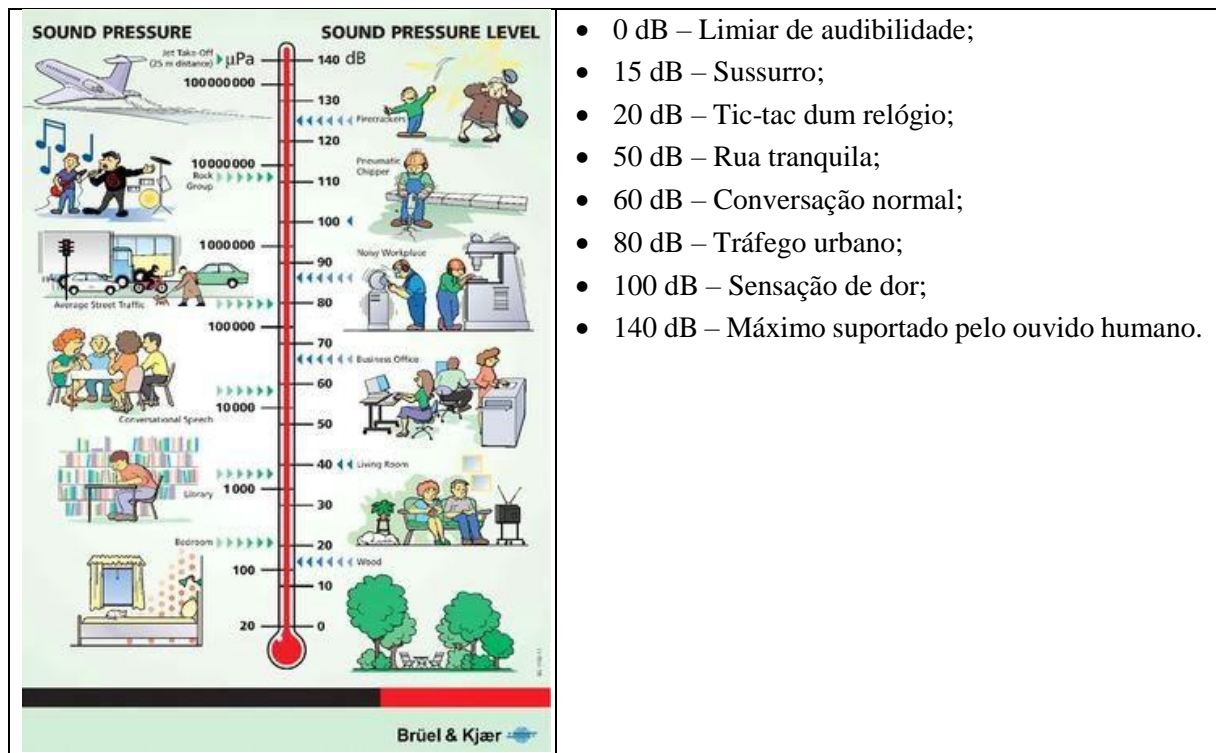


Figura 3.3 – Níveis de pressão sonora segundo Brüel & Kjær (2001).

A transmissão de sons aéreos num edifício é um fenómeno bastante complexo e pode ser dividido em transmissões diretas (quando o som passa diretamente através do elemento de separação) e secundárias (quando o som passa por elementos adjacentes ou espaços laterais). Destes dois tipos, o parâmetro mais fácil de medir são as transmissões diretas, e mesmo estas dependem de muitas variáveis (Mateus, 2012). Para poder avaliar a acústica de um espaço fechado temos que responder a várias questões, tais como se o volume, a forma, e as dimensões do compartimento são adequadas, o tempo de reverberação é aceitável, se o tipo e a distribuição dos materiais de isolamento são os recomendados, os possíveis pontos fracos da construção e ainda que tipo de utilização vai ter o compartimento (Tadeu *et al.*, 2016).

Um outro parâmetro que influencia o nível de isolamento sonoro é a massa do elemento. De acordo com a Lei da Massa Teórica, ao aumentar a massa do elemento, aumenta-se também a capacidade de isolamento deste na medida em que é mais difícil de colocar o corpo a vibrar (Tadeu *et al.*, 2016). Mas segundo Mateus, (2012), ao realizar um estudo onde se comparou várias soluções pesadas com soluções leves equivalentes, chegou-se à conclusão que apesar da

massa do elemento ser um parâmetro muito importante para o comportamento da solução, é possível obter valores de isolamento sonoro muito positivos utilizando soluções leves, desde que estas sejam devidamente executadas.

Há várias formas de avaliar o comportamento acústico de um elemento. Uma das formas mais fáceis para avaliar se uma determinada solução é viável ou não passa por fazer ensaios, que podem ser realizados em laboratório ou *in situ*, e que oferecem valor bastante próximos dos reais. Se estes não forem possíveis, para as soluções construtivas mais correntes, os valores do isolamento acústico podem ser consultados nos catálogos dos fabricantes, sendo estes valores menos fiáveis, visto que para o mesmo ensaio e a mesma solução construtiva é possível encontrar valores muito díspares de fornecedor para fornecedor (Mateus, 2012).

### 3.2.2 Procedimento adotado na avaliação do edifício

Para uma correta caracterização do isolamento sonoro do edifício há dois tipos de medição do isolamento a sons aéreos que se podem fazer: (i) de fachada e (ii) entre compartimentos. Estes ensaios podem ser realizados em laboratório pelas normas ISO 10140-2 & 4 ou *in situ* segundo as normas ISO 16283-1 & 3 (Tadeu *et al.*, 2016). Nesta dissertação apenas vai ser descrito o ensaio *in situ* por se tratar de um estudo realizado a uma moradia já construída.

Os ensaios *in situ* passam pela realização de várias medições no local com recurso a instrumentos emissores de ruído, microfones que captam esse ruído e um aparelho que regista essas medições. Estes ensaios são feitos utilizando filtros de banda de 1/3 de oitava, tendo como frequências centrais: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500 e 3150 hertz.

Na realização destes ensaios, de acordo com a norma ISO 16283-1 & 3, são feitos vários registos para o mesmo valor. Sendo que a média de pressões medidas para cada frequência não pode ser calculada diretamente, é necessário recorrer à expressão (3.5) (Tadeu *et al.*, 2016).

$$L = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_n/10} \right) \quad (3.5)$$

Onde:

L – Nível médio da pressão sonora, [dB];

n – Número de medições efetuadas;

L<sub>n</sub> – Nível de pressão sonora para n posições de medição, [dB].

Em seguida vão ser descritos os ensaios necessários para a obtenção do índice de isolamento acústico a sons aéreos para a fachada e entre compartimentos.

### 3.2.2.1 Ensaios necessários à análise do índice de isolamento da fachada

Para determinar o valor do índice de isolamento da fachada, os ensaios são realizados de acordo com a norma ISO 16283-3. Estes ensaios consistem na medição da pressão sonora no exterior da fachada e no local recetor, do nível de ruído fundo e do tempo de reverberação do compartimento recetor.

#### **Medição da pressão sonora no exterior da fachada ( $L_{1,2m}$ ):**

O recetor deve de ser colocado a uma distância de 2m da face da fachada, ou 1m a partir de uma balaustrada ou outra saliência. A altura mínima do microfone é cerca de 1,5m acima do pavimento.

A fonte de ruído deve de estar a pelo menos 5m da fachada, com um angulo de incidência com a fachada de cerca de 45%, como exemplificado na Figura 3.4

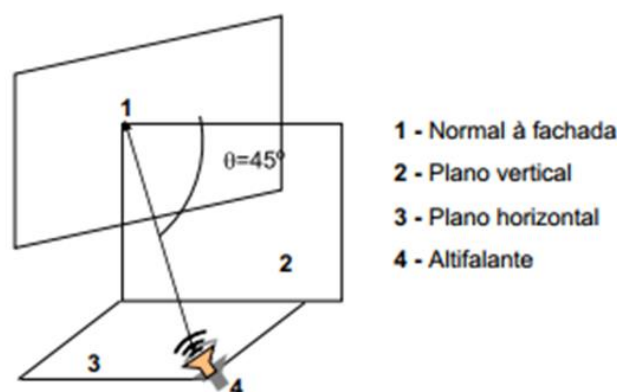


Figura 3.4 – Incidência da fonte de ruído com a fachada (Tadeu *et al.*, 2016).

De acordo com a norma ISO 16283-3, a potência sonora no exterior deve ter uma potência mínima para que no compartimento recetor, o ruído captado com a fonte ligada seja superior em pelo menos 10dB ao ruído de fundo em qualquer banda de frequências. Caso este ponto não seja verificado, devem ser efetuadas as correções previstas na norma.

#### **Medição da pressão sonora no local recetor ( $L_2$ ):**

Para efetuar a medição de ruído na divisão interior, o recetor deve de estar sempre afastado no mínimo 0.5m das paredes ou objetos na divisão e a pelo menos 1m da fonte sonora. Ao mudar o microfone de posição, deve-se ter em atenção que a nova posição deve de estar afastada em 0.7m das restantes posições anteriores.

De acordo com a norma, o número mínimo de posições da fonte e do recetor são as seguintes:

Número mínimo de posições da fonte.....1  
 Número mínimo de posições do recetor .....5

No fim da medição da pressão com o microfone nas várias posições, é necessário utilizar a expressão (3.5) para calcular a média dos 5 valores medidos, e assim obter o valor  $L_2$  para cada frequência.

**Medição do ruído de fundo da divisão ( $L_b$ ):**

É medido o nível de pressão sonora na divisão para as várias frequências de banda com a fonte desligada, permitindo assim obter o ruído de fundo. A medição deste valor serve para assegurar que os valores da pressão sonora medidos com a fonte de som ligada não são afetados pelo ruído de fundo. Para obter o valor final de  $L_{sb}$ , é necessário fazer a correção dos valores medidos para a pressão sonora no local recetor com o ruído de fundo avaliado neste ensaio. Esta correção segue os seguintes critérios:

|                            |  |
|----------------------------|--|
| Se $L_{sb} - L_b \leq 6$   | Corrigir $L_{sb}$ em 1.3dB                               |
| Se $6 < L_{sb} - L_b < 10$ | $L'_{sb} = 10 \log (10^{0.1 * L_{sb}} - 10^{0.1 * L_b})$ |
| Se $L_{sb} - L_b \geq 10$  | Não há lugar a correção                                  |

Apesar de este ensaio não ter um número mínimo de posições de recetor, são normalmente feitos 5 registos, utilizando o mesmo método que para a medição do nível de pressão sonora no compartimento recetor.

**Medição do tempo de reverberação na divisão ( $T$ ):**

O tempo de reverberação ( $T$ ) é a duração requerida para que a média do nível sonoro no compartimento desça 60dB após a emissão sonora ser interrompida (Figura 3.5).

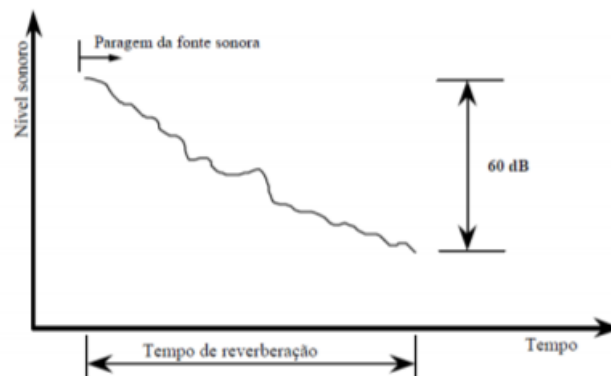


Figura 3.5 – Ilustração de como é medido o tempo de reverberação (Mateus, 2014).

De acordo com a norma o número mínimo de posições da fonte e do recetor são as seguintes:

- Número mínimo de posições da fonte.....1
- Número mínimo de posições do recetor .....3

Apesar do número de posições mínimas do recetor ser 3, o número mínimo de medições finais são 6, isto porque podem ser efetuadas duas medições por cada posição do microfone.

As medições são feitas utilizando os mesmos filtros de banda que as medições anteriores, sendo que para cada uma destas frequências, o tempo de reverberação é determinado pela média aritmética dos valores obtidos das medições realizadas.

#### **Isolamento sonoro padronizado na fachada ( $D_{2m,nT}$ ):**

Feitas as medições descritas e calculando o valor médio de cada parâmetro, é possível calcular o valor do isolamento sonoro padronizado pela expressão (3.6):

$$D_{2m,nT} = L_{2m,1} - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (3.6)$$

Onde:

- $D_{2m,nT}$  – Isolamento sonoro padronizado da fachada, [dB];
- $L_{2m,1}$  – Nível de pressão sonora a 2m da fachada, [dB];
- $L_2$  – Nível médio de pressão sonora no local recetor, [dB];
- $T$  – Tempo de reverberação medido no local recetor, [s];
- $T_0$  – Tempo de reverberação de referência ( $T_0=0.5s$ ).

Este valor, tal como nos outros ensaios, é calculado banda de frequência a banda de frequência.

### 3.2.2.2 Ensaios necessários à análise do índice de isolamento entre compartimentos

A medição do isolamento acústico entre compartimentos é feita de acordo com a norma ISO 16283-1. Para o cálculo deste isolamento sonoro também entram os valores do ruído de fundo  $L_b$ , e do tempo de reverberação  $T$ , mas como o procedimento de medição destes parâmetros já foi descrito para o cálculo do isolamento na fachada, não vão ser aqui repetidos. Para o cálculo do isolamento entre compartimentos o procedimento a seguir é:

#### **Medição do nível de pressão sonora na divisão ( $L_{sb}$ ):**

Tal como o nome indica, esta medição serve para a avaliação do nível da pressão sonora na divisão. Esta medição é feita nas duas divisões, na emissora e na recetora, sendo a emissora a que tem a fonte de ruído ligada.

De acordo com a norma o número mínimo de posições da fonte e do recetor são as seguintes:

Número mínimo de posições da fonte.....2

Número mínimo de posições do recetor .....5

As medições são feitas para as várias bandas de frequências, e para cada frequência é calculada a média dos valores obtidos nos vários ensaios pela expressão (3.5).

#### **Isolamento sonoro padronizado entre as duas divisões:**

Obtendo os valores acima descritos mais os valores de  $L_b$  e  $T$  através dos ensaios, é possível chegar à diferença de níveis sonoros entre as duas divisões. Visto que esta diferença não pode ser obtida pela diferença direta entre os níveis de pressão sonora medidos nas duas divisões estudadas, é aplicada a expressão (3.7) que nos fornece o nível de isolamento sonoro padronizado entre as duas divisões, para cada frequência medida.

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (3.7)$$

Onde:

$D_{nT}$  – Isolamento sonoro padronizado entre as duas divisões, [dB];

$L_1$  – Nível médio de pressão sonora na divisão emissora, [dB];

$L_2$  – Nível médio de pressão sonora na divisão recetora, [dB];

$T$  – Tempo de reverberação medido na divisão recetora, [s];

$T_0$  – Tempo de reverberação de referência ( $T_0=0.5s$ ).

### 3.2.2.3 Valor único do índice de isolamento

O valor único do índice de isolamento sonoro aos sons de condução aérea ( $D_{nT,w}$  e  $D_{2m,nT,w}$ ) é obtido através dos valores já calculados para as várias frequências ( $D_{nT}$  e  $D_{2m,nT}$ ), em conjunto com a curva normalizada de referência (Tabela 3.5) que pode ser encontrada na norma ISO 717-1.

Tabela 3.5 – Valores de referência para sons aéreos.

| Frequency<br>Hz         | Reference values<br>dB    |              |
|-------------------------|---------------------------|--------------|
|                         | One-third-octave<br>bands | Octave bands |
| 100<br>125<br>160       | 33<br>36<br>39            | 36           |
| 200<br>250<br>315       | 42<br>45<br>48            | 45           |
| 400<br>500<br>630       | 51<br>52<br>53            | 52           |
| 800<br>1 000<br>1 250   | 54<br>55<br>56            | 55           |
| 1 600<br>2 000<br>2 500 | 56<br>56<br>56            | 56           |
| 3 150                   | 56                        |              |

Este processo consiste em ajustar a curva de referência à curva de índices de isolamento como representado na Figura 3.6, de modo a que a soma dos desvios desfavoráveis da curva dos índices de isolamento face à de referência seja o maior possível, mas sempre inferior a 32dB. Feito isto, o valor da curva de referência ajustada correspondente à frequência de 500 Hz é o valor único do índice de isolamento.

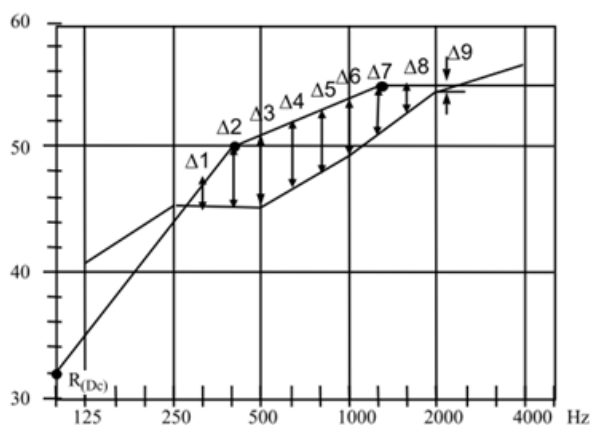


Figura 3.6 – Curva de referência sobreposta a curva de índices de isolamento (Tadeu *et al.*, 2016).

Além deste valor, são também calculados os valores C e Ctr, que são os termos de adaptação ao Ruído Rosa e ao Ruído de Tráfego Urbano, respetivamente. Segundo a norma ISO 717-1, estes índices são normalmente indexados aos índices de isolamento sonoro ( $D_{nT,w}$  e  $D_{2m,nT,w}$ ) de forma a obter um valor mais representativo destes valores. Quando se faz uma medição do



índice de isolamento sonoro entre duas divisões onde haja uma maior emissão de baixas frequências, o valor  $D_{nT,w} + C_{tr}$  é mais representativo do isolamento efetivo do elemento de separação. O mesmo acontece para o valor  $D_{2m,nT,w}$ , que é corrigido por  $C_{tr}$  quando durante as medições o ruído predominante é originado pelo ruído de tráfego (Mateus, 2008). O valor  $C$  funciona da mesma forma, mas para corrigir valores onde haja uma maior emissão de média e altas frequências (voz humana por exemplo).

Estes valores são calculados para as frequências centrais de 100 a 3150 Hz pelas fórmulas (3.8) e (3.9) com o auxílio das curvas de referência representados na Tabela 3.6.

$$R_{Rosa} = -10 \log \left( \sum_i^{nb} 10^{(L_{i1}-D_i)/10} \right) \quad (3.8)$$

$$R_{Traf.} = -10 \log \left( \sum_i^{nb} 10^{(L_{i2}-D_i)/10} \right) \quad (3.9)$$

Onde:

$L_{i1}$  e  $L_{i2}$  – Valores da curva de referência da Tabela 3.6, [dB(A)];

$i$  e  $nb$  – Variação das frequências de 1/3 de oitava que vai de 100 a 3150 Hz;

$D_i$  – Valores da curva de isolamento ( $D_{nT,w}$  e  $D_{2m,nT,w}$ ) medidos para cada frequência, [dB].

Tabela 3.6 – Valores das curvas de referência para cálculo dos valores  $R_{Rosa}$  e  $R_{Traf.}$

|          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| $L_{i1}$ | -29,0 | -26,0 | -23,0 | -21,0 | -19,0 | -17,0 | -15,0 | -13,0 | -12,0 | -11,0 | -10,0 | -9,0 | -9,0  | -9,0  | -9,0  | -9,0  |
| $L_{i2}$ | -20,0 | -20,0 | -18,0 | -16,0 | -15,0 | -14,0 | -13,0 | -12,0 | -11,0 | -9,0  | -8,0  | -9,0 | -10,0 | -11,0 | -13,0 | -15,0 |

Depois de calculados, os valores  $R_{Rosa}$  e  $R_{Traf.}$  são arredondados às unidades, e usados para obter os valores de  $C$  e  $C_{tr}$  finais pelas expressões (3.10) e (3.11).

$$R_{Rosa} - D_{nT,w} = C \quad (3.10)$$

$$R_{Traf.} - D_{2m,nT,w} = C_{tr} \quad (3.11)$$

Por fim, estes valores são representados juntamente com os índices de isolamento na forma  $D_{nT,w}(C; C_{tr})$  ou  $D_{2m,nT,w}(C; C_{tr})$ .

## 4 CASO DE ESTUDO

### 4.1 Caracterização do edifício

O edifício em estudo refere-se a uma moradia unifamiliar não habitada do tipo T2, com construção em LSF, localizada na Aldeia dos Anjos, a 110m de altitude e a 6km do centro de Pombal, Leiria. A moradia tem um pé direito de 2.5m e uma área bruta de construção de 132.8m<sup>2</sup>. Esta é composta por dois quartos, uma casa de banho, uma sala, uma cozinha e uma garagem. O edifício tem a fachada principal orientada a sul de modo a ter um bom aproveitamento solar. Na Figura 4.1 é apresentada a planta e os alçados desta moradia.

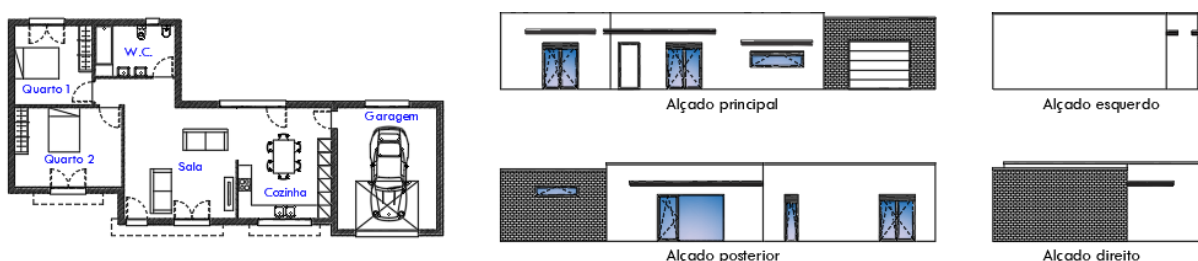


Figura 4.1 – Planta e alçados da moradia em estudo.

#### 4.1.1 Zona climática

Segundo o Despacho n.º 15793-F/2013, documento que “procede à publicação dos parâmetros para o zoneamento climático e respetivos dados”, Leiria pertence à zona Pinhal Litoral. Deste documento podemos retirar que esta zona tem como cota referência 126m de altitude, uma estação de aquecimento com a duração de 6.6 meses, 1323 Graus-Dia e uma temperatura exterior média de 9.6°C no inverno.

#### 4.1.2 Identificação de áreas

Foi feito um levantamento de áreas do edifício e de todos os elementos constituintes do mesmo. O edifício tem uma área útil de 89.37m<sup>2</sup> constituída pelos quartos, casa de banho, sala e cozinha e uma área não útil composta pela garagem e pelo desvão da cobertura. Estas zonas estão delimitadas na Figura 4.2.

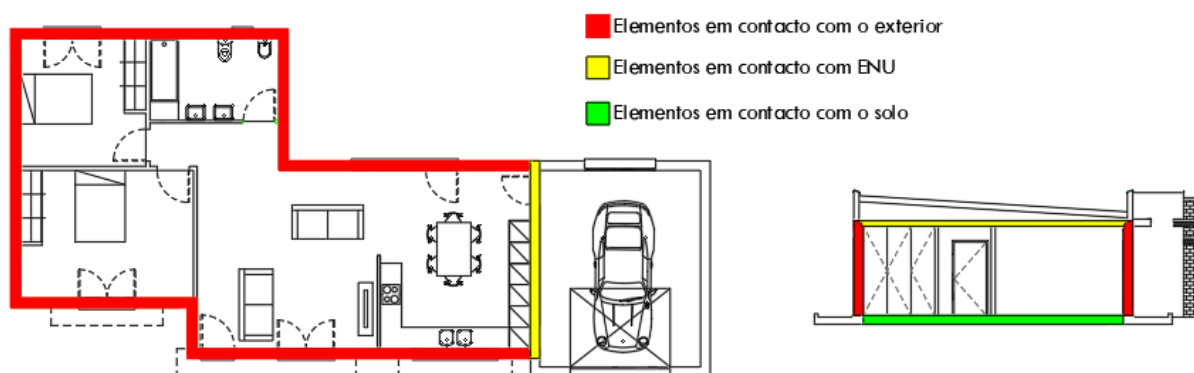


Figura 4.2 – Identificação da envolvente do edifício.

Os levantamentos das áreas das divisões estão dispostos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Levantamento dimensional do edifício.

| Divisão       | Área (m <sup>2</sup> ) | Pé Direito (m) | Volume (m <sup>3</sup> ) |
|---------------|------------------------|----------------|--------------------------|
| Quarto 1      | 12,56                  | 2,50           | 31,40                    |
| W.C           | 8,40                   | 2,50           | 21,00                    |
| Z. circulação | 4,35                   | 2,20           | 9,57                     |
| Quarto 2      | 17,34                  | 2,50           | 43,35                    |
| Sala de estar | 25,58                  | 2,50           | 63,95                    |
| Cozinha       | 21,14                  | 2,50           | 52,85                    |
| TOTAL         | 89,37                  | 2,49           | 222,12                   |

#### 4.1.2.1 Elementos em contacto com o exterior

Os elementos do edifício em contacto direto com o exterior são as paredes e os vãos envidraçados que vão ser descritos de seguida.

##### 4.1.2.1.1 Paredes exteriores

Para as paredes desta moradia foi utilizado o sistema de equivalente a uma “parede dupla com caixa-de-ar”, constituída pelas camadas representadas na Figura 4.3, enumeradas do exterior para o interior.

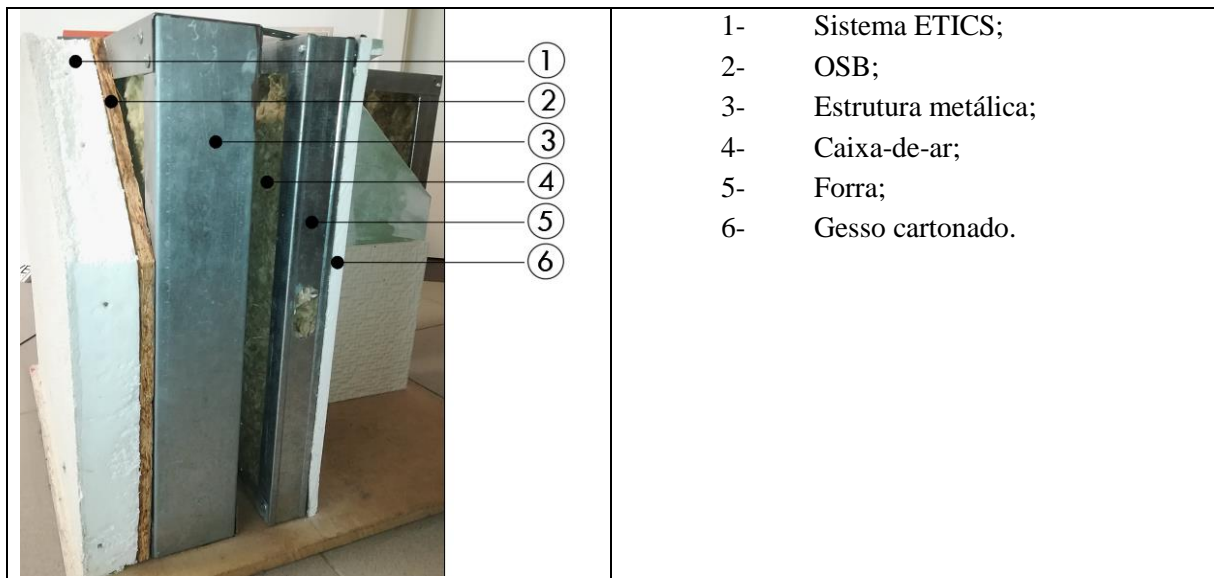


Figura 4.3 – Descrição da parede exterior da habitação em estudo.

Cada camada desta parede tem a sua função e contribui de maneira diferente para o bom funcionamento da estrutura.

O isolamento exterior é dado pelo sistema ETICS, que é composto por placas de poliestireno expandido (EPS) fixas à face exterior das paredes com recurso a colas e fixações mecânicas. Estas placas são depois barradas com uma argamassa, com o objetivo de conferir uma maior resistência à camada e preparar a parede para ser pintada ou receber outro tipo de acabamento.

Esta camada tem uma espessura nominal de 50mm, e apresenta um coeficiente de condutibilidade de  $0.036 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ . Tanto a argamassa de colagem à parede como o barramento exterior oferecem alguma resistência térmica ao edifício, mas por as camadas serem tão finas esses valores serão desprezados para os cálculos sendo, portanto, o valor apresentado apenas referente às placas de EPS.

Como se pode observar, este material tem um coeficiente de condutibilidade muito baixo, que juntando ao facto de ser um isolamento contínuo pelo exterior, vai proporcionar um elevado grau de isolamento térmico, ao mesmo tempo que vai reduzir em grande parte as pontes térmicas criadas pelos perfis metálicos.

A camada exterior de OSB, oferece à estrutura uma maior estabilidade por servir de contraventamento aos perfis metálicos, e resistir às forças horizontais aplicadas à estrutura. Oferece também uma superfície de acabamento liso, de modo que facilita a aplicação do isolamento exterior (ETICS). Nesta obra foram utilizadas placas de classe 3 com 9mm de espessura tendo um  $\lambda$  de  $0.13 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .

A estrutura metálica é o conjunto de perfis que oferece estabilidade à estrutura e que suporta todas as cargas aplicadas. Os canais inferiores são perfis em U com 93mm de largura, 43mm de aba e 1.5mm de espessura. Estes elementos servem como base dos perfis verticais em C, que são aparafusados ao canal com o auxílio de parafusos auto-perfurantes. Estes perfis têm uma largura de 90mm, aba de 43mm e 1.5mm de espessura. As disposições dos elementos metálicos nesta obra vão de encontro aos valores médios recomendados para este tipo de sistema, tendo sido utilizado um espaçamento médio entre montantes de 60cm.

Tal como foi dito anteriormente estes perfis têm muito mau desempenho térmico, com um coeficiente de condutibilidade térmica de aproximadamente  $52 \text{ W/m}^2\text{C}$ , dando origem a pontes térmicas que podem causar deficiências no isolamento do edifício.

Como se pode ver na Figura 4.3, os espaços entre os perfis metálicos são preenchidos por uma camada de lã mineral com 60mm de espessura, e com um coeficiente de condutibilidade de  $0.038 \text{ W/m}^2\text{C}$ . Esta camada, dadas as suas propriedades, tem uma grande contribuição para o isolamento térmico e acústico, pelo que é imprescindível ao sistema.

A caixa-de-ar serve para separar fisicamente a estrutura exterior da estrutura interior, não permitindo a transmissão direta de calor nem de vibrações vindas de fora e contribuindo assim para um melhor comportamento térmico e acústico do sistema. O valor da resistência térmica desta camada, por ser um espaço de ar não ventilado, e sabendo a direção do sentido do fluxo de calor e a espessura do espaçamento, pode ser tirado diretamente da Tabela 4.2, que pode ser consultada no REH.

A solução utilizada na habitação em estudo tem um espaçamento de 60mm vazia, e como se está a avaliar uma parede, temos que a direção do fluxo de calor é horizontal, pelo que retiramos o valor  $R_{ar}$  de  $0.18 \text{ m}^2\text{C/W}$ .

Tabela 4.2 – Resistência térmica de espaços não ventilados (REH).

| Direção e sentido do fluxo de calor | Espessura (mm) | $R_{ar}$ [ $\text{m}^2\text{C/W}$ ] |
|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|
| Horizontal                          | < 5            | 0,00                                |
|                                     | 5              | 0,11                                |
|                                     | 10             | 0,15                                |
|                                     | 15             | 0,17                                |
|                                     | 25 a 300       | 0,18                                |
| Vertical ascendente                 | < 5            | 0,00                                |
|                                     | 5              | 0,11                                |
|                                     | 10             | 0,15                                |
|                                     | 15 a 300       | 0,16                                |
| Vertical descendente                | < 5            | 0,00                                |
|                                     | 5              | 0,11                                |
|                                     | 10             | 0,15                                |
|                                     | 15             | 0,17                                |
|                                     | 25             | 0,19                                |
|                                     | 50             | 0,21                                |
|                                     | 100            | 0,22                                |
| 300                                 | 0,23           |                                     |

Para fins comparativos e introdução de valores no programa THERM, podemos utilizar a expressão (4.1) para obter o valor  $\lambda$  desta camada.

$$R_{ar} = \frac{e}{\lambda} \Rightarrow 0.18 = \frac{0.06}{\lambda} \Rightarrow \lambda \approx 0.33 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} \quad (4.1)$$

A forra tem uma composição muito idêntica à estrutura metálica, mas não tem como objetivo suportar as cargas aplicadas à construção. Esta camada permite ao sistema ter mais uma barreira face às transmissões térmicas e acústicas, não só por acrescentar mais uma camada de isolamento de lã mineral ao sistema, mas também por possibilitar a execução da caixa-de-ar. Os elementos metálicos desta camada têm 1.5mm de espessura e 50mm de largura. Estes elementos podem ser mais estreitos por não contribuírem para a estabilidade global da estrutura. A lã mineral que está a preencher os espaços vazios entre os perfis tem as mesmas características que a camada de preenche a estrutura resistente já descrita, mas com 50mm de espessura.

A última camada da parede é o gesso cartonado, que é utilizado como revestimento interior de paredes e tetos, e que oferece a superfície ideal para receber a pintura ou outro tipo de acabamento. As placas utilizadas têm uma espessura de 12,5mm e uma condutibilidade térmica de 0.250 W/m<sup>°</sup>C. Apesar de comparado com os outros materiais utilizados não ter um coeficiente muito baixo, contribui para a redução de pontes térmicas por ser uma camada contínua.

Em suma, as camadas constituintes da parede exterior do sistema podem ser consultadas na Tabela 4.3. O valor “U” foi calculado pelo programa THERM, obtendo assim um valor mais próximo do real que ao utilizar a expressão (3.2).

Tabela 4.3 – Resumo dos constituintes da parede exterior.

| Parede exterior |                                   |                   |                             |                            |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Material        | $\lambda$<br>(W/m <sup>°</sup> C) | Espessura<br>(mm) | R<br>(m <sup>2</sup> .°C/W) | U<br>(W/m <sup>2</sup> °C) |
| ETICS           | 0,036                             | 50,0              | 1,39                        | 0.28                       |
| OSB             | 0,130                             | 9,0               | 0,07                        |                            |
| Lã mineral      | 0,038                             | 60,0              | 1,76                        |                            |
| Caixa-de-ar     | 0,330                             | 60,0              | 0,18                        |                            |
| Lã mineral      | 0,038                             | 47,0              | 1,32                        |                            |
| Gesso Cartonado | 0,250                             | 12,5              | 0,05                        |                            |
| Espessura Total |                                   | 271,5             |                             |                            |

Em contacto com o exterior existe também uma porta principal com um U de 1.5 W/m<sup>2</sup>°C. Valor que foi retirado das fichas técnicas do produto.

#### 4.1.2.1.2 Vãos envidraçados

Os vãos envidraçados são muito importantes numa avaliação desta espécie por serem um ponto fraco na construção, tanto a nível térmico como acústico. Para ultrapassar este problema, devem de ser usadas soluções adequadas a cada situação. Neste caso optou-se por utilizar janelas de vidro duplo com espessuras de 4mm e 6mm e caixa-de-ar de 20mm com sistema de caixilharia com corte térmico e com um índice de redução sonora  $R_w = 35$  (-1; -5) dB. O vidro tem um controlo solar do tipo Planitherm 4S que baixa a emissividade do vão. Os coeficientes de transmissão térmica e as orientações dos envidraçados estão descritas nas Tabela 4.4 e Tabela 4.5.

Tabela 4.4 – Condubilidade térmica e emissividade dos vãos envidraçados.

| Designação do Tipo de Solução | $U_{\text{wdn}}$ (W/m <sup>2</sup> °C) | $g_{L,vi}$ | $g_{L,T}$ | Fator solar global Prot. Perm. $g_{Tp}$ | Classe da Caixilharia | Tipo de Vidro | Fração Envidraçada $F_g$ |
|-------------------------------|--|------------|-----------|---|-----------------------|---------------|--------------------------|
| VE1                           | 1,71                                   | 0,44       | 0,05      | 0,44                                    | 3                     | Duplo         | 0,70                     |
| VE2                           | 1,55                                   | 0,44       | 0,05      | 0,44                                    | 3                     | Duplo         | 0,70                     |
| VE3                           | 1,84                                   | 0,44       | 0,05      | 0,44                                    | 3                     | Duplo         | 0,70                     |
| VE4                           | 1,93                                   | 0,44       | 0,05      | 0,44                                    | 3                     | Duplo         | 0,70                     |

Tabela 4.5 – Localização, orientação e área dos envidraçados.

| Divisão       | Designação do tipo de solução | Orientação | Área envidraçada (m <sup>2</sup> ) | Permeabilidade da Caixa de Estore |
|---------------|-------------------------------|------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Quarto 1      | VE1                           | Sul        | 3,36                               | Perm. Baixa                       |
| W.C           | VE4                           | Sul        | 1,26                               | Perm. Baixa                       |
| Sala de estar | VE2                           | Sul        | 6,30                               | Perm. Baixa                       |
| Cozinha       | VE3                           | Norte      | 1,70                               | Perm. Baixa                       |
| Sala de estar | VE1                           | Norte      | 3,36                               | Perm. Baixa                       |
| Quarto 2      | VE1                           | Norte      | 3,36                               | Perm. Baixa                       |

O sistema de sombreamento aplicado a esta habitação foi um sistema de estores exterior em alumínio, com régua preta de 42mm, e isolamento térmico em poliuretano. Este sistema oferece um maior controlo da incidência da luz natural no interior da construção, permitindo assim ao utilizador fazer uma gestão mais pessoal da iluminação e climatização do espaço.

Para calcular o fator solar do vão com as proteções completamente ativadas,  $g_T$ , é utilizada a expressão (4.2) dada pelo REH, chegando-se ao valor  $g_T=0,05$ .

$$g_T = g_{+vi} * \prod_i \frac{g_{Tvc}}{0.75} \quad (4.2)$$

Neste ensaio optou-se por manter os estores completamente fechados durante todo o tempo de levantamentos de temperatura pelo que para o cálculo, estas duas soluções vão funcionar como uma só, ficando o valor do fator solar do vidro igual ao dos estores  $g_{L,vi} = g_{L,TP} = g_{L,T} = 0,05$ .

Na vertente da acústica, como os elementos envidraçados são elementos muito condicionantes ao bom comportamento da habitação, o sistema de sombreamento manteve-se aberto durante os ensaios.

#### 4.1.2.2 Cobertura e elementos em contacto com espaços não úteis

Os elementos em contacto com os espaços não úteis nesta habitação são a parede que divide a cozinha da garagem, e o teto falso que separa o espaço útil do edifício com o desvão da cobertura. A parede que separa a cozinha da garagem, com  $12,5\text{m}^2$  de área, é igual à parede exterior, mas com duas camadas de gesso cartonado em vez do sistema ETICS, ficando assim com um  $U$  de  $0,48\text{ W/m}^2\text{°C}$ . Como estas soluções são idênticas, esta não vai ser aqui detalhada novamente. A solução para o teto falso é apresentada na Tabela 4.6 e tem uma área de  $89,37\text{m}^2$ . Para o cálculo do  $U$  desta solução, como este é composto por elementos contínuos, pode ser calculado para o sentido de fluxo de calor ascendente ( $U$  aquecimento) pela expressão (3.2).

Tabela 4.6 – Materiais constituintes do teto falso.

| Compartimentação desvão útil |  |                   |                                  |                         |                                  |
|------------------------------|--|-------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Material                     | $\lambda$<br>( $\text{W/m}^2\text{°C}$ ) | Espessura<br>(mm) | R<br>( $\text{m}^2\text{°C/W}$ ) | Espessura<br>total (mm) | U<br>( $\text{W/m}^2\text{°C}$ ) |
| Lã mineral                   | 0,038                                    | 100               | 2,63                             | 112,5                   | 0,34                             |
| Gesso Cartonado              | 0,25                                     | 12,5              | 0,05                             |                         |                                  |

O valor do coeficiente de redução de perdas para os espaços não úteis,  $b_{tr}$ , por não se ter acesso às temperaturas dos ENU, foi calculado pelo despacho n.º 15793-K/2013, considerando o ENU da garagem fortemente ventilado graças à abertura das janelas e do portão, e o desvão da cobertura fracamente ventilado por não ter qualquer tipo de abertura. Feitas as medições necessárias, chegou-se ao valor de  $b_{tr}=1$  para a garagem e  $b_{tr}=0,8$  para o desvão da cobertura.

Em contacto com o espaço da garagem também existe uma porta de serviço com um  $U$  de  $1,5\text{ W/m}^2\text{°C}$ . Valor que foi retirado das fichas técnicas do produto.

#### 4.1.2.3 Elementos em contacto com o solo

O elemento em contacto com o solo é a laje, com uma camada de isolamento pelo exterior e pavimento flutuante no interior. A Tabela 4.7 descreve os elementos constituintes da laje, tal como os coeficientes de condutibilidade, espessura e resistência térmica de cada camada.



Tabela 4.7 – Constituição da laje.

| Laje térrea         |                      |                   |                             |                         |
|---------------------|----------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Material            | $\lambda$<br>(W/m°C) | Espessura<br>(mm) | R<br>(m <sup>2</sup> .°C/W) | Espessura<br>total (mm) |
| Pavimento flutuante | 0,23                 | 7                 | 0,03                        | 307                     |
| Laje de betão       | 2,00                 | 200               | 0,10                        |                         |
| XPS                 | 0,037                | 100               | 2,70                        |                         |
|                     |                      | $\Sigma$          | 2,83                        |                         |

### 4.1.3 Pontes térmicas lineares

Os coeficientes de transmissão térmica linear  $\Psi$ , podem ser consultados em catálogos de pontes térmicas, nomeadamente o disponibilizado pelo ITeCons, e nas tabelas de valores por defeito do REH como descrito no ponto 3.1.8. No caso do sistema adotado, onde o isolamento é aplicado pelo exterior e no interior das paredes, pode ser considerado misto, mas visto que os coeficientes de transmissão térmica estão muito do lado da segurança para o isolamento repartido, e sendo que este sistema tem pontes térmicas mais baixas do que o tipo de construção para os quais estes valores estão calculados, o isolamento foi considerado pelo exterior das paredes e da laje, não tendo contacto com a caixilharia.

Visto que nem todos os casos estão exatamente descritos no catálogo do ITeCons, e dadas algumas limitações para a aplicação a este sistema construtivo, foram também retirados valores das tabelas do REH, mesmo que estes sejam menos precisos. Ao escolher o tipo de ligação que mais se adapta a cada caso, podemos chegar às pontes térmicas lineares exteriores do edifício apresentadas na Tabela 4.8. As imagens ilustrativas da PTL escolhida do *site* do ITeCons para cada caso estão representadas na Figura 4.4.

Tabela 4.8 – Pontes térmicas lineares exteriores.

| Tipo de ligação                 | Comprimento (m) | $\Psi$ (W/m°C) | Fonte   |
|---------------------------------|-----------------|----------------|---------|
| (1) Fachada com laje            | 40.9            | 0.23           | ITeCons |
| Fachada com teto falso          | 40.9            | 0.19           | REH     |
| Dois paredes em angulo saliente | 10.0            | 0.40           | REH     |
| (2) Fachada com caixilharia     | 33.2            | 0.26           | ITeCons |
| Fachada com caixa de estore     | 10.8            | 0.30           | REH     |



Figura 4.4 – Representação de pontes térmicas lineares escolhidas do catálogo do ITeCons.

Para as pontes interiores, isto é, elementos em contacto com ENU, é utilizado o mesmo método de medição que o anterior, com o isolamento das paredes pelo exterior e sob a laje. Neste caso, como ainda é um caso mais específico, foi mais difícil de encontrar as situações idênticas às situações apresentadas no catálogo do ITeCons, pelo que estes valores foram ambos retirados na tabela do REH. Os valores das PTL para o interior podem ser consultados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Pontes térmicas lineares interiores.

| Tipo de ligação              | Comprimento (m) | $\Psi$ (W/ m <sup>2</sup> C) | Fonte |
|------------------------------|-----------------|------------------------------|-------|
| Fachada com pavimento do ENU | 5.0             | 0.55                         | REH   |
| Fachada com teto falso e ENU | 5.0             | 0.19                         | REH   |

#### 4.1.4 Sistemas técnicos

Os sistemas técnicos são uma vertente muito importante na avaliação energética na medida em que têm um impacto bastante significativo no valor final das necessidades energéticas. De acordo com Santos *et al.*, (2010), ao optar pela utilização de equipamentos com alta eficiência e fontes de energia renováveis, consegue-se reduzir significativamente o consumo energético mantendo o nível de conforto dos ocupantes. No caso em estudo está instalado o sistema VMC, ar condicionado e um kit termossifão 200L.

Como o grau de impermeabilidade ao ar é tão elevado nesta construção, é necessário a utilização de um sistema de renovação de ar forçada, de modo a evitar o aparecimento de patologias relacionadas com o excesso de humidade interior e reduzir o contacto com ar altamente poluído com CO<sub>2</sub>, melhorando assim a saúde dos ocupantes. Neste caso, o ar viciado é retirado da casa de banho e cozinha, e inserido ar novo nos quartos e sala.

O mecanismo usado nesta habitação tem as seguintes características:

- Taxa de renovação de ar máxima de cerca de 165m<sup>3</sup>/h;
- Rendimento do recuperador de calor: 60%;
- Consumo de eletricidade anual: 643.8kWh/ano

Para calcular o número de renovações por hora que este sistema oferece, é necessário calcular o volume do espaço. Como o espaço estudado tem  $89.4\text{m}^2$  de área com um pé direito de  $2.5\text{m}$ , obtém-se um volume de aproximadamente  $222.6\text{m}^3$ . Com este volume e as características apresentadas anteriormente, chega-se a uma taxa de renovação de ar horária  $R_{\text{ph},i}$  de cerca de  $0.74\text{ h}^{-1}$ . Este valor passa o valor recomendado (entre  $0.4\text{ h}^{-1}$  e  $0.6\text{ h}^{-1}$ ) porque o edifício estudado é relativamente pequeno e porque a ventilação ficou ligada na velocidade máxima. Não foi utilizada a velocidade intermédia por não ser especificado na ficha técnica do produto qual o valor da taxa de renovação para esta opção. Esta taxa vai ser inferior quando o espaço for habitado por haver um maior controlo ao ligar e desligar o equipamento conforme as necessidades dos ocupantes.

O sistema de climatização utilizado nesta moradia foi um sistema de ar condicionado que ficou ligado uma parte do tempo do ensaio. Este tipo de aparelho apresenta uma eficiência energética muito elevada e por isso é o dispositivo mais recomendado para o efeito. Neste caso, por a habitação ter um tamanho reduzido, foi instalado apenas um aparelho de AC na zona da sala que serve todo o espaço útil. Este aparelho é de classe A+ e tem para a época de aquecimento um COP de 4.3 e uma potência de  $7\text{kW}$  e para a época de arrefecimento um EER de 3.38 e uma potência de  $8.6\text{kW}$

Para o aquecimento de águas sanitárias, foi aplicado um Kit termossifão de  $200\text{L}$  composto por um termoacumulador e um coletor solar ZHS. Com uma área de  $1.96\text{m}^2$ , este sistema permite produzir  $1086\text{kWh.ano}$ .

## 4.2 Procedimento experimental

O conforto de uma habitação depende essencialmente da qualidade térmica e acústica no interior da mesma. Neste estudo experimental, foram medidos os valores destas duas vertentes de modo a ter uma avaliação precisa e detalhada do comportamento deste sistema de construção. Com os valores obtidos, vai também ser possível fazer uma análise comparativa entre os valores reais obtidos e os valores esperados provenientes da pré certificação energética.

### 4.2.1 Medições térmicas e energéticas

O objetivo deste estudo é analisar quais as variações de temperatura que ocorrem dentro de uma habitação construída com o sistema em LSF, e qual o consumo de eletricidade com que se pode contar para manter uma temperatura confortável no seu interior, que de acordo com o Regulamento dos Edifícios de Habitação, é  $18^\circ\text{C}$ . Para esta análise, durante nove dias foram utilizados dois termómetros colocados em duas divisões da casa, um no quarto (termómetro 1) e o outro na cozinha (termómetro 2) como representado na Figura 4.5.

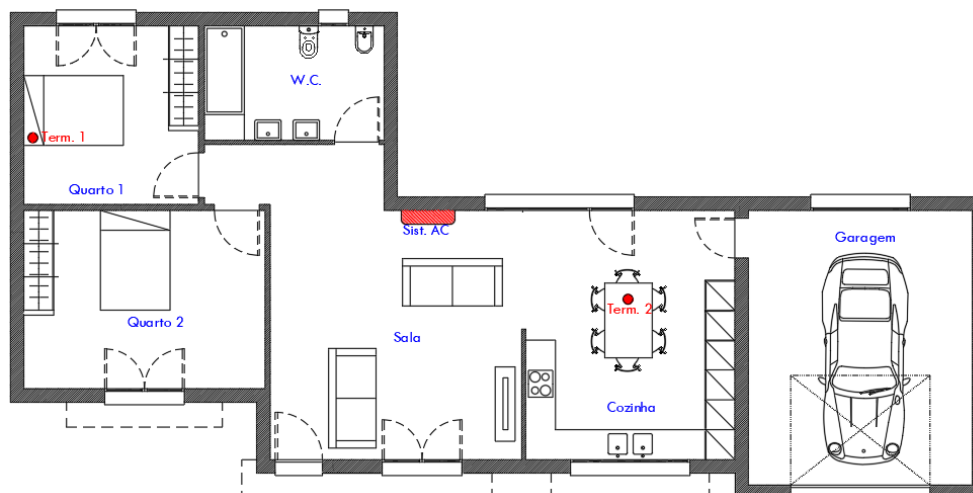


Figura 4.5 – Localização dos termômetros e do sistema AC.

De modo a que se faça uma avaliação ao edifício como um todo, as portas das divisões interiores (Quartos e WC) foram deixadas abertas para que a casa fique toda à mesma temperatura. Como o espaço da garagem é considerado como não útil e não precisa de ser aquecido, esta divisão ficou fechada durante todo o tempo de ensaio. Deste modo, na análise de resultados, o volume interior avaliado vai ser de 222.6 m<sup>3</sup>.

Como já foi dito anteriormente, os estores ficaram sempre fechados durante os nove dias do ensaio, pelo que não se vai contabilizar os ganhos solares pelos envidraçados.

Durante todo o tempo do estudo o edifício não esteve habitado e por isso permaneceu fechado, pelo que não houve qualquer tipo de perda de calor derivado à abertura de portas ou janelas, ou nenhum ganho graças à utilização do edifício. Deste modo, todas as trocas de ar com o exterior são feitas pelo sistema VMC que ficou sempre ligado, com uma taxa de renovação de ar  $R_{ph,i}$  de cerca de 0.74 h<sup>-1</sup>

As temperaturas interiores foram medidas de cinco em cinco minutos com o auxílio dos termômetros posicionados nos locais já descritos, sendo calculada a média horária dos valores obtidos de modo a facilitar a análise. As temperaturas exteriores foram levantadas hora a hora a partir do *site* meteorológico [tempo.pt](http://tempo.pt) (Meteored@2018) para a localização do edifício, na Aldeia dos Anjos. A informação meteorológica apresentada no *site* tem ocasionalmente algumas horas em que não registou temperatura, pelo que para esta análise essas falhas foram preenchidas com a média das temperaturas adjacentes.

O estudo teve a duração de nove dias, sendo que o primeiro, dia zero, não foi contabilizado por ser um dia de estabilização de temperaturas. O sistema de ar condicionado esteve ligado a 18°C

nos quatro dias seguintes, permitindo assim fazer uma avaliação dos consumos que uma habitação deste tipo tem para manter a temperatura de conforto, e desligado nos últimos quatro dias para analisar as variações de temperatura interior em função da temperatura exterior, podendo assim perceber de como este sistema se comporta a nível térmico sem qualquer apoio mecânico. Para um melhor entendimento de todo o procedimento, em seguida estão descritos todos os acontecimentos durante os nove dias da avaliação:

**Dia 0** - Colocação dos termómetros no interior da habitação nos locais já descritos. O sistema de AC e a VMC foram ligados e foi feita uma leitura do contador. Este dia serviu para climatizar todas as divisões da casa de modo a ter uma temperatura interior estável e por isso vai ter um consumo de energia mais elevado que os restantes dias. Por este motivo na análise de resultados vai ser separado dos outros valores obtidos.

**Dia 1** - Após a temperatura interior estabilizar foi feita uma nova leitura do contador. Esta medição serve para separar o primeiro dia dos seguintes, de modo a que seja apenas contabilizada a energia gasta para manter a temperatura interior pretendida.

**Dia 4** - Ao fim de ter o aquecimento ligado estes primeiros quatro dias, foi feita uma nova leitura do contador e desligou-se o AC. Estes últimos dias vão ter um custo de climatização mais reduzido que o primeiro, dado que o funcionamento do equipamento de aquecimento serviu apenas para manter a temperatura interior, não havendo assim custos extras de climatização. Os valores retirados do contador vão servir para na análise de resultados ser comparada a energia gasta durante este ensaio com a estimada pelo REH.

**Dia 8** - Neste último dia do ensaio foi feito o levantamento dos equipamentos. Desde o dia 4 que o AC está desligado, pelo que as variações de temperatura se dão apenas pelas transferências de calor pela envolvente opaca e pelo funcionamento da ventilação mecânica.

Como durante o tempo de ensaio a temperatura média do interior e do exterior não foram as previstas (9.7°C no exterior e 18°C no interior) foi feito um ajuste da altitude do edifício dos 110m para os 325m de modo a que o número de Graus-Dia utilizados no cálculo pelo REH seja equivalente ao valor medido experimentalmente. Deste modo consegue-se obter valores para as mesmas condições.

Os Graus-Dia são calculados de acordo com a equação (4.3), que é a soma da diferença da temperatura média interior ( $T_{int}$ ) para a exterior ( $T_{ext}$ ), multiplicada pelo número de dias da estação de aquecimento ( $d_{aq}$ ).

$$GD = \sum (T_{int} - T_{ext}) * d_{aq} \quad (4.3)$$

### 4.2.2 Medições acústicas

O objetivo deste ensaio é perceber se o sistema avaliado oferece o grau de conforto mínimo exigido pelos utentes, proporcionando assim uma melhoria na sua qualidade vida. Para isso foram efetuadas várias medições acústicas para o isolamento de sons aéreos para a (i) fachada e (ii) entre compartimentos. Estes ensaios foram realizados segundo as normas ISO 16283-1 & 3 seguindo todos os procedimentos descritos no capítulo 3.2.2 de modo a obter resultados o mais fidedignos possível. Os níveis de ruído foram medidos utilizando filtros de banda de 1/3 de oitava, tendo como frequências centrais: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500 e 3150 Hertz

A medição do isolamento a sons aéreos de fachada foi realizada para a parede que separa o quarto 2 do exterior (planta na Figura 4.1). Para este ensaio, sendo que os envidraçados são um elemento que condiciona em grande parte o comportamento do edifício, os estores foram deixados abertos, como se pode observar pela Figura 4.6.



Figura 4.6 – Preparação para realização do ensaio de fachada.

A Figura 4.6 mostra o momento da medição de ruído no exterior da fachada ( $L_{1,2m}$ ) com o microfone a 2m da parede. A fonte de ruído foi ligada e foram feitos 5 registos de ruído com o microfone sempre no mesmo sítio. Para transformar estes 5 registos num só valor para cada frequência, tem de se calcular a média pela expressão (3.5), obtendo assim o nível de ruído médio no exterior da fachada.

Já dentro da habitação, com a fonte ligada no exterior, foi feita a medição de ruído no compartimento recetor (quarto 2). Para este parâmetro foram feitos 5 registos, um para cada posição do microfone como descrito na norma ISO 16283-3 e sempre separados em 0.7m entre posições. Tendo obtido estes resultados, foi adotado o mesmo procedimento que a medição no exterior para o cálculo da média de valores para cada frequência.

Em seguida ainda no quarto 2, mas já com a fonte desligada, fez-se a medição do nível de ruído de fundo. Foram feitos 5 registos e calculados a média pela expressão (3.5) tal como para as medições anteriores. Após obter a média para cada frequência medida, foi feita a correção do nível de ruído medido no compartimento com o ruído de fundo. Esta correção é obtida seguindo os critérios descritos no ponto 3.2.2.

Depois de ter o valor de ruído de fundo da divisão, é necessário medir o tempo de reverberação do compartimento para poder chegar ao nível de isolamento da fachada. Agora com a fonte instalada no quarto 2, como representa a Figura 4.7, foram feitos 6 registos do tempo de reverberação do compartimento. Para calcular a média dos valores medidos, neste caso pode ser aplicado o cálculo da média aritmética para as diferentes frequências.

Com os parâmetros acima descritos medidos, reúnem-se condições para calcular e avaliar o valor do isolamento sonoro padronizado da fachada para cada frequência, que por sua vez, com o auxílio da curva normalizada de referência, chega-se ao valor único do índice de isolamento sonoro aos sons de condução aérea,  $D_{2m,nT,w}$ . Por fim, com este índice calculado, pode ser feita uma verificação se a fachada está ou não a cumprir os requisitos mínimos impostos no Decreto-Lei n.º 96/2008, ponto 1 a) do Artigo 5.º, onde para o índice de isolamento sonoro entre o exterior e um quarto impõe um mínimo de 33 dB.



Figura 4.7 – Preparação para realização da medição do tempo de reverberação.

Passando para o cálculo do isolamento sonoro padronizado entre compartimentos, e tendo já os valores do tempo de reverberação ( $T$ ) e do ruído de fundo ( $L_b$ ) que foram medidos para o ensaio anterior, foram apenas realizadas mais duas medições, a medição do nível de pressão sonora no compartimento emissor ( $L_1$ ), e a medição do nível de pressão sonora no compartimento recetor ( $L_2$ ). A fonte foi colocada no quarto 1 da habitação, passando este a ser o compartimento emissor, e foram medidos os valores de ruído para os dois quartos.

Sendo que, de acordo com a norma ISO 16283-1, o número mínimo de posições da fonte é 2 e do recetor 5, foram feitos 10 registos de pressão sonora em cada quarto, sendo depois calculada a média destes valores pela expressão (3.5), obtendo assim o nível médio de pressão sonora para os quartos. O valor  $L_2$  teve de ser corrigido com o valor do nível de ruído de fundo pelo método já descrito nesta dissertação e já calculado no ensaio de fachada.

Da mesma forma que se utilizou a curva de referência no ensaio da fachada, foi aqui aplicada para calcular o valor único de isolamento sonoro ( $D_{nT,w}$ ) para o elemento de separação dos compartimentos. Atualmente não existe regulamentação nacional que exija um valor mínimo para este parâmetro, mas o valor obtido vai ser comparado com a regulamentação antiga que estabelecia este valor, o Decreto-Lei n.º 251/87, onde no capítulo III, Secção I, Artigo 6.º, indica que o valor mínimo de isolamento sonoro para sons de condução aérea entre quartos do mesmo fogo é 40dB.

Durante a execução do ensaio, foi observado que na instalação de tomadas elétricas houve a falta de cuidado em separar as saídas de modo a que não ficassem coincidentes. A Figura 4.8 ilustra como estas estão aplicadas em obra, em contraste com uma opção que beneficiava o comportamento acústico da parede. Esta falha pode comprometer gravemente o comportamento acústico da compartimentação, na medida em que o isolamento aplicado na parede é cortado de um lado ao outro nesse local (Mateus, 2012).

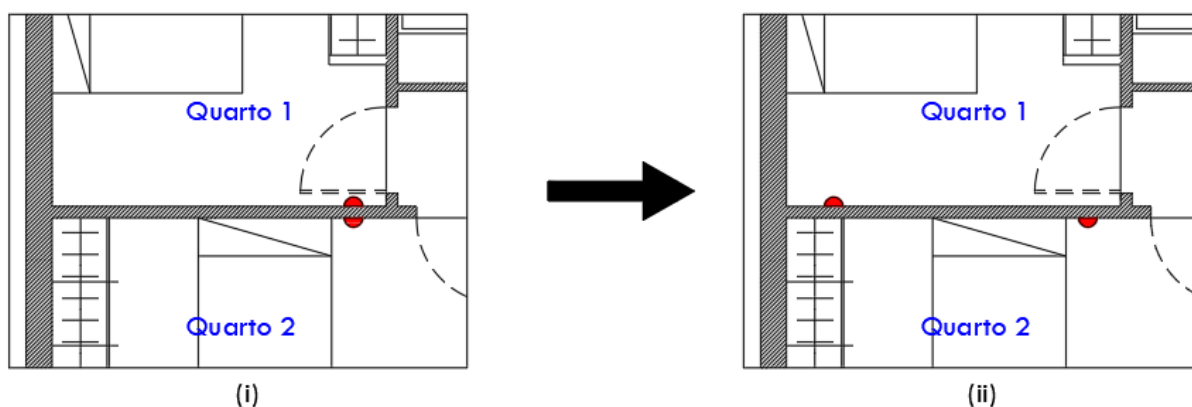


Figura 4.8 – Ilustração do posicionamento de tomadas (i) em obra e (ii) como deveriam ser aplicadas.



## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo vão ser apresentados os resultados obtidos dos ensaios experimentais, bem como um estudo do impacte que certos elementos têm a nível energético no sistema adotado, com o auxílio do programa THERM e a folha de cálculo do ITeCons programada de acordo com o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação.

### 5.1 Medições térmicas e energéticas

Tal como descrito no ponto 4.2.1, a variação da temperatura interior e exterior foi registada hora a hora. Ao comparar as temperaturas interiores e exteriores é possível perceber pela sua oscilação se o edifício tem um bom ou mau isolamento. No Gráfico 5.1 e Gráfico 5.2 podem ser observadas as variações de temperatura no interior face às do exterior, com o aquecimento ligado e desligado respetivamente.

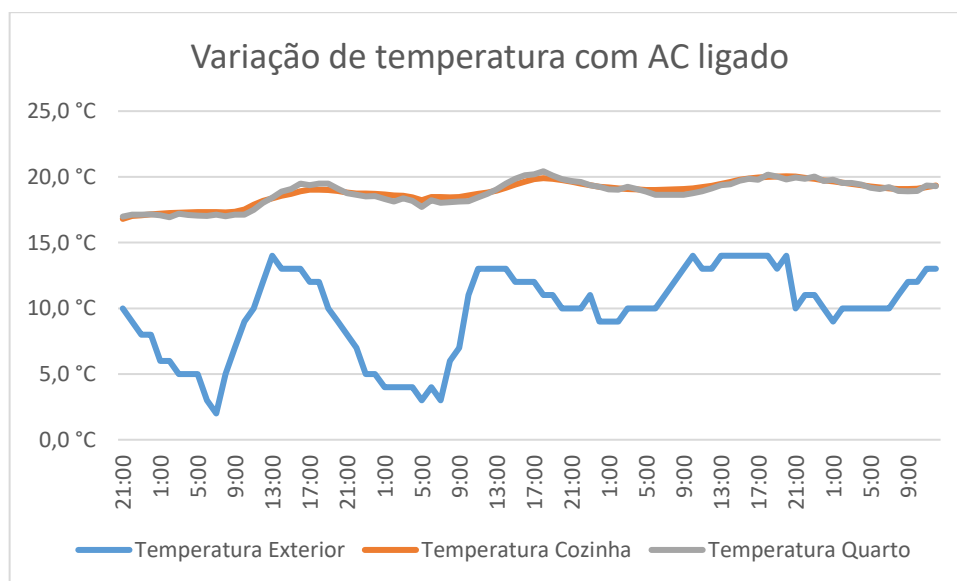


Gráfico 5.1 – Variação de temperatura com AC ligado.

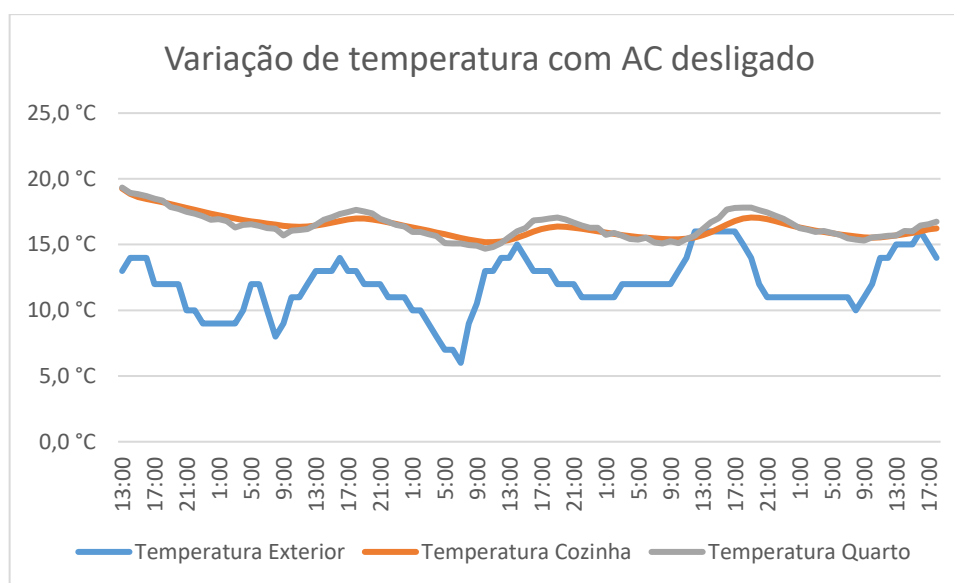


Gráfico 5.2 – Variação de temperatura com AC desligado.

Ao analisar os gráficos das variações de temperatura, verifica-se que os dois termómetros colocados no interior da habitação medem sensivelmente as mesmas temperaturas, pelo que retiramos que a temperatura é uniforme em todo o volume estudado. Quanto à tabela da variação de temperatura com o AC ligado, como o aparelho de ar condicionado se encontra ligado, era esperado que a temperatura tivesse pouca oscilação, aqui a temperatura interior varia entre os 16,8°C e os 20,4°C, enquanto que no exterior vai dos 2°C aos 14°C. Já no Gráfico 5.2, com o AC desligado, verifica-se que a oscilação de temperatura interior se mantém bastante baixa, com uma temperatura interior entre os 14,7°C e 17,8°C e exterior entre 6°C e 16°C. Estes valores podem ser consultados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resumo de temperaturas interiores e exteriores.

|                      | Dia 0   |         | Dia 1   |         | Dia 2   |         | Dia 3   |         | Dia 4   |         |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                      | Mínimo  | Máximo  | Mínimo  | Máximo  | Mínimo  | Máximo  | Mínimo  | Máximo  | Mínimo  | Máximo  |
| Temperatura exterior | 8,0 °C  | 11,0 °C | 2,0 °C  | 14,0 °C | 3,0 °C  | 13,0 °C | 9,0 °C  | 14,0 °C | 9,0 °C  | 14,0 °C |
| Temperatura interior | 16,8 °C | 17,1 °C | 16,9 °C | 19,5 °C | 17,7 °C | 20,4 °C | 18,6 °C | 20,2 °C | 17,1 °C | 19,8 °C |
|                      | Dia 5   |         | Dia 6   |         | Dia 7   |         | Dia 8   |         |         |         |
|                      | Mínimo  | Máximo  | Mínimo  | Máximo  | Mínimo  | Máximo  | Mínimo  | Máximo  |         |         |
| Temperatura exterior | 8,0 °C  | 14,0 °C | 6,0 °C  | 15,0 °C | 11,0 °C | 16,0 °C | 10,0 °C | 16,0 °C |         |         |
| Temperatura interior | 15,7 °C | 17,6 °C | 14,7 °C | 17,1 °C | 15,1 °C | 17,8 °C | 15,3 °C | 16,7 °C |         |         |

Apesar da temperatura exterior do Gráfico 5.2 ter uma menor amplitude comparada com a temperatura exterior do Gráfico 5.1, retiramos que este sistema consegue manter uma temperatura relativamente constante no interior da habitação, mas que não verifica os requisitos

mínimos de conforto para o ser humano sem o recurso a equipamentos de climatização, visto que a temperatura mínima de conforto não foi atingida (18°C).

Passando para a análise energética do edifício, fazendo a leitura do contador elétrico antes e depois do ensaio, foi possível chegar ao consumo médio diário de 9.1 kWh/dia com o sistema de AC e VMC sempre ligado. Como para esta zona o período de aquecimento é de 6.6 meses (ou 200.8 dias), foi feita uma extrapolação, e chegou-se ao valor de 1820.1kWh/ano, que é o valor real de energia necessária para a renovação do ar interior e climatização do espaço à temperatura de 18°C. Como no cálculo da energia necessária para a climatização pelo REH não é contabilizado o valor gasto pela VMC, foi retirada essa parcela ao valor de energia gasta experimentalmente, ficando assim com 1466.7 kWh/ano.

Para ter um valor comparativo, foi efetuado o cálculo do valor estimado para a energia necessária para o aquecimento do edifício durante o mesmo período de 6.6 meses. Recorrendo à folha de cálculo fornecida pelo ITeCons que avalia o desempenho térmico e energético de edifícios de acordo com o REH, chegou-se aos valores da Tabela 5.2. Para os ganhos internos brutos entram apenas os ganhos solares, não sendo contabilizados os ganhos internos derivados do uso da habitação.

Tabela 5.2 – Valores do desempenho térmico calculados pelo REH.

|  |        |                   |
|--|--------|-------------------|
| Ganhos térmicos brutos $Q_{g,i}$   | 238,3  | kWh/ano           |
| Transferência de calor por transmissão e por renovação do ar $Q_{tr,i}+Q_{ve,i}$ | 7590,6 | kWh/ano           |
| Influência da classe de inércia térmica $\alpha$                                 | 2,6    | W <sup>o</sup> /C |

Com estes valores pode ser calculada uma estimativa de energia necessária para climatizar o interior da habitação na estação de aquecimento. O cálculo segue os Despachos n.º 15793/2013, e tem a seguinte ordem:

Primeiro é calculado o fator de utilização dos ganhos  $\eta_i$  pelas expressões (5.1) e (5.2).

$$\gamma_i = \frac{Q_{g,i}}{Q_{tr,i} + Q_{ve,i}} = \frac{238,3}{7590,6} = 0,03 \quad (5.1)$$

$$\eta_i = \frac{1 - \gamma_i^\alpha}{1 - \gamma_i^{\alpha+1}} = \frac{1 - 0,03^{2,6}}{1 - 0,03^{2,6+1}} \cong 1 \quad (5.2)$$

Em seguida, na expressão (5.3), os ganhos térmicos brutos são multiplicados pelo fator  $\eta_i$  obtendo assim o valor dos ganhos totais úteis  $Q_{gu,i}$ .

$$Q_{gu,i} = \eta_i * Q_{g,i} = 238,3kWh/ano \quad (5.3)$$

Por fim, ao valor total das transferências de calor por transmissão e por renovação do ar, retira-se o valor obtido da equação (5.3), obtendo assim as necessidades anuais de climatização para a estação de aquecimento. Como o sistema instalado para climatização do ambiente tem uma eficiência elevada, divide-se este valor pelo coeficiente de desempenho do aparelho, que é 4.3. Assim, o valor calculado da energia necessária para a climatização do espaço é dada pela expressão

$$\frac{7590,6 - 238,3}{4,3} = \frac{7352,3}{4,3} = 1709,8kWh/ano \quad (5.4)$$

Como se pode observar, o valor medido experimentalmente é ligeiramente inferior ao estimado, sendo 86% do valor obtido por cálculo. Para ter uma maior noção de quais são os elementos que entram para o cálculo das necessidades energéticas de aquecimento, pode ser analisado o Gráfico 5.3 que identifica o valor da energia perdida por cada elemento da envolvente do edifício.

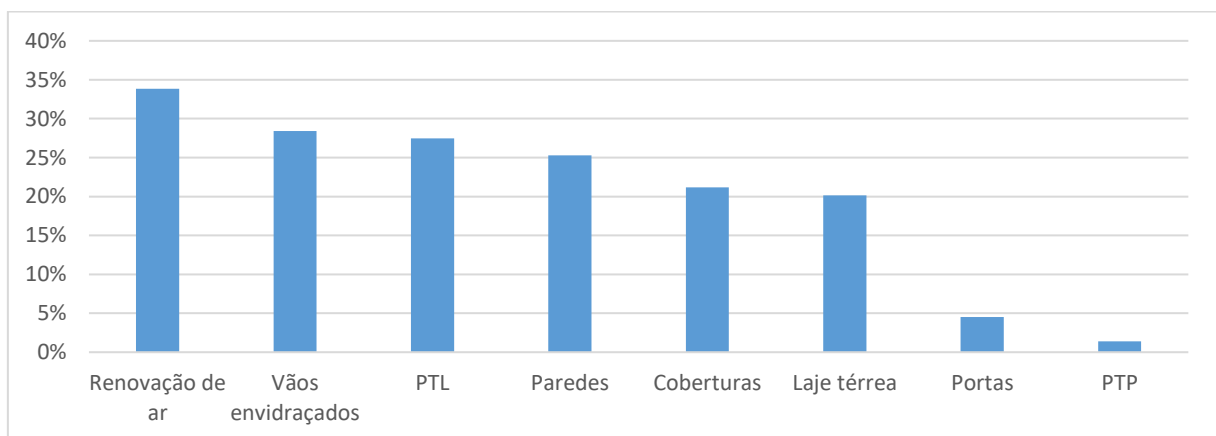


Gráfico 5.3 – Origem dos gastos energéticos por elemento.

Deste gráfico retira-se que os parâmetros contabilizados para o cálculo do valor das necessidades de energia útil para aquecimento são as renovações de ar, os vãos envidraçados, as paredes, a laje térrea, as PTL, a cobertura, as portas e as PTP. Como para este estudo os valores das renovações de ar foram aumentados, e os estores dos vãos envidraçados fechados, é normal que estes parâmetros originem um maior consumo que o normal, pelo que as necessidades elevadas provocadas por estes valores não vão ser aqui discutidas.

As pontes térmicas apresentam um valor bastante elevado. Os valores utilizados para o cálculo, que são apresentados no ponto 4.1.3, foram calculados para edifícios mais tradicionais, constituídos por elementos pesados e com maiores pontes térmicas, pelo que o comportamento

esperado é sensivelmente pior que o real. Este parâmetro ainda tem outro ponto prejudicial a esta comparação, que é o facto de os valores escolhidos para cada PTL já terem um coeficiente de segurança elevado aplicado ao mesmo (eventualmente exagerado no caso do isolamento térmico ser aplicado no interior ou repartido pela envolvente exterior).

A cobertura deveria de ter um menor impacte no resultado final. Para o cálculo foi apenas considerado o valor da resistência térmica do teto falso e a cor da cobertura exterior. Isto porque a distância do elemento de separação à cobertura exterior é superior a 300mm, e por isso, de acordo com o Despacho n.º 15793-K/2013 o desvão da cobertura é contabilizado como espaço não útil. Por esta razão o elemento exterior da cobertura (chapa sandwich) que tem uma resistência térmica bastante elevada, não entra no cálculo.

Por fim as paredes e a laje térrea são responsáveis por uma grande parcela dos gastos energéticos no inverno. Este valor pode ser explicado pela área em contacto com o exterior que estes elementos apresentam em comparação com os restantes.

## 5.2 Medições acústicas

Para a medição do isolamento acústico de fachada e entre compartimentos desta habitação, foram feitas as medições dos parâmetros descritos no capítulo 3.2.2 cumprindo todas as normas aplicadas. Os valores obtidos destas medições vão ser apresentados e avaliados neste capítulo.

### 5.2.1 Isolamento fachada

Para uma avaliação do nível de isolamento a sons aéreos da fachada são precisos de vários parâmetros. Estes são:

- Medição do ruído no exterior da fachada ( $L_{2m,1}$ );
- Medição do ruído no local recetor, neste caso o quarto 2 ( $L_2$ );
- Medição do ruído de fundo do quarto 2 ( $L_b$ );
- Medição do tempo de reverberação no quarto 2 ( $T$ ).

Na avaliação do nível de pressão sonora no exterior da fachada foram feitos 5 registos. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 5.3, juntamente com o valor médio dos ensaios para cada frequência. Como já foi referido, a média destes valores não pode ser obtida com recurso a uma média aritmética, mas sim pela expressão (3.5).

Tabela 5.3 – Resultados obtidos para o nível de pressão sonora no exterior da fachada.

| Níveis de pressão sonora no exterior a 2 m da fachada |                              |      |      |      |      |                        |
|---|------------------------------|------|------|------|------|------------------------|
| Freq. (Hz)  | Nível de pressão sonora (dB) |      |      |      |      | L <sub>2m,1</sub> (dB) |
| 100   | 79,7                         | 79,5 | 79,5 | 80,7 | 81,2 | 80,2                   |
| 125   | 78,4                         | 78,2 | 78,7 | 77,7 | 77,2 | 78,1                   |
| 160   | 88,2                         | 88,4 | 88,5 | 88,3 | 87,9 | 88,3                   |
| 200   | 86,8                         | 87,0 | 87,1 | 87,3 | 87,3 | 87,1                   |
| 250   | 90,6                         | 90,4 | 90,5 | 89,7 | 89,8 | 90,2                   |
| 315   | 88,8                         | 88,8 | 88,9 | 88,4 | 88,4 | 88,7                   |
| 400   | 86,4                         | 86,6 | 86,6 | 85,3 | 85,4 | 86,1                   |
| 500   | 84,6                         | 85,1 | 84,9 | 83,2 | 83,1 | 84,3                   |
| 630   | 81,3                         | 81,6 | 81,4 | 82,2 | 82,2 | 81,8                   |
| 800   | 80,3                         | 80,6 | 80,2 | 79,4 | 79,7 | 80,1                   |
| 1 k   | 78,4                         | 78,4 | 78,6 | 78,7 | 78,2 | 78,5                   |
| 1.25 k  | 76,4                         | 76,5 | 76,2 | 78,8 | 78,6 | 77,5                   |
| 1.6 k   | 75,3                         | 75,2 | 75,4 | 76,3 | 76,4 | 75,8                   |
| 2 k   | 74,8                         | 74,9 | 75,0 | 72,4 | 72,6 | 74,1                   |
| 2.5 k   | 71,9                         | 72,1 | 72,1 | 71,2 | 71,3 | 71,7                   |
| 3.15 k  | 68,7                         | 68,9 | 69,0 | 70,0 | 69,9 | 69,3                   |

A expressão (5.5) exemplifica o cálculo da média de valores para a frequência de 100Hz, sendo que para as restantes o cálculo é feito pelo mesmo processo.

$$L_{2m,1} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_n}{10}} \right) \Rightarrow \quad (5.5)$$

$$\Rightarrow L_{2m,1}^{100Hz} = 10 \log \left( \frac{1}{5} * \left( 10^{\frac{79.7}{10}} + 10^{\frac{79.5}{10}} + 10^{\frac{79.5}{10}} + 10^{\frac{80.7}{10}} + 10^{\frac{81.2}{10}} \right) \right) = 80.2dB$$

Passando para dentro do compartimento recetor (quarto 2), com a fonte de ruído ligada, foram feitos os 5 registos, com o recetor numa posição diferente em cada medição. Obtidos os valores representados na Tabela 5.4, foi calculada a média para cada frequência de acordo com o exemplo anterior, e obtido assim o parâmetro L<sub>2</sub> para cada frequência.

Tabela 5.4 – Resultados obtidos para o nível de pressão sonora no compartimento recetor.

| <b>Níveis de pressão sonora no interior do quarto 2</b> |                              |      |      |      |      |                     |
|---|------------------------------|------|------|------|------|---------------------|
| Freq. (Hz)  | Nível de pressão sonora (dB) |      |      |      |      | L <sub>2</sub> (dB) |
| 100   | 52,8                         | 44,2 | 55,9 | 44,1 | 49,6 | 51,6                |
| 125   | 56,6                         | 48,7 | 61,5 | 55,2 | 52,6 | 56,9                |
| 160   | 70,6                         | 63,1 | 66,2 | 67,2 | 60,5 | 66,8                |
| 200   | 64,2                         | 61,5 | 60,4 | 67,8 | 63,4 | 64,3                |
| 250   | 62,1                         | 57,8 | 60,8 | 61,9 | 61,7 | 61,1                |
| 315   | 55,8                         | 54,3 | 55,8 | 55,8 | 56,1 | 55,6                |
| 400   | 49,6                         | 49,5 | 49,5 | 49,5 | 49,6 | 49,5                |
| 500   | 46,9                         | 44,0 | 46,1 | 45,2 | 45,0 | 45,6                |
| 630   | 42,8                         | 41,3 | 41,2 | 41,0 | 43,1 | 42,0                |
| 800   | 40,3                         | 39,2 | 39,2 | 39,6 | 38,6 | 39,4                |
| 1 k   | 39,8                         | 38,7 | 38,0 | 39,0 | 37,6 | 38,7                |
| 1.25 k  | 38,1                         | 36,8 | 36,7 | 37,0 | 35,5 | 36,9                |
| 1.6 k   | 37,7                         | 36,0 | 35,0 | 35,7 | 34,9 | 36,0                |
| 2 k   | 38,0                         | 35,0 | 34,3 | 33,2 | 32,9 | 35,1                |
| 2.5 k   | 35,2                         | 30,7 | 30,7 | 30,5 | 30,3 | 32,0                |
| 3.15 k  | 30,0                         | 24,3 | 25,5 | 23,5 | 22,8 | 26,1                |

A medição do nível de ruído de fundo tem o mesmo procedimento que a medição do nível de pressão sonora do compartimento, sendo os valores obtidos apresentados na Tabela 5.5. Este valor é necessário à possível correção do nível de pressão sonora medido no quarto 2. Na Tabela 5.7 pode-se observar que a diferença entre o valor L<sub>2</sub> e L<sub>b</sub> é sempre superior a 10, pelo que não há lugar a qualquer correção.

Tabela 5.5 – Resultados obtidos para o nível de ruído de fundo no compartimento recetor.

| <b>Níveis de ruído de fundo no interior do quarto 2</b> |                     |      |      |      |      |                     |
|---|---------------------|------|------|------|------|---------------------|
| Freq. (Hz)  | Nível de ruído (dB) |      |      |      |      | L <sub>b</sub> (dB) |
| 100   | 41,7                | 41,3 | 41,9 | 41,5 | 41,7 | 41,6                |
| 125   | 31,5                | 30,9 | 36,4 | 37,1 | 36,3 | 35,2                |
| 160   | 35,0                | 34,3 | 35,5 | 36,6 | 35,8 | 35,5                |
| 200   | 28,9                | 29,4 | 29,6 | 29,4 | 29,0 | 29,3                |
| 250   | 24,6                | 24,6 | 23,2 | 23,3 | 23,6 | 23,9                |
| 315   | 27,2                | 27,3 | 27,8 | 27,4 | 27,2 | 27,4                |
| 400   | 23,5                | 23,8 | 25,4 | 25,3 | 25,0 | 24,7                |
| 500   | 17,8                | 17,7 | 18,1 | 18,4 | 17,9 | 18,0                |
| 630   | 18,1                | 18,3 | 18,5 | 18,1 | 17,9 | 18,2                |
| 800   | 18,6                | 20,2 | 18,5 | 18,3 | 18,3 | 18,8                |
| 1 k   | 17,9                | 19,4 | 17,1 | 17,4 | 16,9 | 17,8                |
| 1.25 k  | 18,0                | 20,2 | 16,5 | 17,0 | 16,3 | 17,9                |
| 1.6 k   | 18,5                | 18,8 | 15,9 | 16,2 | 15,7 | 17,2                |
| 2 k   | 15,8                | 14,7 | 14,4 | 14,1 | 13,4 | 14,6                |
| 2.5 k   | 13,4                | 13,2 | 13,6 | 13,2 | 13,2 | 13,3                |
| 3.15 k  | 12,4                | 12,4 | 12,8 | 12,2 | 12,7 | 12,5                |

Passando a fonte de ruído para o compartimento recetor, foi medido o tempo de reverberação do quarto 2. Os procedimentos adotados foram os descritos no ponto 4.2.2, sendo os valores

obtidos apresentados na Tabela 5.6. Para chegar à média deste parâmetro basta calcular a média aritmética dos valores recolhidos.

Tabela 5.6 – Resultados obtidos para o tempo de reverberação no compartimento recetor.

| Tempos de reverberação no interior do quarto 2 |                           |      |      |      |      |      |       |
|--|---------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| Freq. (Hz)                                     | Tempo de reverberação (s) |      |      |      |      |      | T (s) |
| 100  | 0,50                      | 0,57 | 0,74 | 0,66 | 0,50 | 0,48 | 0,58  |
| 125  | 0,95                      | 0,90 | 0,95 | 0,96 | 0,96 | 0,95 | 0,95  |
| 160  | 0,49                      | 1,07 | 1,09 | 0,87 | 0,49 | 1,38 | 0,90  |
| 200  | 1,78                      | 0,57 | 1,40 | 1,27 | 1,23 | 0,60 | 1,14  |
| 250  | 0,83                      | 1,52 | 1,27 | 1,56 | 2,08 | 1,30 | 1,43  |
| 315  | 1,17                      | 1,18 | 0,57 | 1,28 | 1,59 | 1,19 | 1,16  |
| 400  | 1,45                      | 1,21 | 1,29 | 1,29 | 0,77 | 1,27 | 1,21  |
| 500  | 1,17                      | 1,22 | 1,17 | 1,10 | 0,82 | 0,56 | 1,01  |
| 630  | 0,73                      | 0,93 | 0,82 | 0,87 | 0,68 | 0,94 | 0,83  |
| 800  | 1,03                      | 1,08 | 1,26 | 1,12 | 1,05 | 1,37 | 1,15  |
| 1 k  | 1,32                      | 1,56 | 1,55 | 1,50 | 1,35 | 1,35 | 1,44  |
| 1.25 k   | 1,56                      | 1,60 | 1,50 | 1,55 | 1,50 | 1,50 | 1,54  |
| 1.6 k  | 1,51                      | 1,61 | 1,37 | 1,52 | 1,43 | 1,57 | 1,50  |
| 2 k  | 1,46                      | 1,39 | 1,38 | 1,43 | 1,27 | 1,45 | 1,40  |
| 2.5 k  | 1,19                      | 1,29 | 1,16 | 1,37 | 1,05 | 1,22 | 1,21  |
| 3.15 k   | 1,07                      | 1,14 | 1,11 | 1,11 | 1,02 | 1,08 | 1,09  |

Tendo os parâmetros acima descritos calculados, reúnem-se condições para calcular o valor do isolamento sonoro padronizado da fachada ( $D_{2m,nT}$ ), valor este que é obtido pela aplicação da expressão (3.6) descrita no ponto 3.2.2.1. Os valores de  $D_{2m,nT}$  podem ser consultados na Tabela 5.7.



Tabela 5.7 – Cálculo do valor  $D_{2m,nT}$ 

| Freq. (Hz) | $L_{2m,1}$ (dB) | $L_2$ (dB) | $L_b$ (dB) | $L_2 - L_b$ (dB) | $L'_2$ (dB) | T (s) | $D_{2m,nT}$ (dB) |
|------------|-----------------|------------|------------|------------------|-------------|-------|------------------|
| 100        | 80,2            | 51,6       | 41,6       | 10,0             | 51,6        | 0,6   | 29,2             |
| 125        | 78,1            | 56,9       | 35,2       | 21,8             | 56,9        | 0,9   | 23,9             |
| 160        | 88,3            | 66,8       | 35,5       | 31,3             | 66,8        | 0,9   | 24,0             |
| 200        | 87,1            | 64,3       | 29,3       | 35,0             | 64,3        | 1,1   | 26,4             |
| 250        | 90,2            | 61,1       | 23,9       | 37,2             | 61,1        | 1,4   | 33,7             |
| 315        | 88,7            | 55,6       | 27,4       | 28,2             | 55,6        | 1,2   | 36,7             |
| 400        | 86,1            | 49,5       | 24,7       | 24,9             | 49,5        | 1,2   | 40,4             |
| 500        | 84,3            | 45,6       | 18,0       | 27,6             | 45,6        | 1,0   | 41,7             |
| 630        | 81,8            | 42,0       | 18,2       | 23,8             | 42,0        | 0,8   | 42,0             |
| 800        | 80,1            | 39,4       | 18,8       | 20,6             | 39,4        | 1,2   | 44,3             |
| 1 k        | 78,5            | 38,7       | 17,8       | 20,9             | 38,7        | 1,4   | 44,4             |
| 1.25 k     | 77,5            | 36,9       | 17,9       | 19,0             | 36,9        | 1,5   | 45,4             |
| 1.6 k      | 75,8            | 36,0       | 17,2       | 18,8             | 36,0        | 1,5   | 44,5             |
| 2 k        | 74,1            | 35,1       | 14,6       | 20,6             | 35,1        | 1,4   | 43,4             |
| 2.5 k      | 71,7            | 32,0       | 13,3       | 18,6             | 32,0        | 1,2   | 43,6             |
| 3.15 k     | 69,3            | 26,1       | 12,5       | 13,6             | 26,1        | 1,1   | 46,6             |

Por fim, para poder fazer uma avaliação se o valor do isolamento da parede cumpre os requisitos mínimos, é necessário calcular o valor único do índice de isolamento sonoro ( $D_{2m,nT,w}$ ). Para isso foi utilizada a curva de referência como explicado no ponto 3.2.2.3 chegando assim ao valor de 42dB, que é o valor da curva de referência ajustada em 10dB correspondente aos 500Hz. Os valores utilizados para este cálculo podem ser consultados na Tabela 5.8 juntamente com os valores de C e Ctr.

Tabela 5.8 – Cálculo do valor  $D_{2m,nT,w}$  (C,Ctr).

| Freq. (Hz) | Curva ref. | Curva ref. - 10 | $D_{2m,nT}$ | Dif. de valores | Curva C | Curva Ctr | Calc. C | Calc. Ctr |
|------------|------------|-----------------|-------------|-----------------|---------|-----------|---------|-----------|
| 100        | 33         | 23              | 29,2        | -6,2            | -29,0   | -20,0     | 1,5E-06 | 1,2E-05   |
| 125        | 36         | 26              | 23,9        | 2,1             | -26,0   | -20,0     | 1,0E-05 | 4,1E-05   |
| 160        | 39         | 29              | 24,0        | 5,0             | -23,0   | -18,0     | 2,0E-05 | 6,3E-05   |
| 200        | 42         | 32              | 26,4        | 5,6             | -21,0   | -16,0     | 1,8E-05 | 5,7E-05   |
| 250        | 45         | 35              | 33,7        | 1,3             | -19,0   | -15,0     | 5,4E-06 | 1,4E-05   |
| 315        | 48         | 38              | 36,7        | 1,3             | -17,0   | -14,0     | 4,2E-06 | 8,5E-06   |
| 400        | 51         | 41              | 40,4        | 0,6             | -15,0   | -13,0     | 2,9E-06 | 4,6E-06   |
| 500        | 52         | 42              | 41,7        | 0,3             | -13,0   | -12,0     | 3,4E-06 | 4,2E-06   |
| 630        | 53         | 43              | 42,0        | 1,0             | -12,0   | -11,0     | 4,0E-06 | 5,0E-06   |
| 800        | 54         | 44              | 44,3        | -0,3            | -11,0   | -9,0      | 3,0E-06 | 4,7E-06   |
| 1 k        | 55         | 45              | 44,4        | 0,6             | -10,0   | -8,0      | 3,7E-06 | 5,8E-06   |
| 1.25 k     | 56         | 46              | 45,4        | 0,6             | -9,0    | -9,0      | 3,6E-06 | 3,6E-06   |
| 1.6 k      | 56         | 46              | 44,5        | 1,5             | -9,0    | -10,0     | 4,4E-06 | 3,5E-06   |
| 2 k        | 56         | 46              | 43,4        | 2,6             | -9,0    | -11,0     | 5,7E-06 | 3,6E-06   |
| 2.5 k      | 56         | 46              | 43,6        | 2,4             | -9,0    | -13,0     | 5,5E-06 | 2,2E-06   |
| 3.15 k     | 56         | 46              | 46,6        | -0,6            | -9,0    | -15,0     | 2,7E-06 | 6,9E-07   |
|            |            |                 | $\Sigma$    | 24,7            |         | $\Sigma$  | -2,0    | -6,0      |

Com este valor, reúnem-se agora condições para poder avaliar o comportamento da parede de fachada em relação ao isolamento aos sons aéreos. O Artigo 5.º do Decreto-Lei n.º 96/2008 refere que o índice de isolamento a sons de condução aérea,  $D_{2m,nT,w}$ , que separa o exterior do edifício e os quartos deve de satisfazer a condição  $D_{2m,nT,w} \geq 33$  dB. Visto que o obtido,  $D_{2m,nT,w} = 42(-2;-6)$  dB, é muito superior ao mínimo estabelecido, podemos concluir que a fachada tem muito bom comportamento aos sons aéreos vindos do exterior.

## 5.2.2 Isolamento entre compartimentos

A análise de isolamento a sons aéreos entre compartimentos foi feita entre os quartos 1 e 2, sendo o primeiro o compartimento emissor, e o segundo o recetor. Como já se tem o valor para o ruído de fundo e tempo de reverberação do quarto 2, basta agora fazer a medição do nível de pressão sonora no quarto 1 e 2 com a fonte ligada no primeiro. As medições foram feitas do mesmo modo que nos ensaios anteriores, com a diferença que entre quartos o regulamento indica que no mínimo têm de ser feitos 10 ensaios (2 posições de fonte, cada uma para 5 posições do microfone). Os resultados obtidos para o nível de pressão sonora no compartimento emissor e recetor, juntamente com a média dos mesmos, são apresentados nas Tabela 5.9 e Tabela 5.10 respetivamente.

Tabela 5.9 – Resultados obtidos para o nível de pressão sonora no compartimento emissor.

| Níveis de pressão sonora no interior do quarto poente (Quarto 1) |                              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |            |
|--|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
| Freq. (Hz)   | Nível de pressão sonora (dB) |      |      |      |      |      |      |      |      |      | $L_1$ (dB) |
| 100  | 73,4                         | 73,3 | 81,4 | 81,2 | 81,2 | 77,7 | 76,9 | 72,7 | 71,8 | 80,9 | 78,5       |
| 125  | 84,4                         | 83,7 | 88,7 | 88,3 | 88,9 | 83,8 | 83,6 | 81,3 | 81,6 | 87,7 | 86,1       |
| 160  | 84,0                         | 84,4 | 92,5 | 92,7 | 92,7 | 87,6 | 87,8 | 89,5 | 89,7 | 92,4 | 90,3       |
| 200  | 94,8                         | 94,5 | 90,0 | 89,5 | 89,8 | 90,8 | 90,6 | 94,8 | 94,2 | 91,6 | 92,6       |
| 250  | 90,2                         | 89,7 | 92,4 | 91,7 | 92,2 | 88,3 | 87,9 | 91,5 | 91,2 | 91,2 | 90,9       |
| 315  | 89,8                         | 90,0 | 91,8 | 91,5 | 91,9 | 91,7 | 91,7 | 88,4 | 88,0 | 92,2 | 90,9       |
| 400  | 86,6                         | 86,2 | 87,3 | 87,0 | 87,3 | 90,1 | 89,7 | 89,1 | 88,8 | 85,1 | 88,0       |
| 500  | 82,9                         | 82,2 | 85,2 | 85,1 | 85,3 | 88,9 | 89,1 | 86,0 | 86,3 | 86,3 | 86,2       |
| 630  | 84,8                         | 84,8 | 87,8 | 87,7 | 87,8 | 87,3 | 87,5 | 87,0 | 87,1 | 87,8 | 87,1       |
| 800  | 86,5                         | 86,5 | 85,1 | 85,1 | 85,0 | 85,2 | 85,2 | 85,2 | 84,9 | 85,4 | 85,4       |
| 1 k  | 85,7                         | 85,4 | 86,2 | 85,9 | 86,3 | 87,9 | 88,2 | 87,2 | 87,4 | 86,4 | 86,8       |
| 1.25 k   | 85,7                         | 85,6 | 86,1 | 86,1 | 86,1 | 84,8 | 84,9 | 86,0 | 86,1 | 85,8 | 85,7       |
| 1.6 k  | 86,9                         | 87,2 | 86,2 | 86,3 | 86,2 | 88,0 | 88,0 | 87,6 | 87,7 | 86,3 | 87,1       |
| 2 k  | 81,9                         | 81,8 | 81,7 | 81,6 | 81,7 | 83,1 | 83,0 | 81,3 | 81,3 | 82,2 | 82,0       |
| 2.5 k  | 79,7                         | 79,7 | 80,8 | 80,7 | 80,7 | 80,0 | 80,1 | 82,0 | 81,9 | 81,9 | 80,8       |
| 3.15 k   | 79,0                         | 79,1 | 78,8 | 79,0 | 78,8 | 79,7 | 79,7 | 80,7 | 80,5 | 78,5 | 79,4       |

Tabela 5.10 – Resultados obtidos para o nível de pressão sonora no compartimento recetor.

| Níveis de pressão sonora no interior do quarto poente (Quarto 1) |                              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                     |
|--|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------------|
| Freq. (Hz)   | Nível de pressão sonora (dB) |      |      |      |      |      |      |      |      |      | L <sub>2</sub> (dB) |
| 100  | 67,2                         | 67,5 | 63,2 | 62,9 | 56,1 | 64,5 | 65,8 | 61,0 | 60,7 | 65,9 | 64,5                |
| 125  | 71,6                         | 72,2 | 70,9 | 71,1 | 66,4 | 69,7 | 71,7 | 69,2 | 69,4 | 71,6 | 70,7                |
| 160  | 74,4                         | 74,2 | 71,9 | 72,3 | 69,3 | 72,6 | 73,3 | 70,8 | 71,1 | 73,2 | 72,6                |
| 200  | 70,8                         | 71,7 | 68,4 | 68,0 | 69,3 | 70,1 | 70,2 | 68,9 | 68,7 | 70,3 | 69,8                |
| 250  | 63,5                         | 64,1 | 69,0 | 68,5 | 63,8 | 63,7 | 66,8 | 67,1 | 66,8 | 67,2 | 66,5                |
| 315  | 60,6                         | 60,6 | 60,3 | 60,2 | 61,1 | 60,9 | 60,4 | 60,7 | 60,7 | 60,5 | 60,6                |
| 400  | 57,8                         | 58,1 | 56,5 | 56,2 | 56,4 | 57,2 | 57,3 | 56,4 | 56,3 | 57,4 | 57,0                |
| 500  | 53,2                         | 53,9 | 53,7 | 53,7 | 54,5 | 53,9 | 53,8 | 54,1 | 54,1 | 53,8 | 53,9                |
| 630  | 49,5                         | 49,3 | 52,5 | 52,5 | 52,2 | 51,0 | 51,2 | 52,3 | 52,3 | 51,2 | 51,5                |
| 800  | 48,9                         | 49,1 | 51,3 | 51,3 | 54,8 | 52,8 | 50,4 | 53,4 | 53,4 | 50,3 | 52,0                |
| 1 k  | 48,5                         | 48,8 | 49,5 | 49,5 | 49,7 | 49,1 | 49,2 | 49,6 | 49,6 | 49,2 | 49,3                |
| 1.25 k   | 49,3                         | 49,4 | 48,8 | 48,8 | 50,0 | 49,6 | 49,1 | 49,4 | 49,5 | 49,1 | 49,3                |
| 1.6 k  | 48,8                         | 48,7 | 48,8 | 48,8 | 49,8 | 49,3 | 48,7 | 49,3 | 49,3 | 48,8 | 49,0                |
| 2 k  | 44,9                         | 45,0 | 45,3 | 45,1 | 45,9 | 45,4 | 45,1 | 45,6 | 45,5 | 45,2 | 45,3                |
| 2.5 k  | 48,2                         | 48,3 | 48,6 | 48,7 | 49,1 | 48,7 | 48,5 | 48,9 | 48,9 | 48,5 | 48,6                |
| 3.15 k   | 46,0                         | 45,7 | 46,7 | 46,9 | 47,1 | 46,6 | 46,4 | 46,9 | 47,0 | 46,2 | 46,6                |

Feitas as medições necessárias, pode-se calcular o valor de isolamento que a parede entre os compartimentos oferece para cada frequência. Estes valores podem ser consultados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Cálculo do valor D<sub>nT</sub>.

| Freq. (Hz) | L <sub>2m,1</sub> (dB) | L <sub>2</sub> (dB) | L <sub>b</sub> (dB) | L <sub>2</sub> - L <sub>b</sub> (dB) | L' <sub>2</sub> (dB) | T (s) | D <sub>nT</sub> (dB) |
|------------|------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------|-------|----------------------|
| 100        | 78,5                   | 64,5                | 38,6                | 25,9                                 | 64,5                 | 0,58  | 14,6                 |
| 125        | 86,1                   | 70,7                | 32,1                | 38,5                                 | 70,7                 | 0,95  | 18,2                 |
| 160        | 90,3                   | 72,6                | 32,5                | 40,1                                 | 72,6                 | 0,90  | 20,3                 |
| 200        | 92,6                   | 69,8                | 26,3                | 43,5                                 | 69,8                 | 1,14  | 26,4                 |
| 250        | 90,9                   | 66,5                | 20,9                | 45,6                                 | 66,5                 | 1,43  | 28,9                 |
| 315        | 90,9                   | 60,6                | 24,4                | 36,2                                 | 60,6                 | 1,16  | 34,0                 |
| 400        | 88,0                   | 57,0                | 21,7                | 35,3                                 | 57,0                 | 1,21  | 34,8                 |
| 500        | 86,2                   | 53,9                | 15,0                | 38,9                                 | 53,9                 | 1,01  | 35,4                 |
| 630        | 87,1                   | 51,5                | 15,2                | 36,4                                 | 51,5                 | 0,83  | 37,7                 |
| 800        | 85,4                   | 52,0                | 15,8                | 36,1                                 | 52,0                 | 1,15  | 37,1                 |
| 1 k        | 86,8                   | 49,3                | 14,8                | 34,5                                 | 49,3                 | 1,44  | 42,1                 |
| 1.25 k     | 85,7                   | 49,3                | 14,8                | 34,5                                 | 49,3                 | 1,54  | 41,3                 |
| 1.6 k      | 87,1                   | 49,0                | 14,2                | 34,8                                 | 49,0                 | 1,50  | 42,8                 |
| 2 k        | 82,0                   | 45,3                | 11,5                | 33,8                                 | 45,3                 | 1,40  | 41,2                 |
| 2.5 k      | 80,8                   | 48,6                | 10,3                | 38,3                                 | 48,6                 | 1,21  | 36,0                 |
| 3.15 k     | 79,4                   | 46,6                | 9,5                 | 37,1                                 | 46,6                 | 1,09  | 36,2                 |

Com os valores de D<sub>nT</sub> para cada frequência calculados, reúnem-se agora condições para calcular o valor do índice de isolamento sonoro único para a parede entre os quartos estudados. Tal como para o índice de isolamento para a fachada, este valor é o correspondente ao valor da

curva de referência ajustada para a frequência de 500 Hz. Estes valores são apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Cálculo do valor  $D_{nT,w}$  (C,Ctr).

| Freq. (Hz) | Curva ref. | Curva ref. - 15 | $D_{nT}$ | Dif. de valores | Curva C | Curva Ctr | Calc. C | Calc. Ctr |
|------------|------------|-----------------|----------|-----------------|---------|-----------|---------|-----------|
| 100        | 33         | 18              | 14,6     | 3,4             | -29,0   | -20,0     | 4,4E-05 | 3,5E-04   |
| 125        | 36         | 21              | 18,2     | 2,8             | -26,0   | -20,0     | 3,8E-05 | 1,5E-04   |
| 160        | 39         | 24              | 20,3     | 3,7             | -23,0   | -18,0     | 4,7E-05 | 1,5E-04   |
| 200        | 42         | 27              | 26,4     | 0,6             | -21,0   | -16,0     | 1,8E-05 | 5,8E-05   |
| 250        | 45         | 30              | 28,9     | 1,1             | -19,0   | -15,0     | 1,6E-05 | 4,0E-05   |
| 315        | 48         | 33              | 34,0     | -1,0            | -17,0   | -14,0     | 8,0E-06 | 1,6E-05   |
| 400        | 51         | 36              | 34,8     | 1,2             | -15,0   | -13,0     | 1,0E-05 | 1,6E-05   |
| 500        | 52         | 37              | 35,4     | 1,6             | -13,0   | -12,0     | 1,5E-05 | 1,8E-05   |
| 630        | 53         | 38              | 37,7     | 0,3             | -12,0   | -11,0     | 1,1E-05 | 1,3E-05   |
| 800        | 54         | 39              | 37,1     | 1,9             | -11,0   | -9,0      | 1,5E-05 | 2,5E-05   |
| 1 k        | 55         | 40              | 42,1     | -2,1            | -10,0   | -8,0      | 6,2E-06 | 9,9E-06   |
| 1.25 k     | 56         | 41              | 41,3     | -0,3            | -9,0    | -9,0      | 9,3E-06 | 9,3E-06   |
| 1.6 k      | 56         | 41              | 42,8     | -1,8            | -9,0    | -10,0     | 6,6E-06 | 5,2E-06   |
| 2 k        | 56         | 41              | 41,2     | -0,2            | -9,0    | -11,0     | 9,7E-06 | 6,1E-06   |
| 2.5 k      | 56         | 41              | 36,0     | 5,0             | -9,0    | -13,0     | 3,1E-05 | 1,2E-05   |
| 3.15 k     | 56         | 41              | 36,2     | 4,8             | -9,0    | -15,0     | 3,0E-05 | 7,5E-06   |
|            |            |                 | $\Sigma$ | 26,3            |         | $\Sigma$  | -2,0    | -6,0      |

Como referido anteriormente, atualmente a legislação nacional não apresenta requisitos de isolamento entre compartimentos do mesmo fogo, sendo a única imposição exigida para este caso encontrada no DL n.º 251/87, com o valor  $D_{nT,w} \geq 40$  dB. Nesta medição experimental foi obtido o valor de  $D_{nT,w} = 37(-2;-6)$  dB, pelo que se o decreto-lei ainda se mantivesse em vigor, esta solução não seria a mais adequada.

Tal como abordado no ponto 4.2.2 desta dissertação, uma das razões para que este valor tenha ficado abaixo do esperado foi o incorreto posicionamento das tomadas nos quartos, causando assim uma grande quebra ao isolamento. Fica para um trabalho futuro o estudo da mesma solução com uma aplicação mais cuidada destes elementos.

### 5.3 Estudo paramétrico

Neste subcapítulo vai ser avaliada qual a importância que certos elementos construtivos têm no comportamento energético final do edifício. Com o auxílio da folha de cálculo do desempenho energético de edifícios, programada de acordo com o REH pelo ITeCons, vão ser calculados os valores das necessidades energéticas do edifício em estudo para as condições normais de avaliação, e em seguida vão ser feitas algumas alterações a certos parâmetros de modo a perceber que impacte estas diferenças teriam no desempenho energético final da habitação.

Para este estudo foram feitas algumas alterações ao documento utilizado para a análise energética descrita no ponto 5.1. Em primeiro lugar, a altitude do edifício foi reposta dos 325m para o valor real, 110m. Os dispositivos de sombreamento, que no estudo anterior permaneceram sempre fechados, foram considerados abertos para esta análise, pelo que o valor do fator solar dos envidraçados passa de  $g_{L,vi} = g_{L,tp} = g_{L,T} = 0.05$  para  $g_{L,vi} = g_{L,tp} = 0.44$  e  $g_{L,T} = 0.05$ . Por fim, como numa utilização normal do edifício o sistema de ventilação não está sempre ligado na velocidade máxima, foi alterado o valor do caudal nominal do sistema VMC de  $165\text{m}^3/\text{h}$  para  $78\text{m}^3/\text{h}$  (ficando assim com um  $R_{ph}$  de  $0.4\text{ h}^{-1}$ ). Com estas alterações feitas, chega-se aos valores da Tabela 5.13, fornecidos pela folha de cálculo do ITeCons, que representam os gastos previstos para a habitação em condições normais.

Tabela 5.13 – Parâmetros energéticos referentes ao edifício em estudo.

| $N_{ic}$                  | $N_{vc}$                  | $Q_a$    | $N_{tc}$                                 | $N_t$                                    | $N_{tc}/N_t$ | Classe |
|---------------------------|---------------------------|----------|--|--|--------------|--------|
| kWh/(m <sup>2</sup> .ano) | kWh/(m <sup>2</sup> .ano) | kWh/ano) | kWh <sub>EP</sub> /(m <sup>2</sup> .ano) | kWh <sub>EP</sub> /(m <sup>2</sup> .ano) |              |        |
| 23.55                     | 6.13                      | 1783,00  | 50.21                                    | 110.08                                   | 0.46         | A      |

Onde:

$N_{ic}$  – Necessidades nominais de energia útil para aquecimento;

$N_{vc}$  – Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento;

$Q_a$  – Necessidades de energia útil para preparação de AQS;

$N_{tc}$  – Necessidades nominais globais anuais de energia primária;

$N_t$  – Valor máximo das necessidades nominais anuais de energia primária.

O primeiro parâmetro a ser estudado vai ser a influência que os ganhos solares têm nos valores finais para as necessidades energéticas do edifício. Numa primeira fase foi alterado o valor do fator solar dos envidraçados de  $g_{L,vi} = g_{L,tp} = 0.44$  para  $g_{L,vi} = g_{L,tp} = 0.05$ , simulando assim que os estores estão sempre fechados, e noutra análise alterou-se os valores de  $g_{L,vi}$  e  $g_{L,tp}$  para 0.75, valor de referência para uma solução de vidro duplo incolor. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Parâmetros energéticos relativos a ganhos solares.

|                    | $N_{ic}$                  | $N_{vc}$ | $N_{tc}$                                 | $N_t$  | $N_{tc}/N_t$ | Classe |
|--------------------|---------------------------|----------|--|--------|--------------|--------|
|                    | kWh/(m <sup>2</sup> .ano) |          | kWh <sub>EP</sub> /(m <sup>2</sup> .ano) |        |              |        |
| Situação base      | 23.55                     | 6.13     | 50.21                                    | 110.08 | 0.46         | A      |
| Estores fechados   | 38.03                     | 2.80     | 56.17                                    | 110.08 | 0.52         | B      |
| Fator solar a 0.75 | 16.17                     | 9.46     | 48.38                                    | 110.08 | 0.44         | A      |

Pela análise da tabela anterior, chega-se à conclusão que ao ter sempre os estores fechados, vai-se gastar mais 62% de energia na época de aquecimento e menos 46% na de arrefecimento para a climatização do espaço, acabando por ter um aumento nas necessidades globais anuais de energia. O inverso acontece quando se aumenta o fator solar do vidro para 0.75, verificando assim uma diminuição das necessidades energéticas.

De seguida, foram alterados os valores das pontes térmicas lineares exteriores e interiores do edifício. Numa primeira etapa, foram alteradas as PTL, considerando a aplicação do isolamento misto (repartido pela caixa de ar e pelo exterior), obtendo os valores que podem ser consultados na Tabela 5.15. Tal como no ponto 4.1.3, dado que alguns casos não estão descritos no catálogo fornecido pelo ITeCons, ou não se podem aplicar à solução adotada, foi também consultada a tabela de valores por defeito do REH, mesmo que estes tenham um fator de segurança maior. Numa segunda etapa, as PTL foram completamente eliminadas. A Tabela 5.16 mostra os valores retirados destes ensaios.

Tabela 5.15 – Pontes térmicas lineares exteriores e interiores.

| Tipo de ligação                 | Comprimento (m) | $\Psi$ (W/ m <sup>2</sup> C) | Fonte   |
|---------------------------------|-----------------|------------------------------|---------|
| Fachada com laje                | 40.9            | 0.50                         | ITeCons |
| Fachada com teto falso          | 40.9            | 0.75                         | REH     |
| Duas paredes em angulo saliente | 10.0            | 0.50                         | REH     |
| Fachada com caixilharia         | 33.2            | 0.11                         | ITeCons |
| Fachada com caixa de estore     | 10.8            | 0.30                         | REH     |
| Fachada com pavimento do ENU    | 5.0             | 0.75                         | REH     |
| Fachada com teto falso e ENU    | 5.0             | 0.75                         | REH     |

Tabela 5.16 – Parâmetros energéticos relativos a PTL.

|                        | $N_{ic}$                  | $N_{vc}$ | $N_{tc}$                                 | $N_t$  | $N_{tc}/N_t$ | Classe |
|------------------------|---------------------------|----------|--|--------|--------------|--------|
|                        | kWh/(m <sup>2</sup> .ano) |          | kWh <sub>EP</sub> /(m <sup>2</sup> .ano) |        |              |        |
| Situação base          | 23.55                     | 6.13     | 50.21                                    | 110.08 | 0.46         | A      |
| PTL c/isolamento misto | 34.67                     | 4.65     | 55.59                                    | 110.08 | 0.50         | A      |
| Sem PTL                | 15.36                     | 7.79     | 46.68                                    | 110.08 | 0.42         | A      |

Ao analisar a tabela podemos verificar que ao considerar o isolamento misto, as necessidades energéticas globais aumentam significativamente (9%), resultado este que demonstra que o isolamento pelo exterior é mais eficiente que o isolamento na caixa-de-ar. Ao considerar as PTL nulas, obtém-se uma redução de cerca 8% das necessidades globais do edifício.

Para perceber o impacto que o aço e as camadas de isolamento têm no sistema, além da solução base aplicada no edifício, foram calculados dos coeficientes de transmissão térmica (U) para a parede sem o aço, para a parede sem a camada de isolamento exterior (ETICS), para a parede sem o isolamento exterior nem o aço, para a parede sem a camada interior de lã mineral e ainda para a parede com o dobro da espessura do isolamento exterior. Estes valores foram calculados com recurso ao programa THERM e estão apresentados na Figura 5.1.

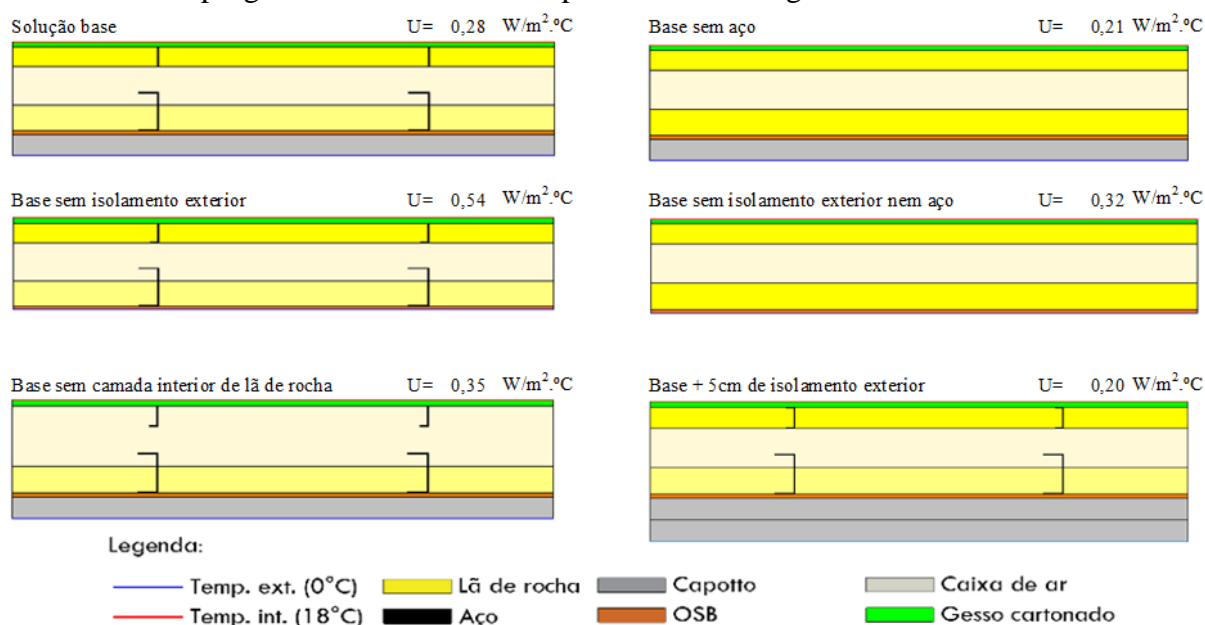


Figura 5.1 – Valores U das várias soluções analisadas.

Ao analisar as primeiras quatro soluções descritas na Figura 5.1 pode ser avaliado mais precisamente o quão prejudicial são os perfis para o coeficiente de transmissão térmica final do sistema. A solução base do sistema tem um  $U=0.28\text{W/m}^2\text{°C}$ , enquanto que a solução sem o aço tem um valor 33% mais baixo, com um  $U=0.21\text{W/m}^2\text{°C}$ . Já na solução sem o isolamento exterior o impacto é maior, a diferença do elemento com aço ( $U=0.54\text{W/m}^2\text{°C}$ ) para o elemento sem aço ( $U=0.32\text{W/m}^2\text{°C}$ ) é cerca de 69%. Esta diferença (33% para 69%) pode ser explicada pela importância que um isolamento contínuo pelo exterior tem no sistema, permitindo assim mitigar grande parte das pontes térmicas.

As duas últimas soluções servem para avaliar o impacto que uma camada de isolamento interior tem face ao impacto causado por uma camada de isolamento exterior. Ao retirar a camada de lã

de rocha do sistema, observa-se uma redução de 20% no valor do coeficiente de transmissão térmica (de  $U=0.28\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$  para  $U=0.35\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ ), enquanto que ao acrescentar a camada de isolamento exterior obtém-se um incremento do valor  $U$  de cerca de 40% (de  $U=0.28\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$  para  $U=0.20\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ ), ou seja, o dobro do impacte que a camada interior. É de notar que apesar das resistências térmicas do sistema de isolamento exterior e o interior serem muito idênticas, há uma grande discrepância no valor de  $U$  final, isto acontece porque o sistema ETICS é contínuo, enquanto que o interior é interrompido pelos perfis, o que cria pontos frágeis no isolamento.

Com estes valores calculados, pode ser feita a análise do efeito que algumas destas alterações podem ter no comportamento energético do edifício. Apesar do valor do coeficiente de transmissão térmica da parede sem isolamento exterior não cumprir o mínimo exigido ( $0.50\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ ), vai ser feito cálculo das necessidades energéticas para este caso. Não foi calculado os valores das necessidades energéticas para as soluções sem o aço por estas soluções terem valores de  $U$  muito semelhantes a outras soluções apresentadas, e por isso irem obter valores equivalentes. Os valores obtidos desta análise são apresentados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Parâmetros energéticos relativos a camadas de isolamento.

|  | $N_{ic}$                  | $N_{vc}$ | $N_{ic}$                                 | $N_t$  | $N_{ic}/N_t$ | Classe |
|--|---------------------------|----------|--|--------|--------------|--------|
|  | kWh/(m <sup>2</sup> .ano) |          | kWh <sub>EP</sub> /(m <sup>2</sup> .ano) |        |              |        |
| Situação base                          | 23.55                     | 6.13     | 50.21                                    | 110.08 | 0.46         | A      |
| Paredes sem isolamento exterior        | 29.88                     | 6.00     | 53.80                                    | 110.08 | 0.49         | A      |
| Parede menos 5cm de lã                 | 25.22                     | 6.09     | 51.16                                    | 110.08 | 0.46         | A      |
| Parede mais 5cm de isolamento exterior | 21.68                     | 6.18     | 49.16                                    | 110.08 | 0.45         | A      |

Desta tabela verifica-se que a maior diferença de valores se dá quando se retira o isolamento exterior, que é um isolamento contínuo, enquanto que ao retirar a camada interior de lã mineral, tem-se um impacte muito menos significativo, que significa que esta última camada pode ser dispensada do sistema no que toca ao isolamento térmico. Ao adicionar mais uma camada de isolamento exterior, as necessidades energéticas do edifício diminuem, mas tal como na alteração da lã mineral, não causa grande impacte no comportamento final do sistema.

Para perceber a influência da ventilação e qual a diferença entre a utilização da ventilação mecânica ou natural, foi feita uma análise para cada uma dessas situações. Para a ventilação mecânica simulou-se um aumento do número de renovações por hora de 0.4 para 0.6 e 0.8, e ainda se testou quais as diferenças entre ter a recuperação de calor (RC) ligada ou desligada. Para avaliar a eficiência da ventilação natural, retirou-se o sistema VMC e calculou-se as necessidades energéticas para uma taxa  $R_{ph}$  de 0.4, 0.6 e 0.8 recorrendo a grelhas auto



reguláveis a 2 Pa. Os resultados obtidos para a ventilação mecânica e natural podem ser encontrados nas tabelas Tabela 5.18 e Tabela 5.19 respetivamente.

Tabela 5.18 – Parâmetros energéticos para ventilação mecânica.

|                     | $N_{ic}$                  | $N_{vc}$ | $N_{tc}$                                 | $N_t$  | $N_{tc}/N_t$ | Classe |
|---------------------|---------------------------|----------|--|--------|--------------|--------|
|                     | kWh/(m <sup>2</sup> .ano) |          | kWh <sub>EP</sub> /(m <sup>2</sup> .ano) |        |              |        |
| Base (rph=0.4)      | 23.55                     | 6.13     | 50.21                                    | 110.08 | 0.46         | A      |
| VMC (rph=0.6)       | 25.98                     | 5.82     | 58.02                                    | 112.23 | 0.52         | B      |
| VMC (rph=0.8)       | 28.41                     | 5.23     | 65.32                                    | 112.23 | 0.58         | B      |
| VMC s/RC (rph=0.43) | 28.50                     | 6.13     | 54.12                                    | 110.69 | 0,49         | A      |

Tabela 5.19 – Parâmetros energéticos para ventilação natural.

|                  | $N_{ic}$                  | $N_{vc}$ | $N_{tc}$                                 | $N_t$  | $N_{tc}/N_t$ | Classe |
|------------------|---------------------------|----------|--|--------|--------------|--------|
|                  | kWh/(m <sup>2</sup> .ano) |          | kWh <sub>EP</sub> /(m <sup>2</sup> .ano) |        |              |        |
| Base (rph=0.4)   | 23.55                     | 6.13     | 50.21                                    | 110.08 | 0.46         | A      |
| Grelha (rph=0.4) | 27.76                     | 6.13     | 41.19                                    | 110.03 | 0,37         | A      |
| Gelha (rph=0.6)  | 32.25                     | 5.83     | 43.58                                    | 112.23 | 0,39         | A      |
| Grelha (rph=0.8) | 36.72                     | 5.23     | 45.74                                    | 112.23 | 0.41         | A      |

Pela análise dos valores obtidos nas tabelas anteriores, podemos concluir que a melhor situação a nível de consumos energéticos se dá com o uso de ventilação natural, com um  $R_{ph}$  de 0.4, graças à utilização de grelhas auto-reguláveis a 2Pa, que originam uma renovação de aproximadamente 153m<sup>3</sup>/h.

Como era de esperar, ao aumentar o número de renovações por hora as necessidades energéticas aumentam. Numa comparação entre a ventilação mecânica com a natural, verifica-se que para os parâmetros de climatização do espaço, utilizando o mesmo  $R_{ph}$ , com a ventilação mecânica há menos consumo de energia para o aquecimento do espaço, mas que para as necessidades nominais globais anuais de energia primária a ventilação natural é mais vantajosa. Estas diferenças podem ser explicadas porque a VMC utiliza o sistema de recuperação de calor no verão, que por si só já ajuda na climatização do espaço, mas ao estar ligada tem um consumo energético horário que entra para o cálculo das necessidades.

Por fim foi estudado qual o impacto dos sistemas técnicos no edifício. A primeira alteração à solução base foi acrescentar aos chuveiros e sistemas de duche um certificado de eficiência hídrica com rótulo A, que são equipamentos que permitem reduzir na quantidade de água gasta sem diminuir o conforto oferecido pelos equipamentos. A outra alteração foi ver quais são as diferenças nos consumos energéticos ao retirar todos os sistemas técnicos do edifício. Os resultados destes testes são fornecidos na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 – Parâmetros energéticos para sistemas técnicos.

|   | $N_{ic}$                  | $N_{vc}$ | $Q_a$    | $N_{tc}$                                 | $N_t$  | $N_{tc}/N_t$ | Classe |
|---|---------------------------|----------|----------|--|--------|--------------|--------|
|   | kWh/(m <sup>2</sup> .ano) |          | kWh/ano) | kWh <sub>EP</sub> /(m <sup>2</sup> .ano) |        |              |        |
| Situação base                           | 23.55                     | 6.13     | 1783,00  | 50.21                                    | 110.08 | 0.46         | A      |
| Base c/eficiência hídrica nas torneiras | 23.55                     | 6.13     | 1605.00  | 44.96                                    | 110.08 | 0.41         | A      |
| Base sem sistemas técnicos              | 23.55                     | 6.13     | 1783.00  | 127.94                                   | 233.86 | 0.55         | B      |

Pela tabela anterior percebe-se que ao utilizar sistemas com certificação hídrica é possível reduzir de forma muito significativa as necessidades nominais anuais de energia. De todas as soluções aqui descritas, esta é a solução mais facilmente implementável e que oferece uma maior redução de consumo energético. Ao retirar os sistemas técnicos do edifício, e admitindo que a climatização do espaço se dá a 100% por resistências elétricas, obtém-se um consumo final muito superior, resultado que era espectral.

A Tabela 5.21 ordena as opções que apresentam um impacto na situação base superior a 10% (do maior impacto para o menor).

Tabela 5.21 – Parâmetros com mais influência no consumo final.

|                            | $N_{tc}$                                 | Necessidades energéticas |
|----------------------------|--|--------------------------|
|                            | kWh <sub>EP</sub> /(m <sup>2</sup> .ano) |                          |
| Situação base              | 50.21                                    | -                        |
| Base sem sistemas técnicos | 127.94                                   | +154%                    |
| VMC (rph=0.8)              | 65.32                                    | +30%                     |
| Grelha (rph=0.4)           | 41.19                                    | -22%                     |
| VMC (rph=0.6)              | 58.02                                    | +16%                     |
| Grelha (rph=0.6)           | 43.58                                    | -15%                     |
| Estores fechados           | 56.17                                    | +12%                     |
| Eficiência nas torneiras   | 44.96                                    | -12%                     |
| Grelha (rph=0.8)           | 45.74                                    | -10%                     |

Em suma, pode-se concluir que todos os parâmetros aqui apresentados têm alguma influência no resultado final dos consumos energéticos da habitação. Dos parâmetros aqui expostos, os que mais impacte têm no consumo energético final são o tipo de ventilação e os sistemas técnicos implementados, sendo a ventilação natural e a eficiência energética das torneiras as medidas mais facilmente aplicáveis e que têm um maior benefício.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

A presente dissertação focou-se na avaliação do desempenho térmico e acústico proporcionado por uma habitação do tipo construção em aço leve (*Lightweight Steel Framing*). Para o efeito, foram realizados ensaios *in situ* para estas duas vertentes e analisados os valores obtidos. Foi igualmente realizado um cálculo energético com base no Regulamento de Desempenho Energético de Habitação (REH) e comparados os resultados previstos com os resultados dos ensaios. Com base ainda no cálculo energético através do REH foi ainda realizado um estudo paramétrico, onde se avaliou a influência dos principais elementos construtivos e instalações técnicas do edifício no seu comportamento energético final.

Para a avaliação térmica e energética, foram registadas as temperaturas interiores do caso de estudo (edifício não habitado), as temperaturas exteriores e os consumos energéticos dos sistemas técnicos. Foram realizadas medições sempre com o sistema de ventilação mecânica em funcionamento, mas para duas situações distintas de climatização: com e sem o funcionamento do ar condicionado. Para além da comparação destes resultados com os resultados previstos, estas duas situações de climatização permitiram verificar que a variação da temperatura interior face à exterior, não é muito acentuada.

Da comparação entre resultados previstos e experimentais verifica-se que o consumo elétrico real para satisfação das necessidades de aquecimento é de 86% do consumo estimado, a partir do cálculo através da metodologia prevista no REH. Por outro lado, também é possível verificar que os chamados pontos fracos deste sistema construtivo (baixa inércia térmica e pontes térmicas originadas pelo uso do aço) acabam por não ser muito penalizadores, em particular se for aplicado isolamento térmico pelo exterior ao nível da envolvente exterior. Mesmo com uma inércia limitada e sem ganhos térmicos (com as proteções solares exteriores 100% ativadas), e com o sistema de climatização desligado, foi possível atingir temperaturas interiores relativamente estáveis, a variar entre 14.7°C e 17.8°C, quando no exterior as temperaturas variaram entre os 6°C e os 16°C. Apesar destas temperaturas interiores se situarem um pouco abaixo da temperatura de conforto (considerada de 18°C), é possível atingir os níveis de conforto térmico com baixos consumos energéticos, graças ao elevado desempenho energético do edifício em estudo (soluções construtivas e sistemas técnicos utilizados).

Com base na metodologia prevista no REH foi ainda realizado um estudo paramétrico, onde foram calculadas as necessidades energéticas do edifício fazendo variar os elementos construtivos e sistemas técnicos mais relevantes, nomeadamente os envidraçados, as pontes térmicas lineares, a espessura e localização do isolamento térmico, o sistema de ventilação, o

sistema de climatização e a eficiência hídrica. Este tipo de avaliação permite perceber quais os impactos que estas alterações têm no comportamento global do edifício e quais as alterações que têm mais influência nos gastos energéticos do edifício. Verificou-se que as alterações que provocam um maior impacto nas necessidades energéticas são o tipo de ventilação e sistemas técnicos adotados. De todas as soluções estudadas, as que ofereceram uma maior redução nas necessidades nominais de energia foram a utilização da ventilação natural, com um  $R_{ph}$  de  $0.4 \text{ h}^{-1}$ , que oferece uma redução de 22%, e a utilização de aparelhos de eficiência hídrica nas torneiras, que possibilita uma poupança de 12% da energia final consumida.

Para a avaliação acústica foram efetuados ensaios de avaliação de isolamento a sons aéreos entre compartimentos do edifício e de avaliação de isolamento de fachada. Estas medições foram realizadas *in situ*, através das metodologias previstas respetivamente nas normas ISO 16283-1 e ISO 16283-3.

Na avaliação de isolamento de fachada, que corresponde à única situação atualmente com requisito regulamentar, de acordo com o Decreto-Lei nº 96/2008, obteve-se um índice de isolamento sonoro  $D_{2m,nT,w}=42 \text{ dB}$ , para a fachada principal do quarto aparentemente mais desfavorável, que corresponde a um valor significativamente acima do valor mínimo exigido (33 dB). No caso da avaliação de isolamento entre compartimentos o valor do índice de isolamento sonoro  $D_{nT,w}$ , obtido entre quartos adjacentes, foi de 37 dB. Para este tipo de separação não existe atualmente requisito regulamentar, mas segundo o antigo regulamento aprovado pela DL 251/87, este valor está abaixo do valor mínimo exigido (40 dB, para um parâmetro diferente, mas com valor próximo do atual  $D_{nT,w}$ ). É de salientar que durante este último ensaio foi encontrado um ponto fraco no elemento de separação que prejudica o comportamento final da solução, que corresponde ao alinhamento de tomadas a par de ambos os lados da divisória. Sem este ponto fraco seria de esperar um índice de isolamento superior ao obtido através da divisória corrente em edifícios de construção tradicional (parede de alvenaria de tijolo de 11 cm rebocada).

## 6.2 Trabalhos futuros

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento no comportamento deste sistema de construção em aço leve será interessante fazer uma análise térmica e energética do mesmo âmbito, mas para a época de arrefecimento, em particular para localizações mais desfavoráveis, nomeadamente na zona climática V3.

Uma vez que não existem valores propostos para os coeficientes de transmissão térmica das pontes térmicas lineares para este tipo de construção leve, seria também interessante elaborar

um estudo detalhado destes coeficientes, por exemplo, através do método dos elementos finitos, com a apresentação de um catálogo detalhado de pontes térmicas lineares. Este tipo de catálogo seria extremamente importante na avaliação “prática” da eficiência energética de edifícios, quer em fase de projeto (na pré-certificação energética), quer após a construção dos edifícios (na certificação energética).

Para além da avaliação energética a partir da metodologia simplificada prevista no REH, efetuada neste trabalho, seria também importante obter resultados através de metodologias mais rigorosas, com base na simulação dinâmica do edifício (por exemplo com o DesignBuilder), e compará-los, quer com os do REH, quer sobretudo com resultados experimentais obtidos para diferentes cenários climatéricos.

No condicionamento acústico, e uma vez que não existem muitos resultados divulgados, obtidos em obra, para a construção leve, seria importante uma avaliação experimental, *in situ*, mais exaustiva, quer para diferentes tipos de elementos de separação, quer para diferentes formas de execução, abrangendo situações com os chamados pontos fracos de isolamento, que em ensaios laboratoriais não existem, mas infelizmente são comuns em obra.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afonso, Ana R. P.** - Pontes térmicas: perdas térmicas lineares, valores por defeito. Tese de Mestrado Integrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- APFAC@2015** - ETICS - Manual de Aplicação. Consultado em: 17 Março de 2018. Disponível em <http://www.apfac.pt/uploads/documentos/APFAC-MANUAL-DE-APLICACAO-ETICS-2015-LQ.pdf>.
- Brüel & Kjør** - Environmental Noise, 2001.
- Certificadoenergético@2012** - Certificados Energéticos em Portugal. Consultado em: 2 Maio de 2018. Disponível em <http://xn--certificadoenergético-q2b.pt>.
- COM (2016) 860 final** - Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu, ao Comité das Regiões e ao Banco Europeu de Investimento - Energias limpas para todos os europeus, Bruxelas, 30.11.2016.
- Decreto-Lei nº 251/87** - Diário da República nº 142/1987, Série I de 1987-06-24.
- Decreto-Lei nº 80/2006** - Diário da República nº 67/2006, Série I-A de 2006-04-04. Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).
- Decreto-Lei nº 96/2008** - Diário da República, 1ª série – Nº 110 - 9 de Junho de 2008.
- Despachos nº 15793/2013** - Diário da República, 2.a série – Nº 234 - 3 de dezembro de 2013.
- Diretiva 2010/31/UE** - Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010. Jornal Oficial da União Europeia.
- Diretiva 2012/27/UE** - Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de outubro de 2012. Jornal Oficial da União Europeia.
- Diretiva 2018/844** - Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018. Jornal Oficial da União Europeia.
- Ferreira, Marta S. M.** - O sistema construtivo com estrutura leve em aço. Tese de mestrado integrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, 2014
- Fibrosom@2018** - Fibrosom Isolamentos. Disponível em [fibrosom.com/ficheiros/pdfs/LadeRocha.pdf](http://fibrosom.com/ficheiros/pdfs/LadeRocha.pdf).
- Friess, Wilhelm A.; Rakhshan, Kambiz** - A review of passive envelope measures for improved building energy efficiency in the UAE. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017.
- Futureng@2018** - Dimensões dos perfis estruturais. Consultado em: 12 Abril de 2018. Disponível em <http://www.futureng.pt/dimensoes-dos-perfis-estruturais>.
- Futureng@2018** - Lã mineral. Consultado em: 25 Maio de 2018. Disponível em <http://www.futureng.pt/la-mineral>.
- Futureng@2018** - ETICS. Consultado em: 13 Abril de 2018. Disponível em <http://www.futureng.pt/ETICS>.

- Futureng@2018** - Placas de Gesso Laminado. Consultado em: 2 abril, 2018. Disponível em <http://www.futureng.pt/gesso-laminado>.
- Gervásio, Helena M.** - Análise de ciclo-de-vida de casas em madeira, ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 2013.
- Gomes, Eduardo L. B.** - Projeto de Térmica: Aplicação do Novo Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação Novos. Tese de mestrado. Instituto de Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- Grubb, P. J.; Gorgolewski, M. T.; Lawson, R. M.** - Light Steel Framing in Residential Construction. SCI Publication 301. Steel Construction Institute, 2001.
- Henriques, J.; Rosa N.; Gervásio H.; Santos P.; Simões da Silva, L.** - Structural performance of light steel framing panels using screw connections subjected to lateral loading. Thin-Walled Structures, 2017.
- Isolani, P.; Comini, R.; Clement, F.; Puente, F.; Orlandi, A.; Oliveira, I.** - Eficiência energética nos edifícios residenciais. Intelligent Energy, 2008.
- JULAR@2018** - Construção em madeira. Consultado em: 18 Abril de 2018. Disponível em [jular.pt](http://jular.pt).
- Leal, Rúben A.** - Construção modular em LSF – Estudo do comportamento térmico passivo. Tese de mestrado integrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, 2015.
- Martins, C.; Santos, P.; Simões da Silva, L.** - Lightweight steel-framed thermal bridges mitigation strategies: A parametric study. Journal of Building Physics, 2016.
- Mateus, Diogo** - Slides de Física das Construções: Reverberação. Departamento de Engenharia Civil da F.C.T.U.C, edição de 2014/2015, Coimbra.
- Mateus, Diogo** - Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído, Coimbra, 2008.
- Mateus, Diogo** - Reabilitação acústica de edifícios – Avaliação de desempenho de soluções leves versus soluções pesadas, Coimbra, 2012.
- Mcgraw-hill Construction** - Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry. McGraw-Hill, 2011.
- Meteored@2018** - Estado do tempo para Portugal. Consultado em: 2 Abril de 2018. Disponível em [tempo.pt](http://tempo.pt).
- Moreira, Hugo** - Utilização de Perfis Enformados a Frio em Obras de Reabilitação. Tese de mestrado integrado. Técnico de Lisboa, 2012.
- Murtinho, V.; Simões da Silva, L.; Correia, A.; Ferreira, H.; Gervasio, H.; Rebelo, C.; Santiago, A.; Santos, P.; Mateus, D.; Rigueiro, C.** - Affordable houses: Architectural concepts of a modular steel residential house. Structures and Architecture, 2010.
- Norma ISO 10140 (2010)** - Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements.

**NP EN ISO 16283-1 (2014)** - Medição in situ do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção, Parte 1: Isolamento sonoro entre compartimentos. Instituto Português de Qualidade. Portugal.

**NP EN ISO 16283-3 (2014)** - Medição in situ do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção, Parte 3: Isolamento sonoro de fachadas. Instituto Português de Qualidade. Portugal.

**NP EN ISO 717-1 (2013)** - Acústica: Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção – Parte 1: Isolamento sonoro a sons de condução aérea.

**Pacheco, R.; Ordóñez, J.; Martínez, G.** - Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012.

**Panão, Marta** - Cidades e Alterações Climáticas, Que futuro?. Universidade de Lisboa, 2008.

**Polisol@2018** - Ventilação natural e forçada para edifícios habitacionais, comerciais e industriais. Consultado em: 22 Abril de 2018. Disponível em [polisol.pt](http://polisol.pt).

**Ramos, Rui J. H.** - Desempenho térmico e energético de edifícios de habitação com estrutura metálica leve. Tese de mestrado integrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, 2018.

**Rego, Diogo J. M.** - Estruturas de Edifícios em Light Steel Framing. Tese de mestrado integrado. Universidade Técnica de Lisboa, 2012.

**Roque, Eduardo; Santos, Paulo** - The Effectiveness of Thermal Insulation in Lightweight Steel-Framed Walls with Respect to Its Position. *Buildings*, 2017.

**Santos, Carlos A.P.; Matias, Luís** – Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios (ITE 50). LNEC, 2006.

**Santos, P.; Mateus, D.; Simões da Silva, L.; Rebelo, C.; Gervasio, H.; Correia, A.; Ferreira, H.; Santiago, A.; Murtinho, V.; Rigueiro, C.** - Affordable houses (Part II): Functional, structural and technological performance. *Proceedings of the 2nd International conference on Structures and Architecture*, 2010.

**Santos, P.; Martins, R.; Gervásio, H.; Simões da Silva, L.** - Assessment of building operational energy at early stages of design - A monthly quasi-steady-state approach. *Energy and Buildings*, 2014.

**Silvestre, Nuno; Pires, João; Santos, António** - Manual de Conceção de Estruturas e edifícios em LSF. CMM, 2013. ISBN 978-989-95605-8-1.

**Simões, Nuno; Mateus, Diogo** - Slides de Comportamento Térmico e Energético de Edifícios - Exigências de Desempenho Energético dos Edifícios. Departamento de Engenharia Civil da F.C.T.U.C, edição de 2016/2017, Coimbra.

**Simões, Nuno; Mateus, Diogo** - Slides de Comportamento Térmico e Energético de Edifícios - Pontes Térmicas Lineares, Cálculo e Catálogo. Departamento de Engenharia Civil da F.C.T.U.C, edição de 2016/2017, Coimbra.

**Simões, Rui A. D.** - Manual de dimensionamento de estruturas metálicas. CMM, 2014. ISBN 978-989-95605-9-8.



**Soares N., Santos P., Gervásio H., Costa J.J., Simões da Silva, L.** - Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*, 2017.

**Soares, N.; Gaspar, A. R.; Santos, P.; Costa, J. J.** - Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates. *Energy and Buildings*, 2013.

**Soares, N.; Santos, P.; Gervásio, H.; Costa, J. J.; Simões da Silva, L.** - Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.

**SOL@2017** - Reabilitação urbana reforça crescimento. Consultado em: 19 Maio de 2018. Disponível em [sol.sapo.pt/artigo/594058/reabilitacao-urbana-reforca-crescimento](http://sol.sapo.pt/artigo/594058/reabilitacao-urbana-reforca-crescimento).

**Tadeu, António; Mendes, Paulo A.** - Slides de Acústica Aplicada: Cap. 5. Departamento de Engenharia Civil da F.C.T.U.C, edição de 2016/2017, Coimbra.

**Tadeu, António; Mendes, Paulo A.** - Slides de Acústica Aplicada - Cap. 4. Departamento de Engenharia Civil da F.C.T.U.C, edição de 2016/2017, Coimbra.

**Way, A. G. J.; Kendrick, C.** - Avoidance of thermal bridging in steel construction. *SCI publication P380*, 2008.