



CRISTIANO FERREIRA SANTOS

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

SIMULAÇÃO DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO TÉRMICA EM CLIMA TEMPERADO

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa

outubro, 2023



Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

SIMULAÇÃO DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO TÉRMICA EM CLIMA TEMPERADO

Copyright © Cristiano Ferreira Santos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha família, namorada e amigos

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador Doutor Hugo Silva e ao meu coorientador Professor Doutor Luís Baltazar por me terem lançado este desafio e pelo apoio dado durante a realização do mesmo. Sem o conhecimento adquirido ao longo dos anos por parte de ambos, os seus conselhos e orientações não estaria hoje na reta final do meu percurso académico. A exigência e espírito crítico ao qual fui sujeito certamente tornaram-me melhor a nível profissional e pessoal. Por todas as horas a que me foram dedicadas, obrigado.

Deixo também uma palavra de apreço a todos os docentes da NOVA-FCT que partilharam o seu conhecimento comigo.

Aos meus pais, por sempre me terem incentivado a estudar, a procurar oportunidades e pelo amor incondicional, obrigado. Este é o resultado de todos os vossos esforços ao longo dos anos. Foram vocês que me permitiram alcançar este objetivo de vida. Devo também um grande obrigado à minha avó, Maria Vinagre, por todo o apoio. À Carla Nunes, ao Rainer Holzapfel e à família Ferreira, obrigado.

À Joana Silva, minha namorada, pela paciência e compreensão. Agradeço o amor e carinho dado todos os dias, por seres um porto de abrigo e pelos sacrifícios que fizeste que me permitiram terminar esta etapa. Fizeste de mim uma pessoa melhor.

Aos amigos que a faculdade me deu, Gonçalo Lima, Lourenço Sousa e Clara Correia, dedico também esta dissertação a vocês. Aprendemos e lutámos juntos para aqui chegar. Obrigado pela amizade ao longo de todos estes anos. Aos amigos que fiz durante Erasmus, Francisco Rocha, Nuno Realista e João Vizoso, obrigado por fazerem parte dessa aventura que marcou tanto a minha vida académica.

Um agradecimento especial à Mota-Engil e à equipa que integrei por me terem recebido tão bem ao longo deste ano. O vosso apoio e ajuda foi fundamental neste período onde conciliar o trabalho e a dissertação foi tão difícil.

“Ninguém sabe tanto que não tem nada a aprender e ninguém sabe tão pouco que não tem nada a ensinar”.

RESUMO

O setor residencial é um dos maiores responsáveis pelo consumo de energia final e, consequentemente, pela emissão de gases poluentes para a atmosfera. Estima-se que, em Portugal, mais de um quarto da energia consumida é utilizada para aquecer o espaço interior, o que nos remete para a baixa eficiência energética do parque edificado nacional.

Apesar da legislação atual ser rígida no que toca ao comportamento térmico dos edifícios, grande parte destes foi construída quando ainda não existia regulamentação térmica, o que leva a que sensivelmente 70% das habitações em Portugal não tenham isolamento térmico. Assim, torna-se imperativo reabilitar estes edifícios, aplicando soluções construtivas que minimizem o consumo de energia associado à climatização dos edifícios.

O objetivo deste trabalho é, então, estudar formas de reabilitar higratérmicamente um edifício multifamiliar existente, através dos elementos da envolvente exterior. O caso de estudo, devido ao seu ano de construção, não possui qualquer tipo de isolamento térmico, o que torna interessante a sua análise e a comparação de desempenho antes e após a reabilitação.

O modelo foi validado com base numa campanha de monitorização, onde se registaram valores de temperatura e humidade relativa e, depois utilizado para estudar o impacto que a adoção de diferentes espessuras de isolamento térmico em paredes e diferentes vãos envidraçados têm na temperatura interior e no desempenho energético do edifício.

Da análise realizada, concluiu-se que é pela fachada que se dão as maiores perdas de calor e, pelos vãos envidraçados que se dão os maiores ganhos. O estudo de sensibilidade também permitiu aferir que é pela aplicação de isolamento térmico nas paredes que se consegue diminuir mais as necessidades energéticas ao longo do ano, como medida isolada.

Dentro dos cenários considerados, e na perspetiva de otimizar a redução do consumo energético, qualquer situação onde se aplique isolamento térmico torna-se bastante benéfica, sendo necessária apenas uma espessura de sensivelmente 3 cm de lã mineral para cumprir a legislação e reduzir o consumo de energia total em cerca de 20%. Relativamente aos vãos envidraçados, um U_w de $2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ é suficiente para reduzir o consumo energético em cerca de 5%.

Palavras chave: Eficiência energética, reabilitação térmica, simulação dinâmica, EnergyPlus, monitorização climática, pobreza energética

ABSTRACT

The residential sector is one of the biggest contributors to final energy consumption and, consequently, to the emission of polluting gases into the atmosphere. It is estimated that, in Portugal, more than a quarter of the energy consumed is used for indoor heating, which brings us back to the low energy efficiency of the national building stock.

Although current legislation is strict when it comes to the thermal behavior of buildings, the vast majority of them were built when there were no thermal regulations, which means that around 70% of homes in Portugal are not thermally insulated. It is therefore imperative to rehabilitate these buildings, using constructive solutions that minimize the energy consumption associated with air conditioning.

The aim of this work is to investigate measures for the hygrothermal rehabilitation of an existing multi-family building, using the elements of the exterior envelope. The case study, due to its year of construction, does not have any type of thermal insulation, which makes it interesting to analyze and compare its performance before and after the rehabilitation.

The model was validated based on a monitoring campaign where temperature and relative humidity values were recorded, and then used to study the impact that the adoption of different thicknesses of thermal insulation in walls and different glazing openings have on the interior temperature and energy performance of the building.

From the analysis carried out, it was concluded that the largest heat losses occur through the façade and the largest gains through the windows. The sensitivity study also showed that it is by applying thermal insulation to the walls that energy needs can be reduced the most throughout the year, as an isolated measure.

Within the scenarios considered, and from the perspective of optimizing the reduction in energy consumption, any situation where thermal insulation is applied becomes very beneficial, requiring only a thickness of approximately 3 cm of mineral wool to comply with the legislation and reduce total energy consumption by around 20%. Concerning the windows, a U_w of 2 W/m²°C is enough to reduce energy consumption by around 5%.

Keywords: Energy efficiency, thermal rehabilitation, dynamic simulation, EnergyPlus, climate monitoring, energy poverty

ÍNDICE

<i>AGRADECIMENTOS</i>	9
<i>RESUMO</i>	<i>I</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>III</i>
<i>ÍNDICE</i>	<i>IV</i>
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	<i>XI</i>
<i>ÍNDICE DE TABELAS</i>	<i>XVII</i>
<i>ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS</i>	<i>XIX</i>
<i>1. Introdução</i>	<i>1</i>
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Problema e objetivos.....	2
1.3. Metodologia.....	2
1.4. Organização do documento.....	3
<i>2. Consumo de energia e o parque edificado</i>	<i>5</i>
2.1. Considerações gerais.....	5

2.2.	Panorama energético.....	5
2.2.1.	Enquadramento	5
2.2.2.	Consumo de energia.....	6
2.2.2.1.	União Europeia.....	6
2.2.2.2.	Portugal	8
2.2.2.3.	O setor residencial	9
2.3.	Evolução legislativa.....	13
3.	<i>Parque edificado português</i>	19
3.1.	Evolução	19
3.2.	Caracterização do parque edificado	21
3.2.1.	Considerações gerais.....	21
3.2.2.	Tipo de estrutura	22
3.2.3.	Revestimento exterior de paredes	24
3.2.4.	Elementos verticais de zona corrente em envolvente exterior.....	25
3.2.5.	Elementos horizontais de zona corrente em envolvente exterior.....	29
3.2.6.	Vãos envidraçados	31
3.3.	Classificação energética.....	32
3.4.	Estado de conservação	33
4.	<i>Pobreza Energética</i>	35
4.1.	Enquadramento	35
4.2.	Causas da pobreza energética	36
4.3.	Baixos rendimentos vs preço da energia	37
4.4.	Fraca eficiência energética dos edifícios.....	40
4.5.	Combate à pobreza energética	41

5.	<i>Reabilitação higrotérmica de edifícios</i>	43
5.1.	Considerações gerais.....	43
5.1.1.	Humidade relativa e temperatura	47
5.1.2.	Estado higrotérmico do ar	47
5.1.3.	Condensações superficiais	49
5.1.4.	Síndrome do edifício doente	49
5.2.	Estratégias de reabilitação térmica.....	50
5.2.1.	Considerações gerais.....	50
5.2.2.	Reabilitação de paredes.....	51
5.2.2.1.	Considerações gerais	51
5.2.2.2.	Inércia térmica	51
5.2.2.3.	Pontes térmicas.....	54
5.2.2.4.	Isolamento térmico	56
5.2.3.	Reabilitação de elementos horizontais	57
5.2.3.1.	Isolamento nas vertentes inclinadas.....	58
5.2.3.2.	Isolamento da laje de esteira.....	58
5.2.4.	Reabilitação de vãos envidraçados.....	58
5.2.4.1.	Área da superfície envidraçada.....	59
5.2.4.2.	Tipo de vidro	59
5.2.4.3.	Caixilharia	60
5.2.5.	Ventilação.....	61
6.	<i>Metodologia</i>	63
6.1.	Considerações gerais.....	63
6.2.	Caso de estudo	64

6.2.1.	Descrição geral.....	64
6.2.2.	Arquitetura.....	65
6.2.3.	Soluções construtivas.....	68
6.2.3.1.	Elementos verticais de zona corrente.....	68
6.2.3.2.	Elementos horizontais de zona corrente	69
6.2.3.3.	Vãos envidraçados.....	69
6.2.3.4.	Cobertura.....	69
6.2.4.	Clima local.....	69
6.3.	Campanha de monitorização.....	70
6.3.1.	Considerações gerais.....	70
6.3.2.	Sensores	71
6.3.3.	Descrição	71
6.4.	Modelação do caso de estudo.....	73
6.4.1.	Considerações gerais.....	73
6.4.2.	Inputs do EnergyPlus	75
6.4.2.1.	Considerações gerais	75
6.4.2.2.	Parâmetros de simulação	75
6.4.2.3.	Localização e clima	76
6.4.2.4.	Horários	77
6.4.2.5.	Elementos da construção da superfície	78
6.4.2.6.	Zonas térmicas e superfícies.....	79
6.4.2.7.	Ganhos internos.....	81
6.4.2.8.	Ventilação.....	85
6.4.2.9.	Ficheiro climático.....	85
6.4.3.	Outputs do EnergyPlus.....	85

6.5.	Calibração e validação do modelo	86
6.5.1.	Análise estatística - comparação com os dados recolhidos	86
6.5.2.	Comparação dos consumos energéticos do modelo com a metodologia SCE	88
6.6.	Impacto do isolamento térmico	89
6.7.	Impacto dos vãos envidraçados – coeficiente de transmissão térmica	90
6.8.	Impacto dos vãos envidraçados – fator solar.....	90
6.9.	Estudo de sensibilidade.....	91
7.	<i>Resultados</i>	95
7.1.	Monitorização do clima interior.....	95
7.2.	Validação do modelo	97
7.2.1.	Comparação com o clima monitorizado.....	97
7.2.2.	Comparação dos dados energéticos.....	104
7.3.	Reabilitação passiva.....	105
7.4.	Impacto das medidas de reabilitação no consumo energético	106
7.4.1.	Impacto da melhoria da envolvente opaca	106
7.4.2.	Impacto da melhoria da envolvente envidraçada	112
7.4.2.1.	Impacto da melhoria do coeficiente de transmissão térmica.....	112
7.4.2.2.	Impacto da melhoria do fator solar	117
7.4.3.	Estudo de sensibilidade.....	120
7.4.4.	Impacto da melhoria do coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca e envidraçada	126
7.4.5.	Análise com base nos regulamentos nacionais.....	130
8.	<i>Conclusões e desenvolvimento futuros</i>	133
8.1.	Conclusão	133
8.2.	Desenvolvimento futuros.....	136

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137
--	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. CONSUMO DE ENERGIA PRIMÁRIA, EU. FONTE: ADAPTADO DE [8].....	7
FIGURA 2.2. CONSUMO DE ENERGIA FINAL POR SETOR, EU, 2019. FONTE: ADAPTADO DE [7]	8
FIGURA 2.3. CONSUMO DE ENERGIA PRIMÁRIA, PT. FONTE: FONTE: ADAPTADO DE [7].....	8
FIGURA 2.4. CONSUMO DE ENERGIA FINAL POR SETOR, PT, 2020 FONTE: ADAPTADO DE [10]	9
FIGURA 2.5. CONSUMO DE ENERGIA FINAL NO SETOR RESIDENCIAL PER CAPITA, EU E PT, 2000-2020. FONTE: ADAPTADO DE [10].....	10
FIGURA 2.6. CONSUMO DE ENERGIA FINAL NO SETOR RESIDENCIAL POR UTILIZAÇÃO (%), EU, 2021. FONTE: ADAPTADO DE [11].....	11
FIGURA 2.7. CONSUMO DE ENERGIA FINAL NO SETOR RESIDENCIAL POR UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS, EU, 2019. FONTE: ADAPTADO DE [11]	12
FIGURA 2.8. CONSUMO DE ENERGIA FINAL NO SETOR RESIDENCIAL POR UTILIZAÇÃO, PT, 2019. FONTE: ADAPTADO DE [11].....	13
FIGURA 2.9. EVOLUÇÃO LEGISLATIVA.....	14
FIGURA 3.1. EDIFÍCIOS CONCLUÍDOS PARA HABITAÇÃO FAMILIAR POR TIPO DE OBRA EM PORTUGAL DE 1995 A 2018 FONTE: [23]	20
FIGURA 3.2. TAXA DE VARIAÇÃO ANUAL DO NÚMERO DE EDIFÍCIOS CONCLUÍDOS PARA HABITAÇÃO FAMILIAR POR TIPO DE OBRA DE 1996 A 2018 FONTE: [23]	20
FIGURA 3.3. HABITANTES POR ALOJAMENTO CLÁSSICO, EU E PAÍSES. FONTE: [23]	21
FIGURA 3.4. - EDIFÍCIOS POR ÉPOCA DE CONSTRUÇÃO. FONTE: [24].....	22

FIGURA 3.5. NÚMERO DE EDIFÍCIOS POR TIPO DE ESTRUTURA DE CONSTRUÇÃO. FONTE:[25].....	23
FIGURA 3.6. DISTRIBUIÇÃO DE EDIFÍCIOS CLÁSSICOS SEGUNDO O TIPO DE ESTRUTURA DE CONSTRUÇÃO, POR ÉPOCA DE CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS. FONTE:[25]	23
FIGURA 3.7. NÚMERO DE EDIFÍCIOS DE ACORDO COM O TIPO DE REVESTIMENTO EXTERIOR DAS FACHADAS. FONTE:[25].....	24
FIGURA 3.8. DISTRIBUIÇÃO DE EDIFÍCIOS DE ACORDO COM O TIPO DE REVESTIMENTO EXTERIOR DAS FACHADAS POR ÉPOCA DE CONSTRUÇÃO. FONTE: [25].....	25
FIGURA 3.9. EVOLUÇÃO DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE PAREDES ALIADAS À EVOLUÇÃO DO REGULAMENTO DA TÉRMICA. FONTE:[28].....	26
FIGURA 3.10. VALORES DE U PARA DIFERENTES SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS	27
FIGURA 3.11. NÚMERO DE EDIFÍCIOS SEGUNDO O TIPO DE COBERTURA. FONTE: [25].....	29
FIGURA 3.12. EVOLUÇÃO DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE COBERTURAS ALIADAS À EVOLUÇÃO DA REGULAMENTAÇÃO DA TÉRMICA. FONTE: [29].....	30
FIGURA 3.13. CLASSES ENERGÉTICAS DO EDIFICADO PORTUGUÊS. FONTE: [32].....	33
FIGURA 3.14. ESTADO DE CONSERVAÇÃO POR ÉPOCA DE CONSTRUÇÃO. FONTE:[25].....	34
FIGURA 3.15. DESEMPENHO ENERGÉTICO POR ÉPOCA CONSTRUTIVA. FONTE:[25].....	34
FIGURA 4.1. CAUSAS DA POBREZA ENERGÉTICA E INDICADORES CHAVE. FONTE: [37]	37
FIGURA 4.2. PREÇO DA ELETRICIDADE EM 2020 (€/kWh). FONTE:[38]	37
FIGURA 4.3. SALÁRIO MÉDIO ILÍQUIDO EM 2020 [39]	38
FIGURA 4.4. POPULAÇÃO INCAPAZ DE MANTER A HABITAÇÃO ADEQUADAMENTE QUENTE, UE, 2008-18 (%). FONTE:[41].....	39
FIGURA 4.5. POPULAÇÃO QUE CONSEGUE MANTER A HABITAÇÃO ADEQUADAMENTE FRIA NO VERÃO, EU, 2012 (%). FONTE:[41]	39
FIGURA 4.6. POPULAÇÃO A VIVER EM HABITAÇÕES COM INFILTRAÇÕES NA COBERTURA, HUMIDADE EM PAREDES, PAVIMENTOS OU ALICERCES, OU APODRECIMENTOS EM JANELAS OU PAVIMENTOS, UE, MÉDIA 2007-17 (%). FONTE:[41].....	40
FIGURA 4.7. ZONAS CLIMÁTICAS DE INVERNO NO CONTINENTE. FONTE: [19].....	41

FIGURA 5.1. EVOLUÇÃO DA REPARTIÇÃO DAS OBRAS DE LICENCIAMENTO EM CONSTRUÇÃO NOVA E REABILITAÇÃO (2015-2021) FONTE: [49]	45
FIGURA 5.2. PRODUTIVIDADE DO SEGMENTO DE REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM PAÍSES DA UE, 2011. FONTE:[50]	46
FIGURA 5.3. DIAGRAMA PSICROMÉTRICO. FONTE:[51].....	48
FIGURA 5.4. FONTES ASSOCIADAS À POLUIÇÃO INTERIOR. FONTE:[57]	50
FIGURA 5.5 - CONCEITO DE INÉRCIA TÉRMICA. FONTE:[51]	52
FIGURA 5.6. INÉRCIA TÉRMICA, AMORTECIMENTO E DESFASAMENTO. FONTE:[51]	53
FIGURA 5.7. SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS COM ISOLAMENTO TÉRMICO PELO INTERIOR E PELO EXTERIOR. FONTE:[58]	53
FIGURA 5.8-TIPOS DE PONTES TÉRMICAS: A) CORTE VERTICAL DE UMA PONTE TÉRMICA DEVIDO À LIGAÇÃO DA FACHADA COM A LAJE; B) E C) CORTE HORIZONTAL DE PONTE TÉRMICA DEVIDO À LIGAÇÃO ENTRE DUAS PAREDES VERTICAIS COM TRANSIÇÃO ENTRE MATERIAIS DIFERENTES. FONTE:[58].....	54
FIGURA 5.9. PONTES TÉRMICAS. FONTE: [37]	55
FIGURA 5.10. PONTE TÉRMICA LINEAR. FONTE: [37].....	55
FIGURA 5.11. TRANSFERÊNCIA DE CALOR NUMA COBERTURA INCLINADA COM DESVÃO.....	57
FIGURA 5.12. FLUXOS DE ENERGIA NUM VÃO ENVIDRAÇADO. FONTE:[59].....	59
FIGURA 5.13 - VALORES DE U_g , U_f E U_w PARA DIVERSAS SOLUÇÕES DE ENVIDRAÇADOS. FONTE: [36]	61
FIGURA 6.1 - LOCALIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	64
FIGURA 6.2 - PLANTA DO PISO -1	65
FIGURA 6.3 - PLANTA DO PISO 0 (FRAÇÃO DO CASO DE ESTUDO EM DESTAQUE, A VERDE)	66
FIGURA 6.4 - PLANTA DO PISO 1	66
FIGURA 6.5 - FACHADA NOROESTE	67
FIGURA 6.6 - FACHADA SUDESTE	67
FIGURA 6.7. ZONAS CLIMÁTICAS DE INVERNO E VERÃO DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO SCE. FONTE:[60]	70

FIGURA 6.8. LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES E IMAGEM DO <i>DATA LOGGER</i> UTILIZADO	72
FIGURA 6.9. IDF - EDITOR.....	74
FIGURA 6.10. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.....	75
FIGURA 6.11. GROUND TEMPERATURE BUILDING SURFACE.....	77
FIGURA 6.12. SCHEDULES	78
FIGURA 6.13. CONSTRUCTION	79
FIGURA 6.14. ORIENTAÇÃO DOS VÉRTICES DAS SUPERFÍCIES	79
FIGURA 6.15. ZONAS TÉRMICAS	80
FIGURA 6.16. BUILDING SURFACE DETAILED.....	80
FIGURA 6.17. GEOMETRIA DO EDIFÍCIO EM ESTUDO	81
FIGURA 6.18 - ESPESURAS DE ISOLAMENTO E COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DE PAREDES DAS SOLUÇÕES UTILIZADAS	90
FIGURA 6.19 - COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DE VÃOS ENVIDRAÇADOS UTILIZADOS	90
FIGURA 6.20 - FATOR SOLAR (SHGC) DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS UTILIZADOS	91
FIGURA 6.21 - SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE ENVOLVENTE OPACA UTILIZADAS (ZC=ZONA CORRENTE; PTP=PONTE TÉRMICA PLANA	92
FIGURA 6.22 - DIAGRAMA DE SIMULAÇÕES REALIZADAS	94
FIGURA 7.1 - RESULTADOS DA CAMPANHA DE MONITORIZAÇÃO	96
FIGURA 7.2 - COMPARAÇÃO DE VALORES DE TEMPERATURAS (A), HUMIDADE RELATIVA (B) E PRESSÃO DE VAPOR DE ÁGUA (C) MEDIDOS E SIMULADOS	97
FIGURA 7.3 - EXCERTO DA FOLHA DE CÁLCULO FORNECIDA PELO ITECONS. VALOR DE RENOVAÇÕES HORÁRIAS DE AR INTERIOR	99
FIGURA 7.4 - IDENTIFICAÇÃO DAS PONTES TÉRMICAS LINEARES	101
FIGURA 7.5 - COMPARAÇÃO DE VALORES DE TEMPERATURAS (A), HUMIDADE RELATIVA (B) E PRESSÃO DE VAPOR DE ÁGUA (C) MEDIDOS E SIMULADOS	103

FIGURA 7.6 - COMPARAÇÃO DE VALORES DE NECESSIDADES DE AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO SIMULADOS.	104
FIGURA 7.7 - IMPACTO DA REDUÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA ENVOLVENTE OPACA	106
FIGURA 7.8 - GANHOS E PERDAS DE CALOR COM A REDUÇÃO DE U DA ENVOLVENTE OPACA	107
FIGURA 7.9) - TEMPERATURAS SUPERFICIAIS INTERIORES COM A REDUÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA ENVOLVENTE OPACA. A) $U_{PTP}=3,7 \text{ W/M}^2\text{C}$ E $U_{ZC}=1,3 \text{ W/M}^2\text{C}$; B) $U_{PTP}=0,70 \text{ W/M}^2\text{C}$ E $U_{ZC}=0,53 \text{ W/M}^2\text{C}$; C) $U_{PTP}=0,43 \text{ W/M}^2\text{C}$ E $U_{ZC}=0,35 \text{ W/M}^2\text{C}$; D) $U_{PTP}=0,31 \text{ W/M}^2\text{C}$ E $U_{ZC}=0,27 \text{ W/M}^2\text{C}$	110
FIGURA 7.10 - IMPACTO DA REDUÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DO VÃO ENVIDRAÇADO	113
FIGURA 7.11 - GANHOS E PERDAS DE CALOR COM A REDUÇÃO DE U DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS.....	114
FIGURA 7.12. TEMPERATURAS SUPERFICIAIS COM A REDUÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS. A) $U_w=4 \text{ W/M}^2\text{C}$; B) $U_w=3 \text{ W/M}^2\text{C}$; C) $U_w=2 \text{ W/M}^2\text{C}$; D) $U_w=1 \text{ W/M}^2\text{C}$	116
FIGURA 7.13. IMPACTO DA REDUÇÃO DO FATOR SOLAR	117
FIGURA 7.14- GANHOS E PERDAS DE CALOR COM A REDUÇÃO DO FATOR SOLAR.....	118
FIGURA 7.15 - TEMPERATURA INTERIOR PARA DIVERSOS FATORES SOLARES	119
FIGURA 7.16 - CONSUMO DE ENERGIA TOTAL DAS SIMULAÇÕES	120
FIGURA 7.17 - CONSUMO ENERGÉTICO DA SIMULAÇÃO 0.4.1 E 3.2.4.....	122
FIGURA 7.18 - GANHOS E PERDAS DE CALOR DAS SIMULAÇÕES 0.4.1 E 3.2.4.....	123
FIGURA 7.19 - DIFERENÇA DE TEMPERATURAS SUPERFICIAIS INTERNAS PARA A SIMULAÇÃO 0.4.1 E 3.2.4	124
FIGURA 7.20 - IMPACTO DA REDUÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DOS ENVIDRAÇADOS E ENVOLVENTE OPACA EM SIMULTÂNEO.....	127
FIGURA 7.21 - NECESSIDADES ENERGÉTICAS DE AQUECIMENTO, ARREFECIMENTO E TOTAL PARA A REDUÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DOS ENVIDRAÇADOS E ENVOLVENTE OPACA	128
FIGURA 7.22. COMPARAÇÃO DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS ENTRE A SOLUÇÃO CONSTRUTIVA INICIAL E AS SOLUÇÕES MAIS BENÉFICAS	129
FIGURA 7.23 – VALORES DE U MÁXIMO PARA A ZONA DE INVERNO I1, U DA MÉDIA NACIONAL E U DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA INICIAL DO CASO DE ESTUDO	130

FIGURA 7.24 - COMPARAÇÃO DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS PARA A SIMULAÇÃO INICIAL, A SIMULAÇÃO QUE MAIS SE APROXIMA DOS REQUISITOS LEGAIS E DA SIMULAÇÃO COM MENORES NECESSIDADES.....	131
--	-----

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1 - ENERGIA CONSUMIDA PARA AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO DE PAÍSES EUROPEUS. FONTE: [11]	10
TABELA 2.2. RELAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA MÉDIA ANUAL E O CONSUMO DE ENERGIA PARA REGULAR A TEMPERATURA INTERIOR. [REALIZADO PELO AUTOR].....	11
TABELA 2.3 - VALORES DE COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DE REFERÊNCIA, U, IMPOSTOS PELO DECRETO-LEI N.º N.º 40/90 [1].....	14
TABELA 2.4 - VALORES DE COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DE REFERÊNCIA, U, IMPOSTOS PELO DECRETO-LEI N.º 80/2006 [17].....	17
TABELA 2.5 - VALORES DE COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA MÁXIMOS, U, IMPOSTOS PELA PORTARIA N.º 138-I/2021 [19].....	18
TABELA 3.1 - VALORES DE $U_{MÁX}$ (W/M ² °C) PARA ELEMENTOS VERTICAIS [19].....	25
TABELA 3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS TIPO.....	28
TABELA 3.3- VALORES DE $U_{MÁX}$ (W/M ² °C) PARA ELEMENTOS HORIZONTAIS. FONTE:[19].....	30
TABELA 3.4-VALORES DE $U_{MÁX}$ (W/M ² °C) PARA VÃOS ENVIDRAÇADOS. FONTE: [19]	31
TABELA 3.5. INTERVALO DE VALORES DE RNT PARA A DETERMINAÇÃO DA CLASSE ENERGÉTICA. FONTE: [32]....	32
TABELA 4.1 - COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA MÁXIMOS E MÉDIOS DA ENVOLVENTE EXTERIOR (W/M ² .°C)	41
TABELA 5.1. HUMIDADE RELATIVA SUPERFICIAL EM DIVERSAS ZONAS DE UM EDIFÍCIO. FONTE:[51]	56
TABELA 6.1. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS ELEMENTOS DA ENVOLVENTE	68
TABELA 6.2 - TAREFAS E RESPECTIVAS TAXAS METABÓLICAS [71], [53].....	83

TABELA 6.3 - TAXA METABÓLICA E GANHOS DE CALOR	84
TABELA 6.4. FORMA DE DISSIPACÃO DE CALOR PARA CADA TIPO DE LUMINÁRIA [74]	84
TABELA 6.5 - DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DAS SOLUÇÕES UTILIZADAS	92
TABELA 7.1 - VALORES DE TEMPERATURA MEDIDOS.....	95
TABELA 7.2 - DETERMINAÇÃO DA ÁREA DAS PONTES TÉRMICAS LINEARES.....	100
TABELA 7.3- ALTERAÇÕES REALIZADAS AO MODELO	102
TABELA 7.4 - VALORES DE COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA VERSUS DE REFERÊNCIA [19].....	105
TABELA 7.5 - TEMPERATURAS SUPERFICIAIS MÁXIMAS E MÍNIMAS	111
TABELA 7.6 - TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS	115
TABELA 7.7. COMPARATIVO ENTRE SIMULAÇÃO 0.4.1 E 3.2.4.....	121
TABELA 7.8. VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS DE TEMPERATURAS SUPERFICIAIS PARA A SIMULAÇÃO 0.4.1 E 3.2.4	124
TABELA 7.9 - VALORES DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA INTERIORES E EXTERIORES	125
TABELA 7.10 - VALORES MÁXIMOS DE U E DE FATOR SOLAR A RESPEITAR SEGUNDO A LEGISLAÇÃO EM VIGOR .	130

ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

<u>Símbolo</u>	<u>Descrição</u>	<u>Unidade</u>
<i>ACH</i>	Taxa de renovação horária	[h ⁻¹]
<i>c</i>	Calor específico	[J/kg.K]
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono	[ppm]
<i>CV(RMSE)</i>	Coeficiente de variação da raiz quadrada do erro	[%]
<i>d</i>	Espessura	[m]
<i>DGEG</i>	Direção Geral de Energia e Geologia	[-]
<i>e</i>	Pressão de vapor de água	[hPa]
<i>GEE</i>	Gases de efeito de estufa	[-]
<i>IT</i>	Isolamento térmico	[-]
<i>LIHC</i>	Indicador de baixos rendimentos e custos elevados	[-]
<i>Mtep</i>	Milhões de toneladas equivalente de petróleo	[Mtep]
<i>NDC's</i>	Contribuições Nacionalmente Determinadas	[-]
<i>NMBE</i>	Erro de desvio médio normalizado	[%]
<i>R</i>	Resistência térmica	[m ² .°C/W]
<i>R²</i>	Coeficiente de determinação	[-]
<i>RCCTE</i>	Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios	[-]
<i>SHGC</i>	Fator solar	[-]
<i>U</i>	Coeficiente de transmissão térmica	[W/m ² .°C]
<i>UE</i>	União Europeia	[-]
<i>Uptl</i>	Coeficiente de transmissão térmica de ponte térmica linear	[W/m ² .°C]

U_{ptp}	Coeficiente de transmissão térmica de ponte térmica plana	$[W/m^2.°C]$
U_w	Coeficiente de transmissão térmica de vão envidraçado	$[W/m^2.°C]$
U_{zc}	Coeficiente de transmissão térmica de zona corrente	$[W/m^2.°C]$

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

A atualidade destaca cada vez mais as preocupações ambientais, sobretudo nos países desenvolvidos. A escassez de recursos energéticos não renováveis como o carvão, petróleo e gás natural não só apresentam sérios problemas, como também acarretam impactos prejudiciais ao ecossistema, contribuindo para as mudanças climáticas globais.

A conjugação destes fatores tem conduzido à imposição de limitações e à formulação de diretrizes e normas que abrangem diversos setores, inclusive o da construção, onde o foco reside na otimização da eficiência energética com a busca de soluções que garantam a sustentabilidade tanto do ponto de vista económico como ambiental. No caso específico do setor da construção, responsável por uma parcela significativa do consumo de energia e emissões de carbono, o objetivo é reduzir esse mesmo consumo, relacionado com o conforto térmico e com a qualidade do ambiente interior dos edifícios, tanto na estação de aquecimento como na estação de arrefecimento. Estes objetivos são alcançados, por exemplo, através da melhoria das características térmicas da envolvente dos edifícios reabilitados, visto a grande maioria do parque edificado português ter sido construído antes de existir qualquer regulamentação térmica, assim como com o aumento das exigências para os novos edifícios.

A preocupação com a eficiência energética tem dado origem a um aumento na disponibilidade de ferramentas de simulação dinâmica do comportamento térmico de edifícios, como é o caso do EnergyPlus, utilizado neste trabalho. O EnergyPlus é uma ferramenta de simulação térmica de edifícios amplamente reconhecida que permite avaliar de forma precisa e abrangente o desempenho térmico de edifícios em diversas condições climáticas e cenários de reabilitação.

Estas ferramentas permitem antecipar condições internas de temperatura, consumo energético, ganhos e perdas de calor, entre outros aspetos, permitindo uma abordagem fundamentada na tomada de decisões para a reabilitação térmica de edifícios.

A relevância deste estudo é evidente na medida em que enfrentamos uma crise global de energia e mudanças climáticas. A reabilitação térmica de edifícios não apenas reduz o consumo de energia e as emissões de carbono, como também melhora o conforto dos ocupantes e pode levar a poupanças substanciais a longo prazo. Esta pesquisa visa contribuir para a compreensão e aplicação de estratégias de reabilitação térmica que podem impulsionar a construção sustentável.

1.2. Problema e objetivos

O primeiro documento legal em Portugal que impôs requisitos térmicos para os edifícios novos e para as grandes renovações foi o chamado RCCTE, ou seja, o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 40/90, em 1990 [1]. Acontece que, cerca de 70% dos edifícios existentes em Portugal foram construídos antes do RCCTE e, consequentemente, apresentam soluções construtivas sem isolamento térmico.

A consequência direta desta situação é a baixa eficiência energética do parque edificado nacional. Estima-se que mais de um quarto da energia consumida em Portugal seja destinada ao aquecimento dos espaços interiores. Essa estatística alarmante aponta para a urgente necessidade de melhorar o desempenho térmico dos edifícios existentes.

Devido à sua exposição direta ao ambiente exterior, a envolvente opaca e envidraçada dos edifícios são dos principais responsáveis pelas trocas de calor existentes. Portanto, a reabilitação destes elementos é fundamental para tornar os edifícios mais sustentáveis e com menores necessidades energéticas. As deficiências na envolvente podem levar a perdas de calor significativas no inverno e ganhos excessivos de calor no verão, resultando em desperdício de energia e desconforto dos ocupantes.

Assim, o principal objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento térmico e energético que diversas soluções construtivas de paredes e janelas têm no edifício em estudo, uma habitação multifamiliar construída na década de 70/80. O foco está na compreensão de como essas soluções podem melhorar a eficiência energética, considerando as condições climáticas específicas do caso de estudo.

1.3. Metodologia

De forma a alcançar os objetivos propostos, começou-se por construir, validar e calibrar o modelo do caso de estudo de acordo com a campanha de monitorização realizada ao longo de um ano, onde valores de temperatura exterior e interior foram registados, assim como valores de humidade relativa. A validação e a calibração do modelo garantem que seja representado com precisão o comportamento térmico do edifício em estudo.

O modelo validado e calibrado é utilizado para avaliar a eficácia da adoção de diferentes espessuras de isolamento térmico nas paredes e, de diferentes vãos envidraçados, em termos de temperatura e necessidades energéticas. Para tal, foi definida uma base de referência comum a todas as simulações para estimar as necessidades energéticas, de acordo com as diretrizes estipuladas no Manual do Sistema de Certificação Energética (SCE) para edifícios de habitação.

Foi ainda desenvolvido um perfil de utilização real da habitação, com base nos padrões e comportamentos típicos para uma fração como a estudada.

Esta abordagem, que combina dados de monitorização real com simulações detalhadas, permite uma análise abrangente e confiável do desempenho térmico e energético do edifício em estudo. Oferece ainda uma base sólida para a presente investigação relativamente a quais soluções construtivas são as mais eficazes, assim como para trabalhos futuros poderem desenvolver mais este assunto com base nos resultados e conclusões retirados deste estudo.

1.4. Organização do documento

Este trabalho encontra-se estruturado em oito capítulos distintos. A disposição desses capítulos foi delineada para proporcionar uma exposição clara e concisa dos conteúdos abordados neste trabalho.

Neste capítulo inicial, procede-se ao enquadramento do tema no contexto da preocupação crescente com o consumo energético dos edifícios. São aqui apresentados os objetivos propostos e a metodologia utilizada neste trabalho, além de ser esboçada a sua estrutura global.

No capítulo 2 aborda-se o tema do consumo energético na Europa e em Portugal, expondo a forma como a energia é utilizada nos diversos setores económicos, sendo o principal foco o setor residencial. É ainda abordado a evolução legislativa em Portugal, no que toca à regulamentação térmica de edifícios e a forma como esta moldou a construção mais recente. Este tema permite fazer a ponte para os capítulos seguintes.

No capítulo 3 caracteriza-se o parque edificado nacional, em termos de tipo de estrutura, revestimentos, soluções construtivas, classificação energética e estado de conservação.

No capítulo 4 trata-se do tema da pobreza energética, das suas causas, da forma de a combater e como a situação económica do país influencia a qualidade de vida dos habitantes dentro de suas casas.

No capítulo 5 são discutidas algumas estratégias de reabilitação possíveis, explicando os conceitos teóricos por detrás de cada uma.

No capítulo 6 é apresentado e caracterizado o caso de estudo que serviu de base à realização deste

trabalho. É explicada como decorreu a campanha de monitorização, o processo de construção do modelo no EnergyPlus, a sua validação e calibração, bem como a estratégia adotada para a realização das simulações.

No capítulo 7 são apresentados e discutidos os resultados das simulações realizadas, avaliando-se o impacto que cada solução construtiva tem nos consumos energéticos e nas temperaturas interiores e superficiais.

Por fim, no capítulo 8, apresentam-se as principais conclusões retiradas do trabalho desenvolvido e, no capítulo 9 são dadas sugestões de trabalhos a desenvolver no futuro.

2. Consumo de energia e o parque edificado

2.1. Considerações gerais

A população mundial tem desenvolvido cada vez mais a preocupação pelo meio ambiente, na tentativa de reverter a tendência do consumo desenfreado de energia, próprio do estilo de vida moderno [2]. Associado a este elevado consumo energético e, como medida preventiva, existe a urgência de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa para atmosfera, assim como de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. Com base nestes fatores, torna-se crucial encontrar soluções que melhorem a eficiência no uso da energia em todos os setores.

2.2. Panorama energético

2.2.1. Enquadramento

Foi a 12 de dezembro de 2015, na COP21 em Paris, que foi assinado um tratado internacional vinculativo sobre as mudanças climáticas, onde 196 partes se comprometeram a limitar o aumento da temperatura média global a níveis abaixo dos 2°C, comparativamente à era pré-industrial. O chamado "*Acordo de Paris*", funciona com base num ciclo de 5 anos com objetivos cada vez mais ambiciosos no que toca a ações climáticas [3].

Em 2021, um ano depois do previsto e devido à pandemia da COVID-19, os líderes mundiais voltaram-se a reunir numa conferência sobre o clima do planeta, a COP26, em Glasgow. Foi nesta conferência que foram atualizadas as "Contribuições Nacionalmente Determinadas" ou NDC's, que representam os compromissos por parte de cada país para reduzir a emissão de gases de efeito de estufa [4]. Contudo as previsões não são animadoras, sendo esperado que as NDC's coloquem o mundo no caminho para um aumento da temperatura global de 2,7°C até ao final do século, ficando muito aquém das expectativas do Acordo de Paris [5].

Atendendo ao facto de que o ser humano passa a maior parte do seu tempo dentro de edifícios, sejam eles de habitação ou serviços é natural que uma parte significativa do consumo energético seja devido à utilização destes espaços, principalmente com os confinamentos impostos pela pandemia. Em 2015,

38% das emissões de CO₂ a nível global, cerca de 13.1 giga toneladas, foram provocadas pela construção e operação de edifícios [6]. Em 2019, as emissões tinham subido para um pico de 13.4 giga toneladas de dióxido de carbono e, continuavam a aumentar até o impacto da pandemia na economia global se ter feito sentir. No ano de 2020, as emissões de CO₂ provocadas pela construção e operação de edifícios reduziram cerca de 10%, sendo necessário recuar até 2007 para se obter um nível semelhante [6]. Esta redução foi alcançada através da diminuição da procura de energia, mas também pelos contínuos esforços para descarbonizar o setor energético [6]. Porém, com o ressalto da economia em 2021, pós-pandemia, as emissões de GEE voltaram aos valores que apresentavam em 2019. Mantém-se, portanto, crítico reduzir as emissões de gases de efeito de estufa no setor da construção e habitação, a nível global, para alcançar os objetivos do "*Acordo de Paris*".

2.2.2. Consumo de energia

2.2.2.1. União Europeia

Segundo os dados disponíveis no Eurostat [7] e com base na Figura 2.1, é possível observar as oscilações do consumo de energia primária na Europa ao longo dos anos. Este apresentava uma tendência crescente até 2006, ano em que se atingiu o pico de energia consumida, cerca de 2203 Mtep. 2006 foi também o ano onde o "*Acordo de Paris*" começou a ser implementado, daí a forte quebra que se começou a sentir nos anos posteriores, com um agravamento da descida em 2008, devido à crise das dívidas soberanas. Após a recuperação da crise, uma tendência decrescente fez-se sentir novamente de 2010 a 2014, seguido de um aumento do consumo durante o período de 2015 a 2017, sofrendo novamente uma queda em 2019, devida à pandemia. As políticas energéticas, assim como o clima, especialmente durante o inverno nos países no norte da Europa, e no verão, nos países mais a sul, são fatores que também influenciam o consumo de energia, como explicado mais adiante. É ainda de salientar que, entre 1990 e 2019, o consumo de energia primária desceu cerca de 146 Mtep e, houve um aumento de 222% do consumo de energias renováveis e um decréscimo de 56% em combustíveis fósseis.

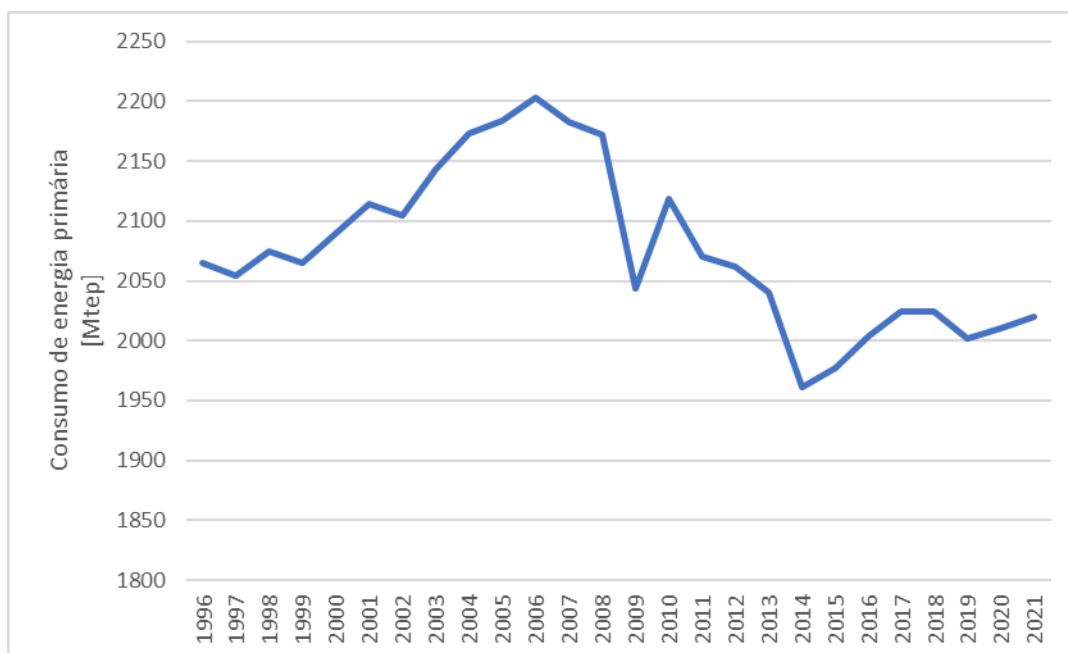


Figura 2.1. Consumo de energia primária, EU. Fonte: Adaptado de [8]

Como mencionado anteriormente, em 2019 na Europa, foram consumidos 2002 Mtep de energia primária que se traduziram em 935 Mtep de energia final. Esta é a energia que chega aos consumidores finais, nos diversos setores tais como no uso residencial, na agricultura, transporte, serviços, indústria e outros.

Segundo os dados da Eurostat [9], o consumo energético é dominado pelos transportes, pela indústria e pelo setor residencial, que em conjunto representaram cerca de 83% da energia consumida no ano de 2019.

Sendo o setor residencial o foco deste trabalho e, compreendendo o seu impacto no consumo energético europeu, torna-se claro que este setor é um dos maiores geradores de gases poluentes na Europa, tendo sido, em 2019, consumidos aproximadamente 246 Mtep de energia final. Se, ao consumo dos edifícios residenciais, se somar o dos edifícios de serviços, chegamos à conclusão de que a utilização de edifícios na UE é responsável por 40% dos consumos energéticos, ou seja, 374 Mtep. A percentagem do consumo de energia final por setor na União Europeia é apresentada na Figura 2.2.

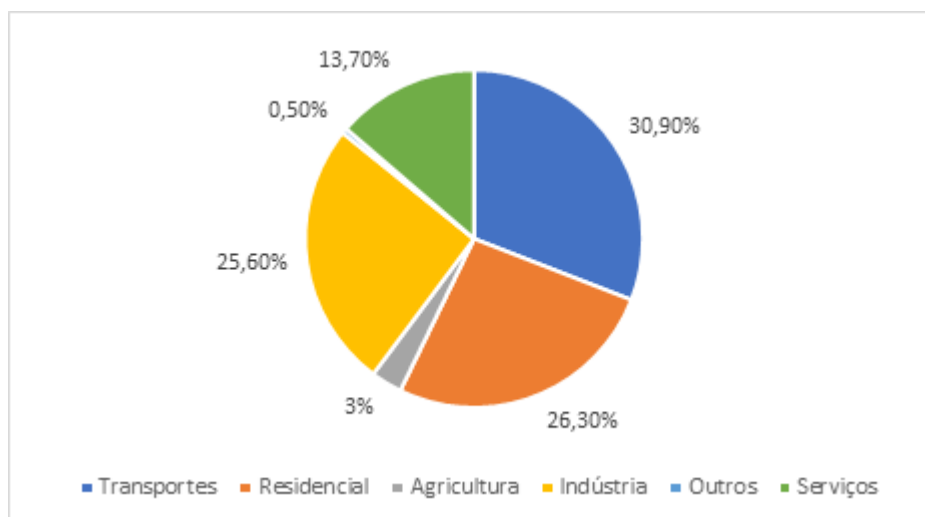


Figura 2.2. Consumo de energia final por setor, EU, 2019. Fonte: Adaptado de [7]

2.2.2.2. Portugal

Relativamente ao consumo energético português, o ano de 2020 foi um ano atípico. Devido à pandemia COVID-19, os hábitos da população sofreram alterações em todos os setores de atividade e, consequentemente o consumo energético também se alterou. É necessário recuar até 1996 para se encontrar um consumo de energia primária da mesma ordem de grandeza (20,8 Mtep), conforme Figura 2.3. Aliada à descida do consumo de energia primária, 7,5% face a 2019, o consumo de energia final teve igualmente uma quebra de 7,2% relativamente ao ano anterior, situando-se em 15,4 Mtep [10].

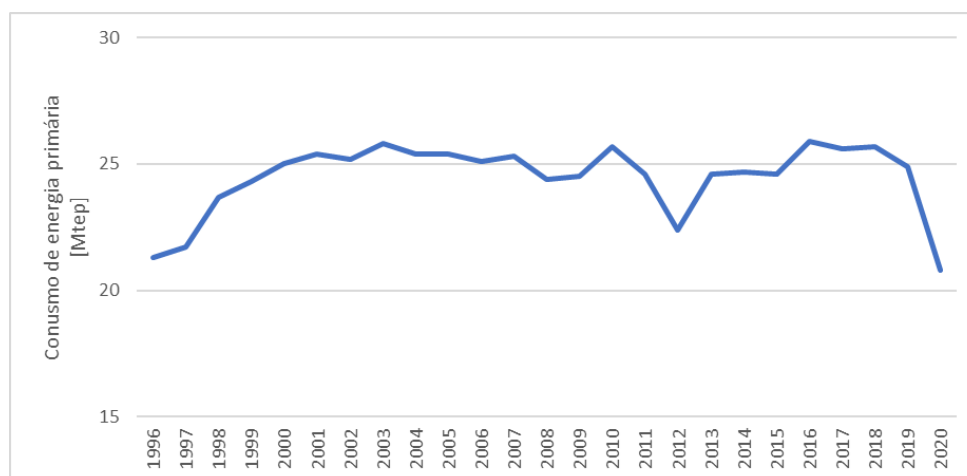


Figura 2.3. Consumo de energia primária, PT. Fonte: Fonte: Adaptado de [7]

Como referido anteriormente, o consumo de energia dos portugueses sofreu alterações relativamente ao ano de 2019. O setor mais afetado pela pandemia foi a aviação civil com uma quebra de 62,5% face a 2019, seguido pelo transporte rodoviário, o setor dos serviços e o da indústria, com quebras de 15%, 11% e 3% respetivamente. Em contrapartida, o setor residencial, devido aos confinamentos que se fizeram sentir, teve um aumento do consumo energético na ordem dos 4% e, o da agricultura de 6% [10].

Apesar das quebras no consumo energético e à semelhança do que se passa na União Europeia, em Portugal o consumo de energia continua a ser dominado tanto pelos transportes, pela indústria e pelo setor residencial, perfazendo um total de 84% da energia total consumida (Figura 2.4).

Mesmo após as variações de consumo causadas pela COVID-19, a utilização de edifícios residenciais e de serviço (público, privados de saúde, educação, comércio, restauração, entre outros), foram responsáveis por um terço do consumo total de energia final em Portugal no ano de 2020.

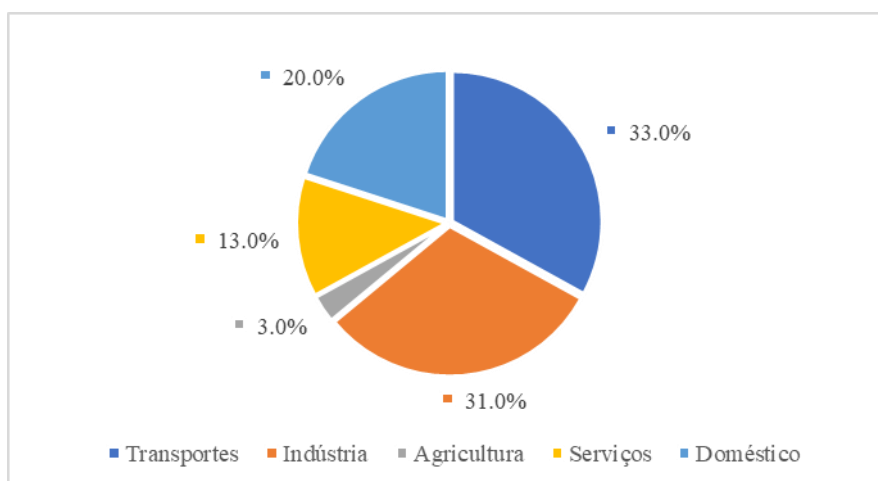


Figura 2.4. Consumo de energia final por setor, PT, 2020 Fonte: Adaptado de [10]

2.2.2.3. O setor residencial

O consumo de energia no setor residencial serve vários propósitos, tais como, o aquecimento/arrefecimento do espaço, aquecimento de água, confeção de alimentos, iluminação, entre outros usos. No ano de 2019, este setor representou 26,3% do consumo de energia final europeu, ou seja, 16,9% do consumo interno bruto de energia [11]. Na Figura 2.5, é possível observar o consumo de energia final per capita, na União Europeia de 2000 a 2019 e, em Portugal desde 2000 até 2020, onde se observa um aumento de 4% no último ano, derivado da pandemia, supramencionado.

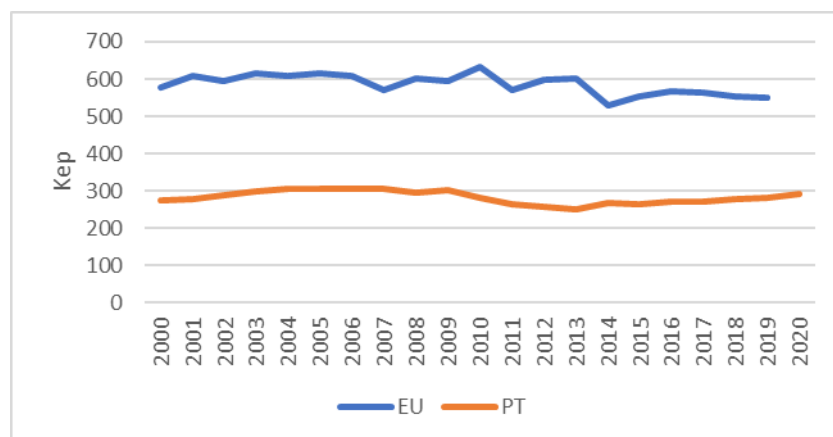


Figura 2.5. Consumo de energia final no setor residencial per capita, EU e PT, 2000-2020. Fonte: Adaptado de [10]

Segundo dados de 2021 [11], na União Europeia, o principal uso de energia dentro das habitações foi para aquecer o espaço, representando aproximadamente 64% do consumo energético, tal como pode ser visto na Figura 2.6. Portugal foi o 2º país da Europa com menores consumos para este fim, cerca de 30%, ficando apenas à frente de Malta e, atrás da Albânia, com 23% e 33%, respetivamente. Estes dois últimos países, apesar de serem dos que menos energia consomem para aquecer o espaço, são os que mais dela precisam para o arrefecer. Países como o Luxemburgo, Bélgica e Eslováquia, são os que mais energia consomem para aquecer o interior das habitações, com cerca de 80%, 74% e 75% respetivamente [11], conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Energia consumida para aquecimento e arrefecimento de países europeus. Fonte: [11]

País	Energia consumida para aquecimento (%)	País	Energia consumida para arrefecimento (%)
EU	64,4	EU	0,5
Malta	22,5	Eslováquia	0,1
Portugal	30,9	Bélgica	0,1
Albânia	32,5	Luxemburgo	0,5
Chipre	34,9	Portugal	0,9
Bélgica	74,4	Albânia	7,9
Eslováquia	74,6	Chipre	10,6
Luxemburgo	80,3	Malta	17,0

O aquecimento de água é a segunda maior fatia no consumo de energia primária no setor habitacional, a nível europeu, traduzindo-se em aproximadamente 15%. O remanescente da energia é consumida em iluminação, confeção de alimentos e outros.

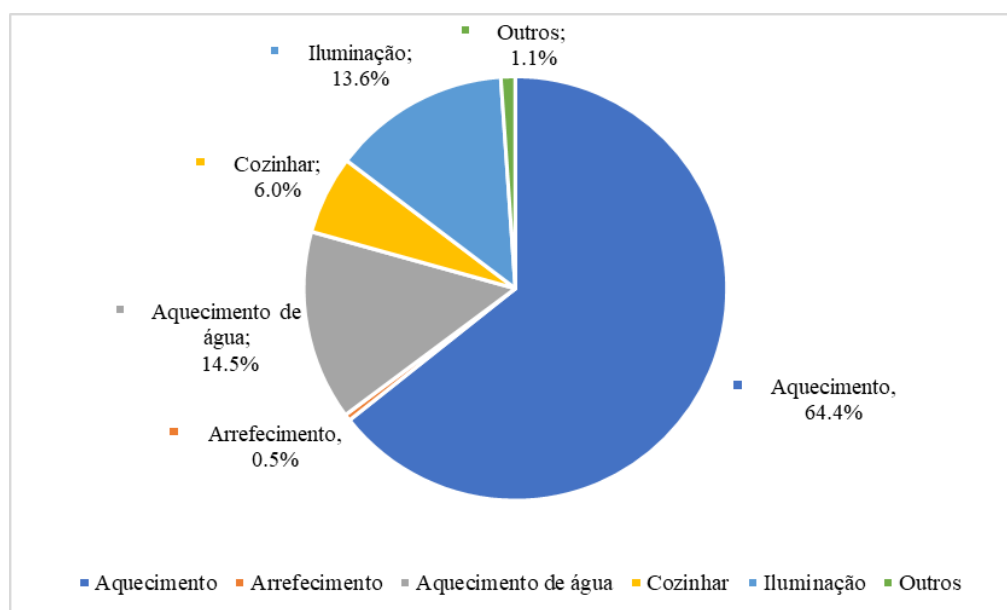


Figura 2.6. Consumo de energia final no setor residencial por utilização (%), EU, 2021. Fonte: Adaptado de [11]

Com o intuito de perceber a razão pela qual diferentes países consomem diferentes quantidades de energia para o mesmo fim, construiu-se a Tabela 2.2, onde é possível observar uma relação entre a temperatura média anual [12] e as percentagem de energia utilizada para regular a temperatura no interior das habitações [11]

Tabela 2.2. Relação entre a temperatura média anual e o consumo de energia para regular a temperatura interior. [Realizado pelo autor]

País	Temperatura média (°C)	%Energia final para aquecimento	%Energia final para arrefecimento	%Energia total para regular temperatura
Malta	19,6	22,5	17,0	39,5
Chipre	19,6	34,9	10,6	45,5
Portugal	15,6	30,9	0,9	31,8
Luxemburgo	10,0	80,3	0,5	80,8
Bélgica	10,7	74,4	0,1	74,5
Eslováquia	8,3	74,6	0,1	74,7

Países com uma temperatura média anual mais elevada têm menores necessidades de aquecer o espaço, mas maiores consumos energéticos para o arrefecer, como é o caso de Malta e Chipre. O contrário se passa em países como o Luxemburgo, a Bélgica e a Eslováquia. Portugal, caracterizado pelo seu clima ameno, encontra-se num meio termo onde, neste universo, é o que menos energia consome para regular a temperatura interior dos espaços ao longo do ano. Será ainda alvo de estudo a identificação de outros possíveis fatores para além do clima ameno, que levem a população portuguesa a ser dos países da UE que menos energia consome para aquecer o interior das habitações.

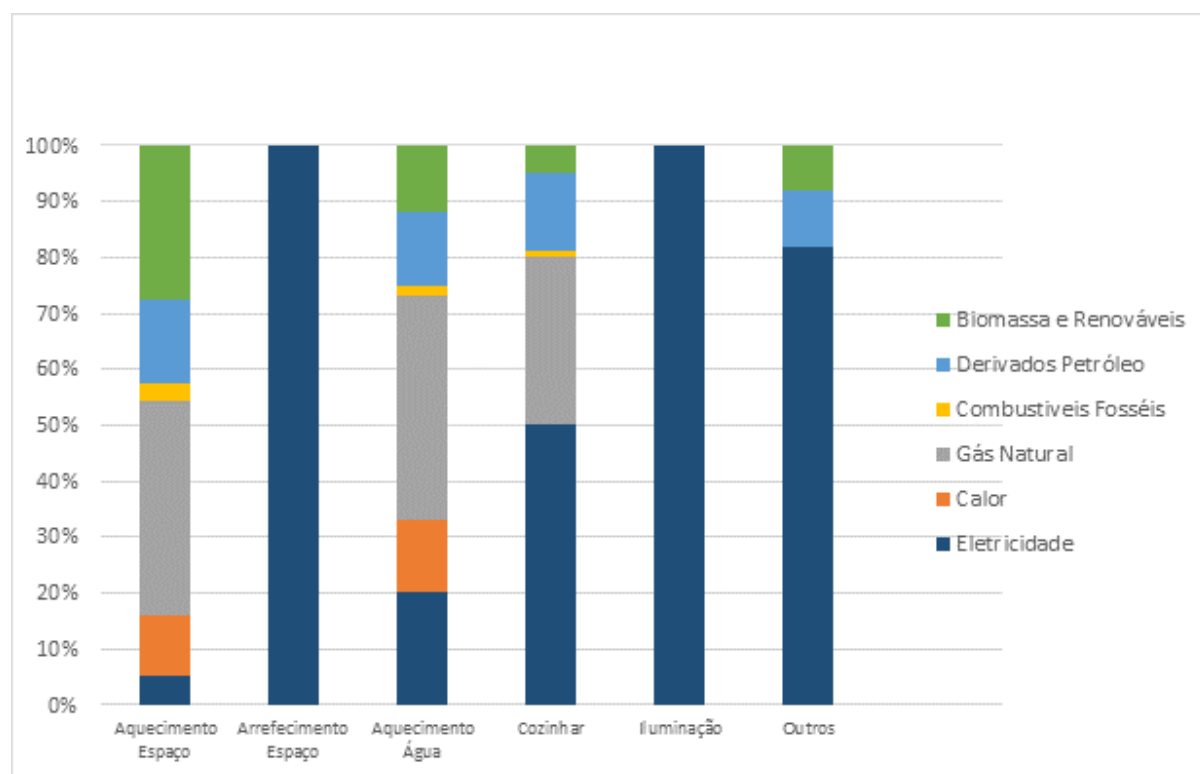


Figura 2.7. Consumo de energia final no setor residencial por utilização de combustíveis, EU, 2019. Fonte: Adaptado de [11]

Analisando as Figura 2.6 e Figura 2.7, cerca de 79% da energia final é utilizada para aquecer o espaço e a água, sendo que os combustíveis que o permitem são o calor, que é o único a ser utilizado a 100% para este fim, o gás natural, os combustíveis fósseis, os derivados do petróleo e a biomassa e renováveis, que são todas elas aplicadas a mais de 90% com o mesmo objetivo. A eletricidade é a fonte de energia final mais diversificada, sendo utilizada para todos os fins. Esta é também responsável não só por 100% do abastecimento de toda a energia encarregue do arrefecimento do espaço e da iluminação na UE, mas também de 82% dos outros-usos e de 50% na confeção de alimentos.

As energias renováveis cobrem 28% de toda a energia consumida para o aquecimento do espaço, de 13% para o aquecimento de água e de 6% para cozinhar. Aproximadamente metade dos países da UE (27 países) utilizam fontes de energia renovável para o aquecimento de espaços, estando em destaque

Portugal com 80,7%, e a Croácia e Bulgária, com 64,4% e 59,9%, respetivamente [11].

Em contrapartida, Portugal usa 40,9% de derivados de petróleo para o aquecimento de água, sendo o segundo país da UE que mais utiliza este combustível com este fim, ficando atrás apenas da Irlanda [11].

Relativamente à distribuição do consumo de energia no setor residencial português por utilização, representado na Figura 2.8, Portugal dedica cerca de um terço da energia total a controlar a temperatura no interior das habitações e 15% para iluminação. A maior fatia do consumo energético corresponde à confeção de alimentos.

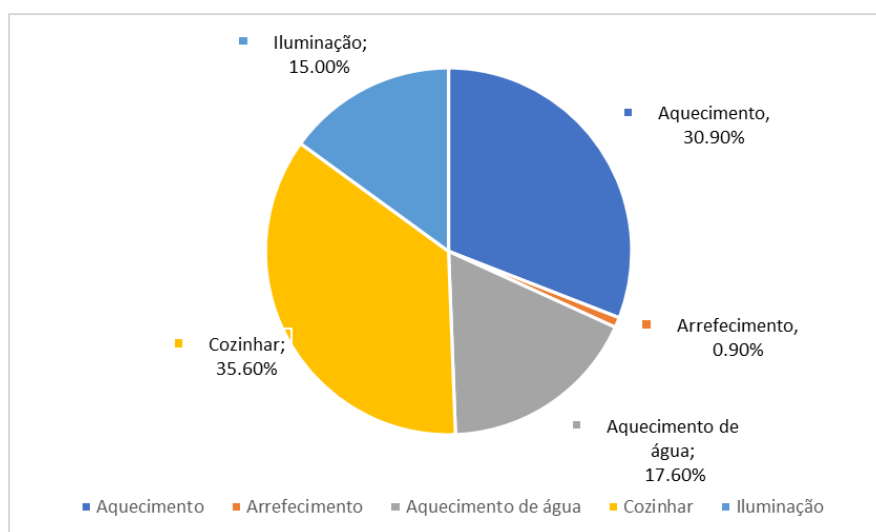


Figura 2.8. Consumo de energia final no setor residencial por utilização, PT, 2019. Fonte: Adaptado de [11]

2.3. Evolução legislativa

Face às alterações climáticas e à preocupação cada vez maior para com o ambiente, a União Europeia tem apresentado um papel ativo na luta contra a poluição e à emissão de gases de efeito de estufa. Conforme referido no capítulo anterior, o consumo de energia no mundo e, especialmente, no setor doméstico apresentam valores elevados, razão pela qual a UE estabelece medidas comunitárias que definem metas rígidas com o intuito de atingir a descarbonização. A eficiência energética apresenta um papel importante na luta contra a emissão de gases poluentes e é uma das formas utilizadas para reverter a tendência atual, através de exigências que cada estado-membro tem de cumprir.

Essas exigências chegam em forma de Diretivas que, por sua vez, são transpostas para documentos de cariz legal e vinculativo que cada país coloca em vigor. Na Figura 2.9 é possível ver a linha cronológica da evolução legislativa em Portugal desde 1990.

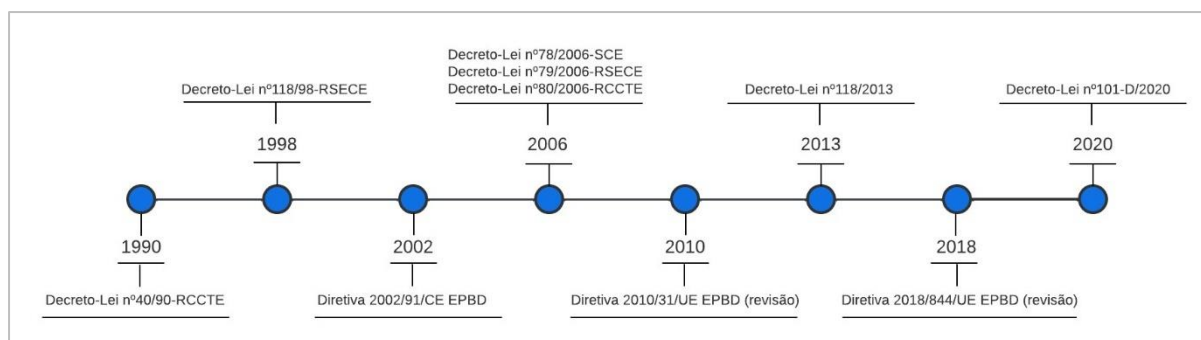


Figura 2.9. Evolução legislativa

O primeiro documento legal em Portugal que impôs requisitos para os edifícios novos e para as grandes renovações foi o chamado RCCTE, ou seja, o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 40/90, em 1990 [1]. Este tinha como objetivo regular as condições térmicas dos edifícios, garantindo melhores condições de salubridade, higiene e conforto sem dispêndio excessivo de energia, assim como prevenir o aparecimento de patologias derivadas de condensações nos elementos de construção. Para além de limitações das necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento, foram implementados requisitos mínimos de qualidade térmica dos edifícios. Por outras palavras, definiram-se valores de referência para a envolvente do edifício e dividiu-se o país em três zonas climáticas de verão e de inverno, sendo que, para cada zona, existiam limites diferentes de coeficiente de transmissão térmica adaptados ao local de implantação do edifício [1].

Assim, os primeiros valores de referência do coeficiente de transmissão térmica, U ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$), impostos pelo RCCTE foram os apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Valores de coeficiente de transmissão térmica de referência, U , impostos pelo Decreto-Lei n.º 40/90 [1]

	Zona Climática		
	I1	I2	I3
Elementos verticais de zona corrente em envolvente exterior ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)	1,8	1,6	1,45
Elementos horizontais de zona corrente em envolvente exterior ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)	1,25	1,0	0,9

A aprovação do RCCTE, cujo foco foi melhorar a qualidade térmica da envolvente mediante a intervenção na conceção, no projeto e construção constituiu um passo notável em direção ao conforto térmico dos edifícios. Faltava, no entanto, regulamentar as condições de dimensionamento, instalação e utilização dos sistemas de climatização dos edifícios [13]. Foi em 1998 que, através da aprovação do Decreto-Lei n.º 118/98, entrou em vigor o RSECE (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios) e que se colmatou essa lacuna [13]. Este regulamento procurava introduzir medidas de racionalização fixando limites à potência máxima dos sistemas a instalar num edifício para, sobretudo, evitar o sobredimensionamento conforme era prática comum [14].

Em 2006 decorreram grandes alterações na área dos edifícios e da eficiência energética, após a publicação da Diretiva 2002/91/CE, onde foi aplicado um pacote legislativo constituído pelos Decreto-Lei n.º 78/2006, 79/2006 e 80/2006 [15]. A Diretiva em questão obrigava os estados-membros a garantir a implementação dos requisitos mínimos regulamentares de desempenho energético por forma a assegurar a respetiva eficiência energética e informar o cidadão da qualidade térmica dos edifícios em situação de venda, arrendamento ou construção [15].

O Decreto-Lei n.º 78/2006 [16] aprovou e implementou o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior de Edifícios, conhecido como SCE e, atribuiu à ADENE (Agência para a Energia) a gestão do SCE que, tinha como objetivo:

- Assegurar a aplicação regulamentar relativamente às condições de garantia de qualidade do ar interior, eficiência energética e à utilização de sistemas de energia renovável, de acordo com as exigências do RCCTE e RSECE;
- Certificar o desempenho energético e qualidade do ar interior dos edifícios;
- Identificar medidas de correção ou melhoria aplicáveis tanto aos edifícios como aos sistemas energéticos.

O Decreto-Lei n.º 79/2006 veio revogar o seu antecessor, o DL118/98, pois verificou-se uma indiferença na aplicação da 1ª versão do RSECE, havendo pouco controlo da conformidade do desempenho das instalações e falta de manutenção. Derivado ao crescimento da procura por sistemas de climatização naquela altura, resultante da melhoria do nível de vida, da maior exigência da população em termos de conforto e da elevada taxa de crescimento do parque edificado, resultou a mais elevada taxa de crescimento dos consumos de energia [14]. Por sua vez, a não existência de requisitos relativos aos valores mínimos de renovação de ar e a falta de controlo do desempenho das instalações levou ao aparecimento de patologias relacionadas com a qualidade do ar interior [14]. Assim e, como resposta à situação que se vivia naquela época, esta nova versão veio:

- Definir condições do conforto térmico e de higiene que devem ser requeridos nos diferentes espaços dos edifícios, em consonância com as respetivas funções;
- Melhorar a eficiência energética global dos edifícios em todo o tipo de consumo energético;
- Estabelecer regras na eficiência dos sistemas de climatização que permite melhorar e otimizar o seu desempenho;
- Monitorizar e controlar os sistemas de climatização como as condições de eficiência energética e de qualidade do ar interior de edifícios.

À semelhança do que se passou com o RSECE, também o RCCTE foi atualizado através do Decreto-Lei n.º 80/2006. Apesar de o RCCTE apresentar o mesmo nome e semelhanças ao nível de aplicação e fase de licenciamento, não apresentam os mesmos pressupostos. A necessidade de rever este Decreto-Lei prende-se com o facto de compatibilizar, de forma mais realista, os consumos energéticos das frações pela mesma razão que levou à criação do RSECE. Por outras palavras, a nova versão do RCCTE estava fundamentada na ideia de que muitos edifícios possuíam meios para melhorar as condições ambientais nos seus espaços interiores durante todas as estações do ano [17]. No entanto, essa nova versão reconhece que os consumos de energia não podem ser padronizados, especialmente no setor residencial, devido à incerteza do perfil de utilização dos equipamentos e sistemas. Para lidar com essa complexidade, o regulamento estabeleceu critérios ambientais de referência para calcular os consumos energéticos nominais com base em padrões típicos previstos, tanto em relação à temperatura ambiente quanto à ventilação, uma vez que a qualidade interior do ar tinha vindo a ser comprometida pela crescente estanquidade das construções e pelo uso de novos materiais. O RCCTE, portanto, alargou as exigências impondo limites claros para a taxa de renovação do ar [17].

Para além dos requisitos para a taxa de renovação do ar interior, o regulamento introduziu os conceitos de pontes térmicas lineares, incluindo requisitos de isolamento e de construção que visavam minimizar a ocorrência de trocas de calor pelas pontes térmicas. O objetivo era então melhorar a eficiência energética dos edifícios [17].

Os valores de referência do coeficiente de transmissão térmica dos elementos da envolvente do RCCTE também foram revistos, sendo mais exigentes do que os expostos na edição anterior, conforme Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Valores de coeficiente de transmissão térmica de referência, U, impostos pelo Decreto-Lei n.º 80/2006 [17]

	Zona Climática		
	I1	I2	I3
Elementos verticais de zona corrente em envolvente exterior ($W/m^2\text{°C}$)	0,7	0,6	0,5
Elementos horizontais de zona corrente em envolvente exterior ($W/m^2\text{°C}$)	0,5	0,45	0,4

Entrou em vigor em 2013, o Decreto-Lei n.º 118/2013, com o intuito de rever e simplificar o processo de certificação energética, revogando o SCE, o RSECE e o RCCTE, ao uniformizar tudo num único diploma, incluindo o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) [18]. Esta reestruturação para além de clarificar a interpretação das normas, evidencia a separação entre os edifícios de habitação e os de comércio e serviços, facilitando os processos de melhoria do desempenho energético de edifícios. Foi aqui que também foi mencionado pela primeira vez um conceito já introduzido em 2010, o NZEB (Nearly Zero Energy Building) [18].

Seguiu-se, a 7 de dezembro de 2020, o Decreto-Lei n.º 101-D/2020 que veio estabelecer os requisitos aplicáveis à conceção e renovação de edifícios, com o objetivo de melhorar o seu desempenho energético através da fixação de requisitos aplicáveis à modernização e renovação das habitações. É ainda regulado por este DL o sistema de certificação energética de edifícios, transpondo a Direta 298/844. Neste Decreto-Lei, os edifícios novos devem ser edifícios com necessidades quase nulas de energia, pelo que estão obrigados ao cumprimento de requisitos que permitam alcançar níveis de desempenho energético elevados. São estes requisitos mínimos de desempenho energético que visam minimizar a ocorrência de patologias e limitar as necessidades de energia [19].

O referido decreto-lei determina que os requisitos associados aos componentes dos edifícios, com inclusão da respetiva envolvente e sistemas técnicos, assim como as situações de isenção do cumprimento dos mesmos requisitos por força da ocorrência de constrangimentos são regulamentadas por portaria dos membros do Governo responsáveis pelas áreas da energia e da habitação, pelo que a 1 de julho de 2021 foi publicada a Portaria nº 138-I/2021 [19].

Esta, regulamenta os requisitos mínimos de desempenho energético relativos à envolvente dos edifícios e respetiva aplicação em função do tipo de utilização do edifício. Na Tabela 2.5 estão expostos os valores de $U_{\text{máx}}$ ($\text{W/m}^2\text{°C}$) definidos na referida portaria, para Portugal Continental. Ao analisar estes valores e, comparando-os com os restantes valores de U utilizados ao longo dos anos na legislação portuguesa é notória a tendência de tornar a envolvente do edifício cada vez eficiente energeticamente, sendo que os valores admissíveis reduzirem em mais de um terço desde a publicação do Decreto-Lei nº 40/90, em 1990.

Tabela 2.5 - Valores de coeficiente de transmissão térmica máximos, U , impostos pela Portaria nº 138-I/2021 [19]

	Zona Climática		
	I1	I2	I3
Elementos verticais de zona corrente em envolvente exterior ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	0,5	0,4	0,35
Elementos horizontais de zona corrente em envolvente exterior ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	0,4	0,35	0,3

A Portaria nº 138-I/2021 estabelece ainda que os edifícios de habitação encontram-se isentos do cumprimento dos requisitos relativos aos coeficientes de transmissão térmica superficiais da zona corrente da envolvente opaca, desde que seja garantido o cumprimento dos requisitos de conforto térmico previstos na alínea a) do n.º 9 do artigo 6.º do Decreto -Lei n.º 101 -D/2020, de 7 de dezembro, ou seja, se cumprirem com o conforto térmico [19].

3. Parque edificado português

3.1. Evolução

Na década de 1970 Portugal era, quando comparado com a UE, um país pouco desenvolvido com um estilo de vida rural e pouco industrializado, caracterizado pelo regime ditatorial de Salazar que perdurou até 1974 [20]. Após a implementação da república e da entrada na União Europeia, em 1986, fez-se sentir um crescimento económico e o panorama português melhorou consideravelmente, isto claro, até chegar a crise económica de 2008. A dívida externa de Portugal aumentou substancialmente durante a 1ª década do séc. XXI, agravada pela crise internacional, traduzindo-se em medidas de austeridade, o que realçou ainda mais as desigualdades sociais já existentes em Portugal [21]. Os efeitos da crise fizeram-se sentir ao longo de vários anos sendo que, em 2013, o índice de pessoas em risco de pobreza e exclusão social atingiu cerca de um quarto da população. Com o passar do tempo, o país foi ganhando estabilidade, a taxa de desemprego diminuiu, assim como o número de pessoas em risco de pobreza. [20]

Antes da entrada na União Europeia, o ritmo de desenvolvimento do parque edificado português era bastante baixo, quando comparado com a Europa, sendo esta fase da construção considerada rudimentar. Porém, entre 1970 e 1999, mais de 2 milhões de habitações foram construídas, demonstrando a explosão que se deu no setor da construção [22], fruto da grande pressão que se fez sentir derivada ao êxodo rural e à fixação da população na capital e/ou principais cidades do litoral. Com esta necessidade de rápida construção de habitações, muitos construtores (com poucos conhecimentos) foram atraídos, o que se refletiu na qualidade de algumas construções.

De 1995 a 2018 foi possível observar três períodos distintos na evolução das obras concluídas em edifícios de habitação (onde estão englobadas obras de construção nova e reabilitação). No primeiro, de 1995 até 2002, foram dedicados mais recurso à construção nova comparativamente à reabilitação de edifícios. No seguinte período, de 2003 a 2016, houve uma enorme quebra no setor da construção, sendo atingidos as menores taxas de variação anual (-22,6% nas reabilitações e -33,9% nas construções novas), caracterizado pelo período de crise económico-financeira. Foi a partir de 2016 que a construção renasceu e, desde então apresenta uma tendência crescente onde foram registados os maiores crescimentos anuais no período temporal analisado, Figura 3.1 e Figura 3.2 [23].

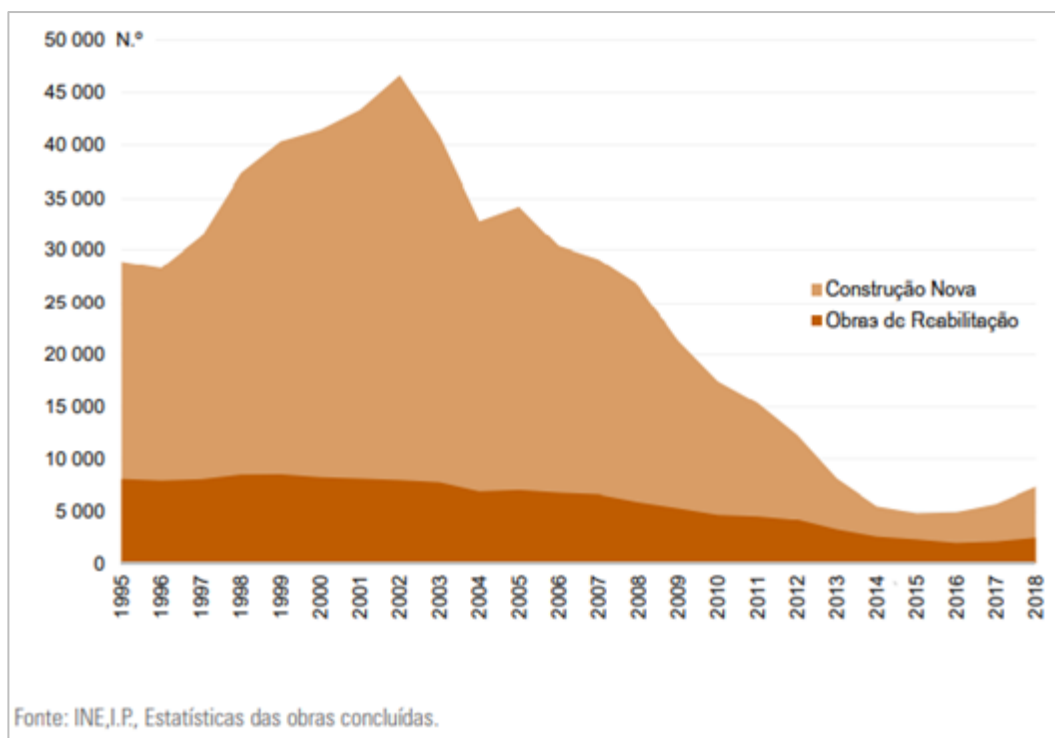


Figura 3.1. Edifícios concluídos para habitação familiar por tipo de obra em Portugal de 1995 a 2018 Fonte: [23]

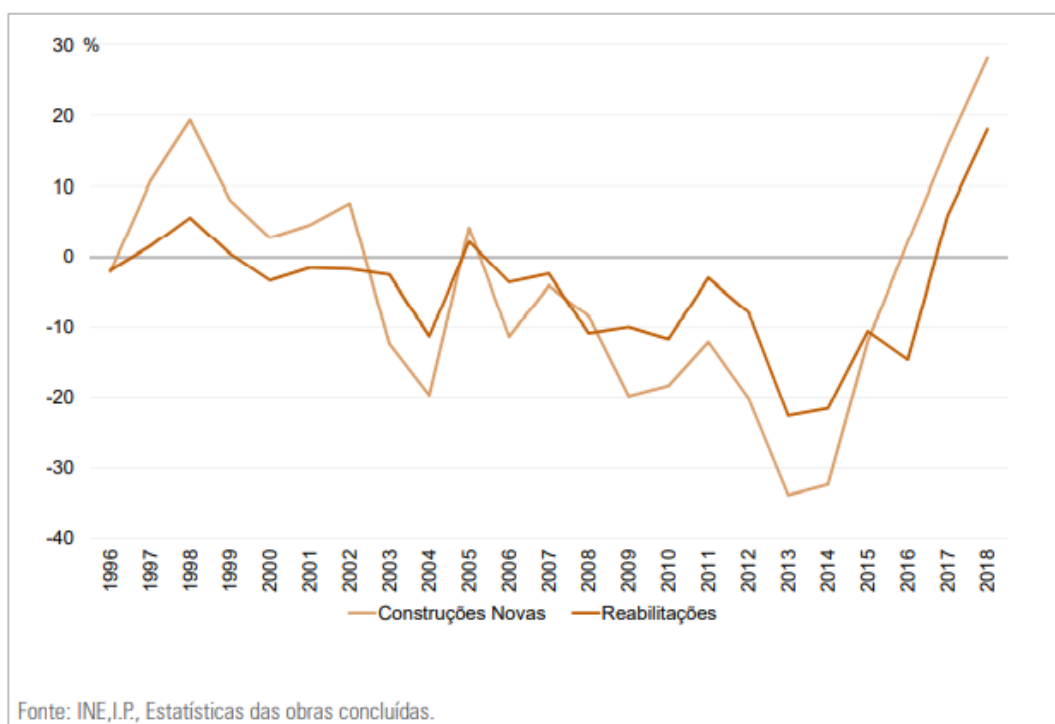


Figura 3.2. Taxa de variação anual do número de edifícios concluídos para habitação familiar por tipo de obra de 1996 a 2018 Fonte: [23]

Face à evolução do parque edificado descrito desde 1995 a 2018, analisa-se agora a relação entre a

procura e a oferta de habitação. Segundo dados do INE, em 2011, Portugal era o país da União Europeia que menos habitantes tinha por alojamento familiar clássico, cerca de 1,8, como se pode ver na Figura 3.3. Já em 2018, este valor desceu para 1,7, continuando a ser o mais baixo entre os países da UE28, retratando a adequação da oferta à procura.

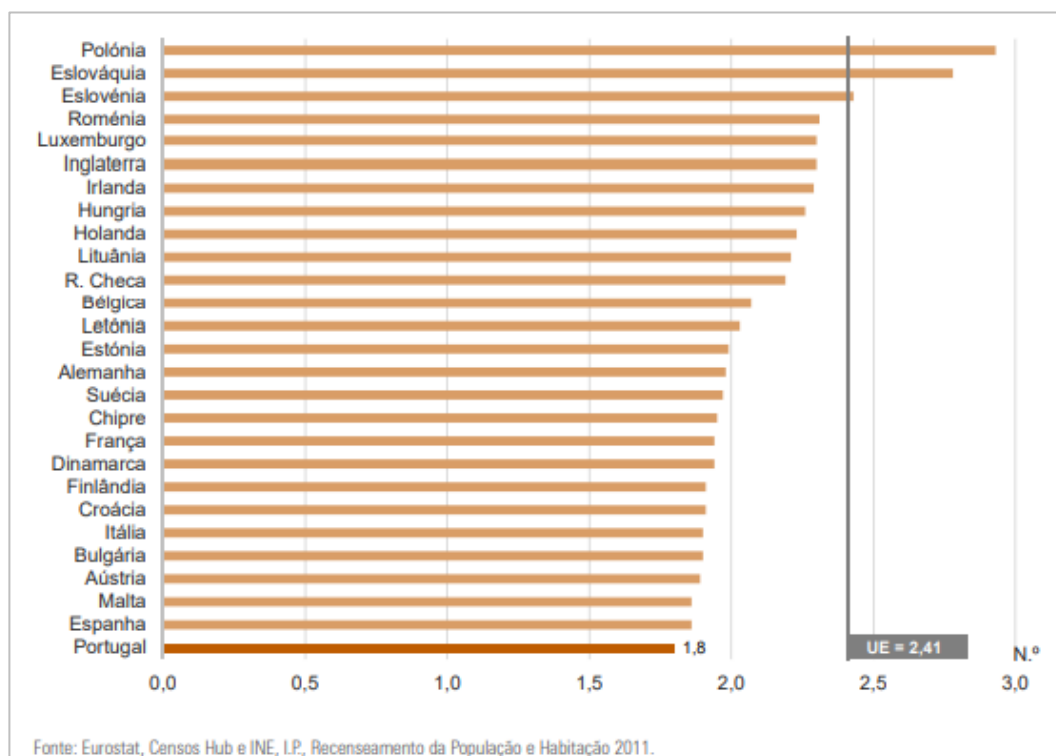


Figura 3.3. Habitantes por alojamento clássico, EU e países. Fonte: [23]

3.2. Caracterização do parque edificado

3.2.1. Considerações gerais

Segundo os dados provisórios dos Censos 2021, existem aproximadamente 6 milhões de habitações, sendo 99.8% de uso doméstico, das quais 70% referem-se a residência habitual. [24]

Cerca de 13% dos edifícios foram construídos antes de 1945 e aproximadamente 70% das habitações são anteriores a 1990, período em que ainda não existia regulamentação com requisitos térmicos [24].

Até 1930 os estilos arquitetónicos presentes na zona de Lisboa eram o pré-pombalino, o pombalino e o gaioleiro, onde a construção em alvenaria de pedra e de pedra argamassada e as coberturas e pavimentos em madeira constituíam os elementos da envolvente. A partir de 1950 os pavimentos de madeira foram substituídos por lajes de betão e, mais tarde, na década de 60, elementos estruturais como pilares, vigas e paredes resistentes de betão armado passaram a ser a prática mais comum, embora ainda muito diferentes das estruturas de betão armado atuais.

Na Figura 3.4 é possível ver a percentagem de edifícios existentes em 2021, dividido por época de construção.

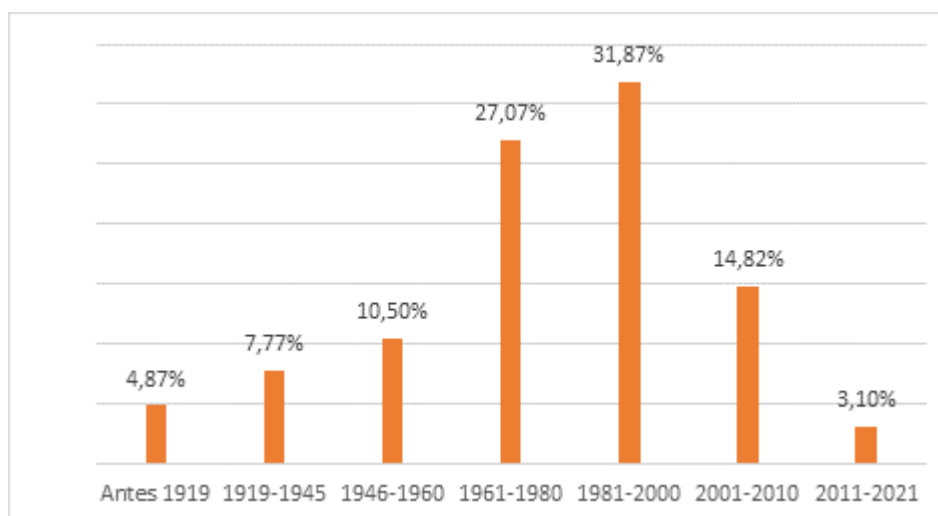


Figura 3.4. - Edifícios por época de construção. Fonte: [24]

3.2.2. Tipo de estrutura

Apesar dos edifícios com estrutura de betão armado serem os mais recentes, em 2011 já representavam cerca de metade do parque edificado de Portugal, demonstrando a grande adesão a este tipo de construção devida à sua versatilidade e possibilidade de construir edifícios com alturas significativas, sendo responsáveis por 95,6% dos edifícios com 7 ou mais pisos. Estes tiveram uma tendência de aumento progressivo e acentuado desde o seu aparecimento em 1930, representando 17% dos edifícios contruídos entre 1919 e 1945. Representam ainda 54,2% dos edifícios construídos entre 1971 e 1980. Já depois deste ano, os edifícios com estrutura de betão armado eram responsáveis por 60% do novo parque edificado [25].

É ainda de salientar que, as estruturas de betão armado também acarretam desvantagens e que, com a adoção deste estilo de construção, novas patologias apareceram nos edifícios. Ao criar uma estrutura de betão armado capaz de resistir às cargas a que o edifício está sujeito, as paredes deixaram de ter um papel resistente. Consequentemente, sofreram um aligeiramento e, portanto, uma redução de espessura assim como se começou a utilizar materiais com um desempenho térmico e acústico mais reduzido face à redução da necessidade estrutural da envolvente dos edifícios. Esta alteração do método construtivo propiciou o aparecimento de humidades na envolvente exterior.

O Instituto Nacional de Estatística divulgou em 2022, os Resultados Definitivos do XVI Recenseamento Geral da População e do VI Recenseamento Geral da Habitação, abreviadamente designados por Censos 2021, realizados no primeiro semestre de 2021 [26]. Contudo, esta última edição não contempla informações relativas à caracterização física do parque edificado (tipo de estrutura, revestimentos,

envolvente, entre outros), pelo que na presente dissertação será utilizada a informação disponível nos Censos de 2011 relativamente a estes assuntos. Sempre que possível e pertinente, será feito um cruzamento de dados de ambas as edições.

Os dados estatísticos dos Censos de 2011[25], mostram que sensivelmente um terço dos edifícios tinha estrutura constituída por paredes de alvenaria com laje de betão armado e, os restantes edifícios tinham tipos de estruturas menos representativos: paredes de alvenaria de pedra argamassada sem laje de betão (13,6%), paredes de alvenaria de pedra solta ou adobe (5,3%) e outros tipos de estrutura (0,8%), como pode ser vista na Figura 3.5.

Em termos cronológicos, Figura 3.6, a representação no parque edificado dos edifícios sem qualquer elemento de betão armado tem vindo a diminuir drasticamente, para um nível considerado residual [25].

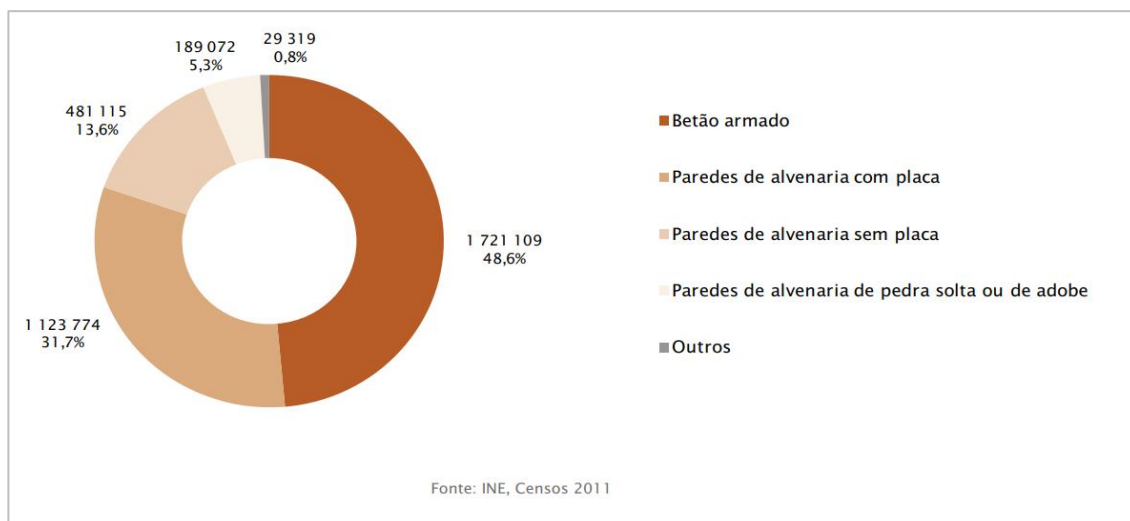


Figura 3.5. Número de edifícios por tipo de estrutura de construção. Fonte:[25]

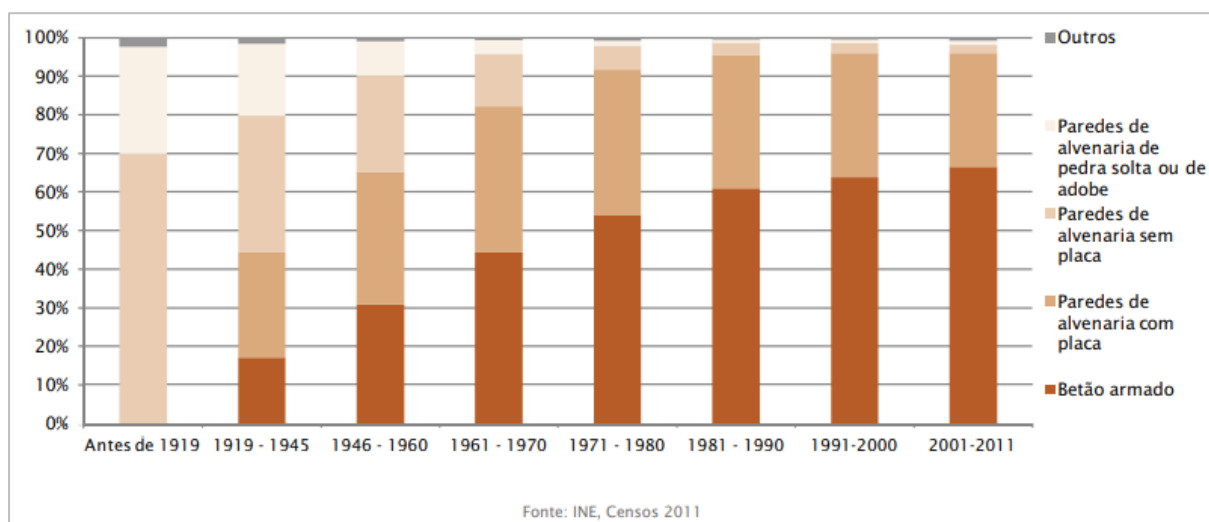


Figura 3.6. Distribuição de edifícios clássicos segundo o tipo de estrutura de construção, por época de construção de edifícios. Fonte:[25]

3.2.3. Revestimento exterior de paredes

Os edifícios em Portugal são caracterizados pelo uso abundante de revestimento de paredes em reboco tradicional ou marmorite. Estes, em 2011, eram responsáveis por 84% do total do parque edificado. A proporção dos restantes tipos de revestimento era minoritária: 11,6% em pedra, 3,8% em ladrilho cerâmico ou mosaico e 0,6% em outros revestimentos, conforme pode ser visto na Figura 3.7 [25].

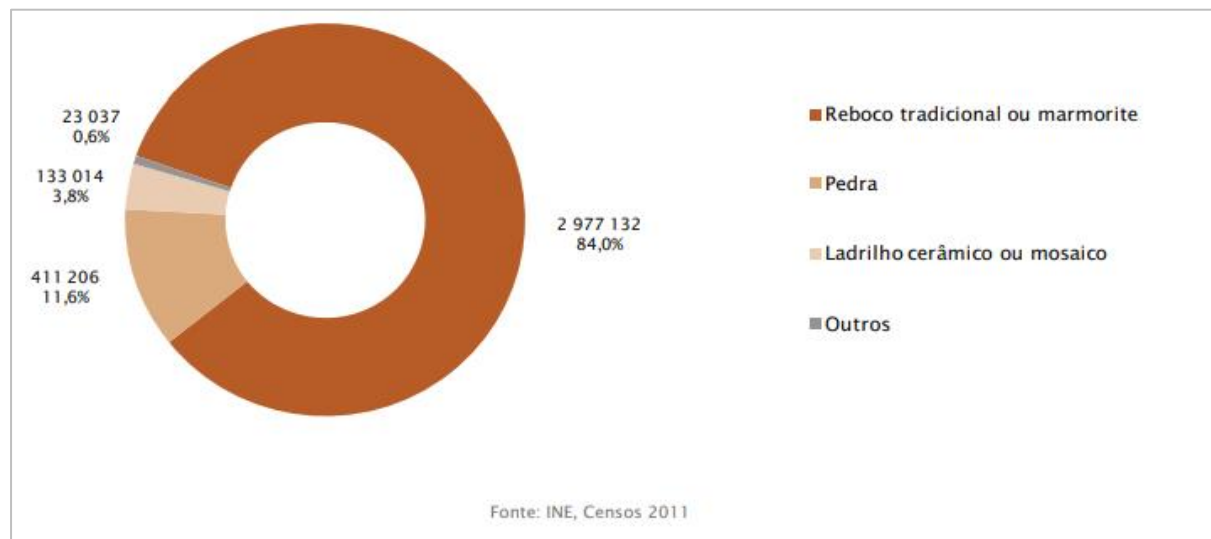


Figura 3.7. Número de edifícios de acordo com o tipo de revestimento exterior das fachadas. Fonte:[25]

Até 1970, o revestimento em reboco tradicional ou marmorite apresentava um crescimento progressivo, passando de 60% em 1919, até 90% entre 1981 e 1990. Após este pico, uma tendência de descida fez-se sentir, aliada ao facto de se construir em maior altura. Com o aumento do número de pisos aumentou também a proporção de edifícios com revestimento em ladrilho cerâmico. Em contrapartida, o número de edifícios com revestimento em pedra tem aumentado ligeiramente, também desde 1990 [25], como é possível observar na Figura 3.8.

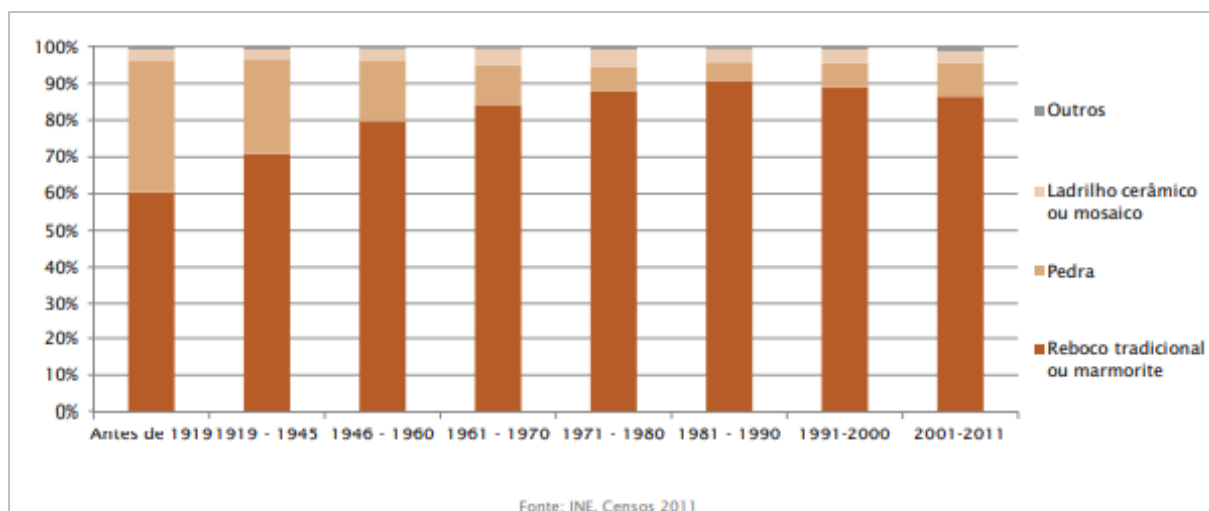


Figura 3.8. Distribuição de edifícios de acordo com o tipo de revestimento exterior das fachadas por época de construção. Fonte: [25]

3.2.4. Elementos verticais de zona corrente em envolvente exterior

Atendendo a que o primeiro regulamento das características de comportamento térmico de edifícios (RCCTE), entrou em vigor a 1 janeiro de 1991 e que, como referido, a maioria dos edifícios em Portugal foi construído quando esta regulamentação não existia, é de esperar que em grande parte do parque edificado, os valores do coeficiente de transmissão térmica, U , sejam muito superiores aos que hoje são estabelecidos na nova regulamentação, Tabela 3.1. Segundo o estudo realizado por Gouveia e Palma [27], o valor médio nacional de coeficiente de transmissão térmica de paredes é $1,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, não respeitando a legislação em nenhuma das três zonas climáticas previstas no regulamento.

Tabela 3.1 - Valores de $U_{\text{máx}}$ ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) para elementos verticais [19]

	Zona Climática		
	I1	I2	I3
Elementos verticais de zona corrente em envolvente exterior	0,50	0,40	0,35

Dados recolhidos pela Agência para a Energia (ADENE), em 2016 [28], quando cruzados com o descrito anteriormente tornam evidente a razão pela qual a maioria dos edifícios se comportam de forma insatisfatória em Portugal. Por outras palavras, visto que sensivelmente 70% das habitações foram construídas antes da implementação do RCCTE, em 1991, a generalidade desses edifícios não possuem isolamento térmico. Na Figura 3.9 é possível analisar a evolução regulamentar e de soluções

construtivas.

O segundo tipo de construção mais comum é o de parede dupla com espaço de ar, onde já é possível encontrar uma pequena espessura de isolamento térmico (IT), com cerca de 2 cm, à luz dos requisitos térmicos que vigoravam entre 1990 e 2006. Com o passar dos anos e com as restrições cada vez mais rígidas dos novos decretos de lei, a espessura de IT veio a aumentar de forma gradual, proporcionando um maior conforto térmico no interior das habitações, sendo comum nos dias de hoje, a escolha de espessuras de isolamento entre os 5 e 8 cm [28].

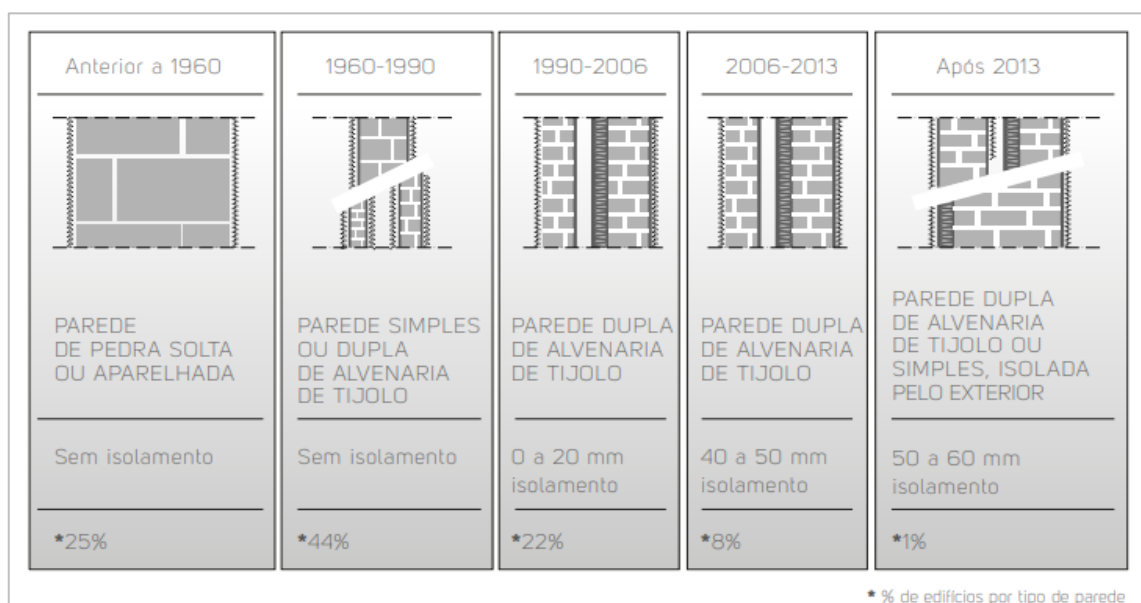
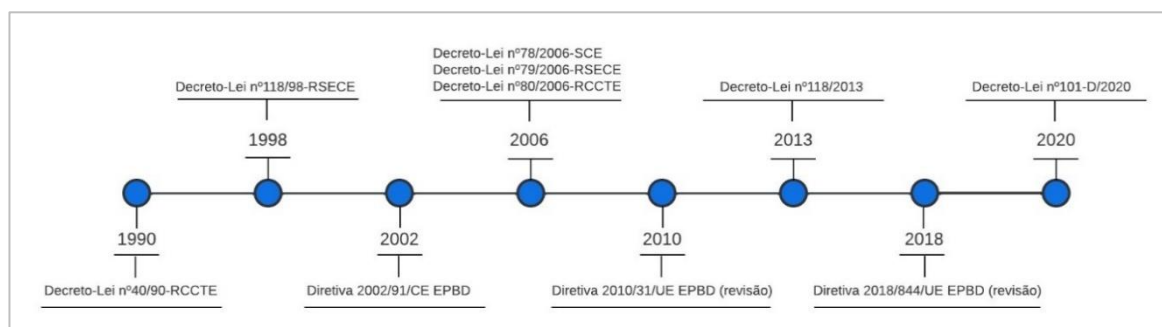


Figura 3.9. Evolução das soluções construtivas de paredes aliadas à evolução do regulamento da térmica.

Fonte:[28]

De forma a acompanhar o desenvolvimento das exigências regulamentares e a evolução dos valores regulamentares relativos ao coeficiente de transmissão térmica – U, construiu-se com o auxílio do ITE50, a Figura 3.10 e a Tabela 3.2. Os valores de coeficiente de transmissão térmica apresentados na tabela correspondem a uma solução construtiva característica da época em questão, permitindo assim comparar os valores de U das diferentes soluções tipo. É então visível que, num intervalo de sensivelmente 50 anos e, após 5 decretos de lei, os valores de coeficiente de transmissão térmica desceram aproximadamente 7 vezes, traduzindo um grande avanço no caminho para alcançar o conforto térmico no interior das habitações.

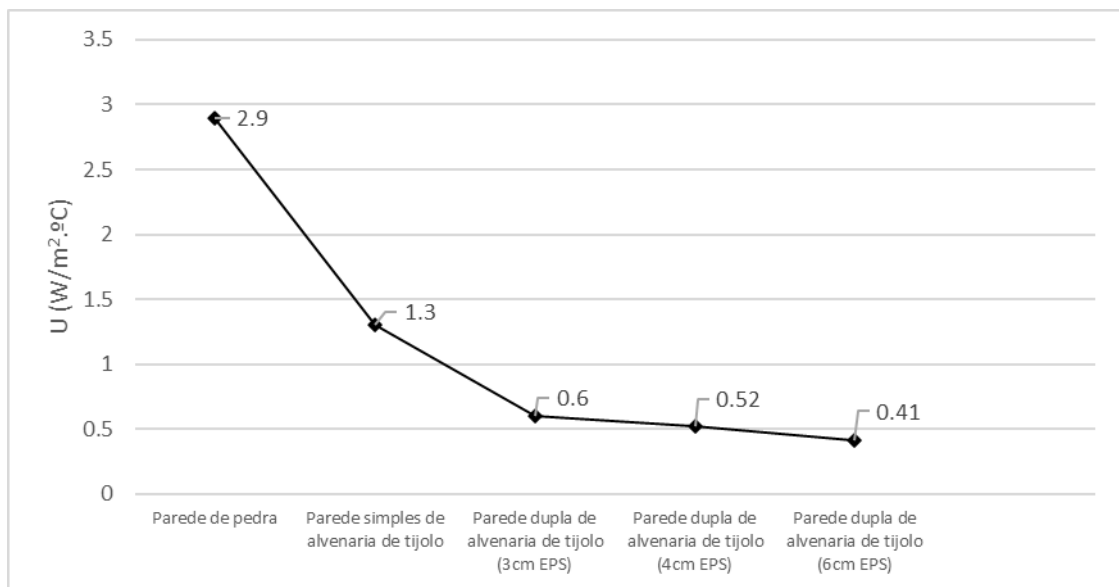


Figura 3.10. Valores de U para diferentes soluções construtivas

Tabela 3.2. Caracterização das soluções construtivas tipo

Época Construtiva	Solução Construtiva	Materiais	Espessura (m)	U (W/m ² °C)
<1960	Parede de pedra	Revestimento exterior	-	2.9
		Granito	0.6	
		Revestimento interior	-	
1960-1990	Parede simples de alvenaria de tijolo furado	Revestimento exterior	-	1.3
		Tijolo cerâmico furado	0.2	
		Revestimento interior	-	
	Parede dupla de alvenaria de tijolo furado	Revestimento exterior	-	1.1
		Tijolo cerâmico furado	0.11	
		Caixa de ar	-	
		Tijolo cerâmico furado	0.11	
		Revestimento interior	-	
1990-2006	Parede dupla de alvenaria de tijolo furado	Revestimento exterior	-	0.6
		Tijolo cerâmico furado	0.11	
		Caixa de ar	-	
		EPS	0.3	
		Tijolo cerâmico furado	0.11	
2006-2013	Parede dupla de alvenaria de tijolo furado	Revestimento exterior	-	0.52
		Tijolo cerâmico furado	0.11	
		Caixa de ar	-	
		EPS	0.4	
		Tijolo cerâmico furado	0.11	
		Revestimento interior	-	
>2013	Parede dupla de alvenaria de tijolo furado	Revestimento exterior	-	0.41
		Tijolo cerâmico furado	0.11	
		Caixa de ar	-	
		EPS	0.6	
		Tijolo cerâmico furado	0.11	
		Revestimento interior	-	
	Parede simples de alvenaria de tijolo furado, isolada pelo exterior	Revestimento exterior	-	0.45
		EPS	0.6	
		Tijolo cerâmico furado	0.2	
		Revestimento interior	-	

3.2.5. Elementos horizontais de zona corrente em envolvente exterior

Com base nos Censos de 2011, a grande tendência em Portugal são as coberturas inclinadas revestidas a telha cerâmica, visto que representavam aproximadamente 93% de todos os edifícios, conforme Figura 3.11. Porém, com o estilo arquitetónica da construção mais recente, a expressão das coberturas em terraço tem vindo a aumentar [25].

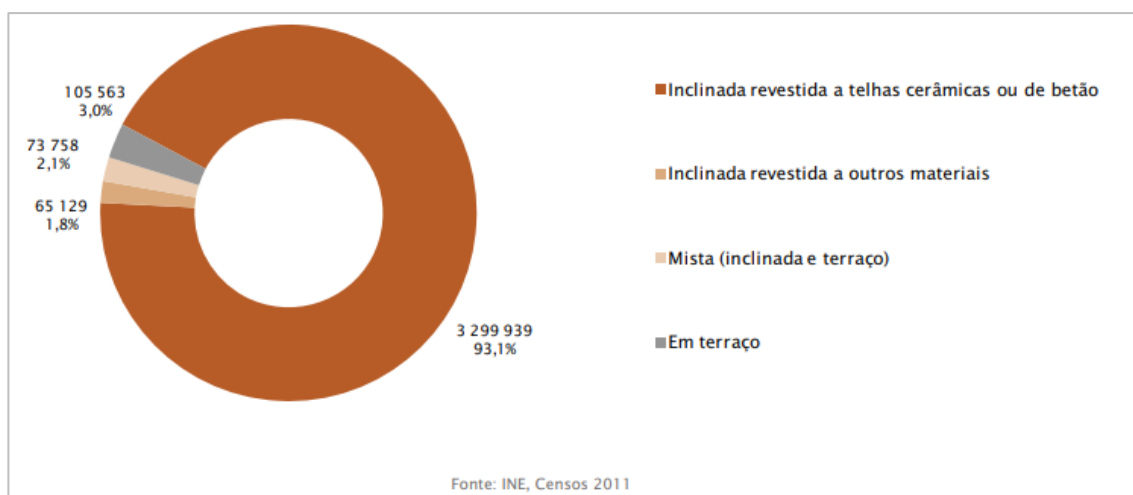


Figura 3.11. Número de edifícios segundo o tipo de cobertura. Fonte: [25]

À semelhança do que foi explanado nos elementos verticais em contacto com o exterior, os elementos horizontais também foram alvo da evolução da regulamentação térmica, sendo o padrão em tudo idêntico ao anterior. Em média, as coberturas são o elemento por onde se dão as maiores perdas de calor, sendo a regulamentação ainda mais rígida neste caso. Contudo, só a partir de 2006 se adota a prática de isolar a cobertura, conforme pode ser visto na Figura 3.12.

Segundo um estudo de Gouveia e Palma [29], o valor médio nacional de coeficiente de transmissão térmica em coberturas é $2,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, longe dos requisitos atuais, como pode ser visto na Tabela 3.3.

As coberturas, à semelhança dos envidraçados, são os elementos menos eficientes dos edifícios em Portugal.

Tabela 3.3- Valores de $U_{\text{máx}}$ ($\text{W/m}^2\text{°C}$) para elementos horizontais. Fonte:[19]

	Zona Climática		
	I1	I2	I3
Elementos horizontais de zona corrente em envoltente exterior	0,40	0,35	0,30

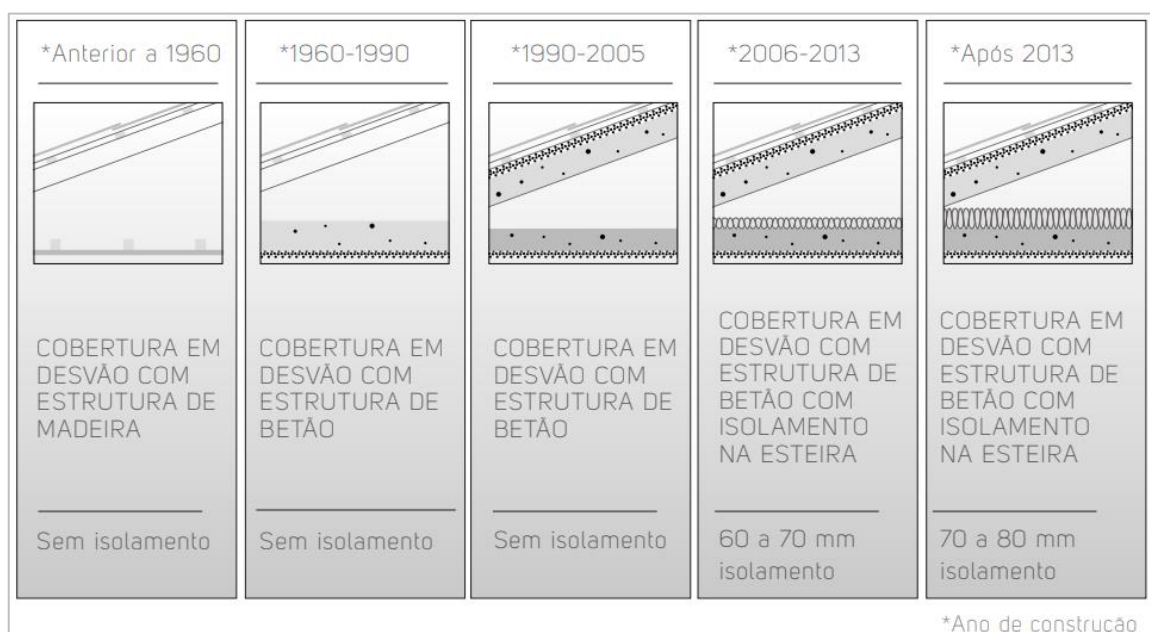
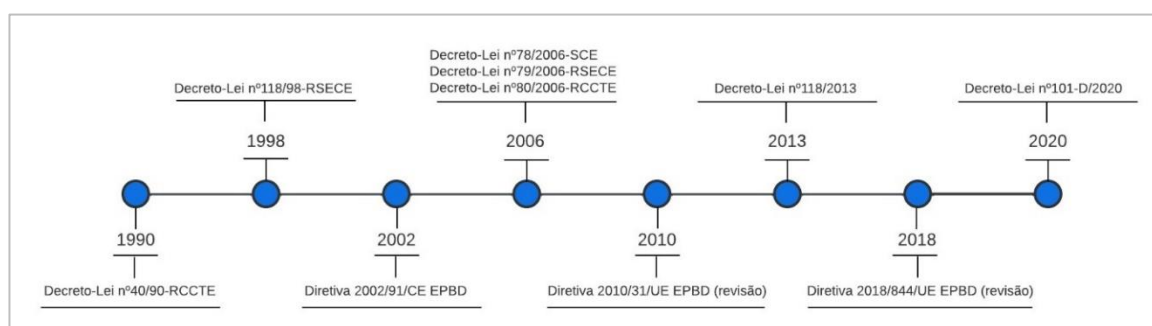


Figura 3.12. Evolução das soluções construtivas de coberturas aliadas à evolução da regulamentação da térmica.

Fonte: [29]

3.2.6. Vãos envidraçados

A envolvente exterior de um edifício é a principal barreira às trocas de calor entre o ambiente exterior e o interior, sendo constituída pelos elementos opacos, como paredes e cobertura e por vãos envidraçados. Estes, são um elemento essencial da envolvente de um edifício, quer em termos de proporcionar um ambiente iluminado e salubre, quer em termos de ganhos de calor para a habitação, sobretudo na época de aquecimento. Tratando-se de um ponto fraco na construção, por criar uma quebra na envolvente opaca, os envidraçados são responsáveis por uma parte significativa das perdas de calor, sendo de extrema importância a escolha de uma janela com boas características, tanto a nível do vidro como da caixilharia.

Em Portugal, segundo dados da ADENE [30], cerca de 75% das soluções dos envidraçados são de vidro simples, sendo que os valores de U podem variar entre $4,9 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para uma janela de vidro simples e caixilharia de plástico e, $6,0 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para uma caixilharia metálica sem corte térmico. Relativamente aos vidros duplos, aproximadamente 19% das habitações apresentam esta solução, onde os valores de coeficiente de transmissão térmica variam entre $3,2$ e $3,9 \text{ W/m}^2\text{°C}$, para caixilhariias de plástico e metal respetivamente. Por fim, 6% das casas apresentam vidro duplo e perfis isolantes. Esta é a solução com os valores de U mais satisfatórios, podendo chegar a números da ordem dos $2,0 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Foi ainda alvo de estudo [27], a determinação do valor médio nacional de coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados, chegando-se ao valor de $3,6 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Ora, comparando este valor com os máximos estipulados no Decreto-Lei n.º 101-D/2020, Tabela 3.4, é visível novamente o mau desempenho do parque edificado português.

Tabela 3.4-Valores de $U_{\text{máx}}$ ($\text{W/m}^2\text{°C}$) para vãos envidraçados. Fonte: [19]

	Zona Climática		
	I1	I2	I3
Vãos envidraçados	2,8	2,4	2,2

A existência de envidraçados pouco eficientes trazem grandes consequências para a habitação e para os seus ocupantes. Entre as patologias mais comuns, destacam-se as condensações superficiais devidas às variações de temperatura interior e exterior e a passagem de ar de forma descontrolada pelo envidraçado.

3.3. Classificação energética

Após uma análise de todos os dados apresentados, conclui-se que a situação atual do parque edificado em Portugal a nível de desempenho energético é rudimentar. Para conseguir caracterizar o comportamento energético das habitações utiliza-se uma ferramenta estipulada no SCE, denominada de certificado energético, no qual consta o cálculo dos consumos anuais de energia primária. Estes certificados classificam o edifício numa escala de 8 classes, de F (menos eficiente) a A+ (mais eficiente), conforme ilustrado na Tabela 3.5. Estes certificados tornaram-se obrigatórios desde 2009 e, até 2020 foram emitidos 1,76 milhões de certificados [31].

As classes energéticas (R_{nt}) traduzem o quociente entre o valor das necessidades nominais anuais de energia primária (N_{tc}) e o valor limite regulamentar para as necessidades nominais anuais de energia primária (N_t).

$$R_{nt} = \frac{N_{tc}}{N_t}$$

Tabela 3.5. Intervalo de valores de R_{nt} para a determinação da classe energética. Fonte: [32].

Classe Energética	Valor de R_{nt}
A +	$R_{nt} \leq 0,25$
A	$0,26 \leq R_{nt} \leq 0,50$
B	$0,51 \leq R_{nt} \leq 0,75$
B -	$0,76 \leq R_{nt} \leq 1,00$
C	$1,01 \leq R_{nt} \leq 1,50$
D	$1,51 \leq R_{nt} \leq 2,00$
E	$2,01 \leq R_{nt} \leq 2,50$
F	$R_{nt} \geq 2,51$

Segundo os dados da ADENE, sensivelmente um quarto dos edifícios sujeitos as certificações em Portugal têm uma classe energética de C, conforme Figura 3.13, o que significa que estes consomem mais energia do que o limite estipulado pelo regulamento. É preocupante constatar que 67% dos edifícios em Portugal têm uma classificação energética C ou inferior, mostrando a enorme propensão para o desconforto no interior dos edifícios, assim como para a pobreza energética, assunto que será abordado de seguida.

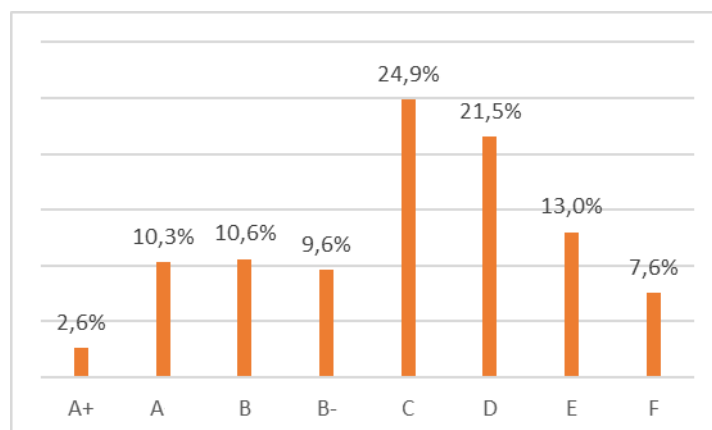


Figura 3.13. Classes energéticas do edificado português. Fonte: [32]

3.4. Estado de conservação

Os dados recolhidos pelo Instituto Nacional de Estatística em 2021 mostram ainda que, apesar de 64.2% dos edifícios não apresentarem necessidades de reparação, existiam mais de dois milhões e meio de edifícios carenciados de intervenção, número que não pode ser desprezado [26].

Como expectável, quanto mais antigo o edifício, maiores são as necessidades de intervenção, sendo que 65% dos edifícios construídos antes de 1919 estavam danificados, enquanto a quase totalidade dos edifícios contruídos entre 2006 e 2011 não necessitavam de reparações [26].

É também interessante cruzar os dados relativos ao estado de conservação e o desempenho energético por época de construção, como pode ser visto na Figura 3.14 e na Figura 3.15, onde é visível uma relação entre ambos. Uma vez que o parque edificado se encontra envelhecido e com necessidades de reparação, a eficiência energética é tanto menor, quanto maior o estado de degradação do edifício e a idade do mesmo.

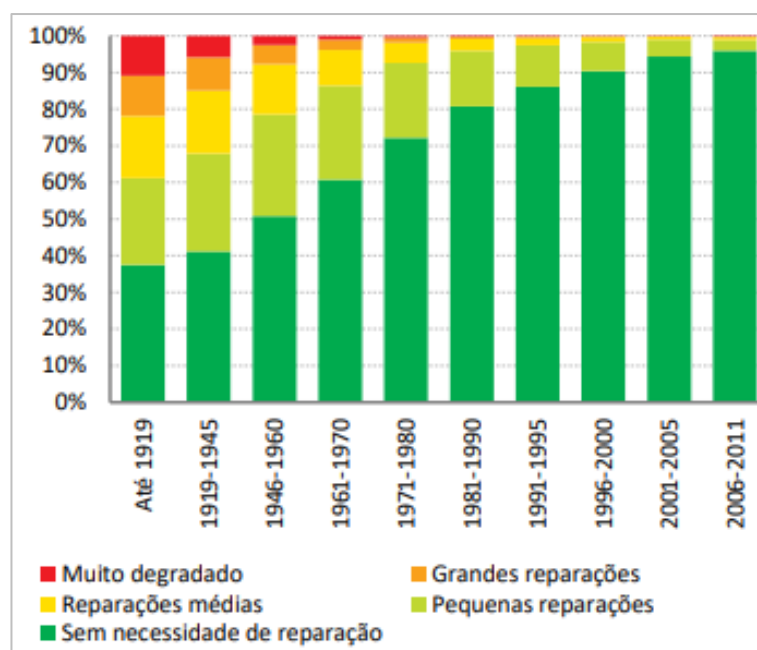


Figura 3.14. Estado de conservação por época de construção. Fonte:[25]

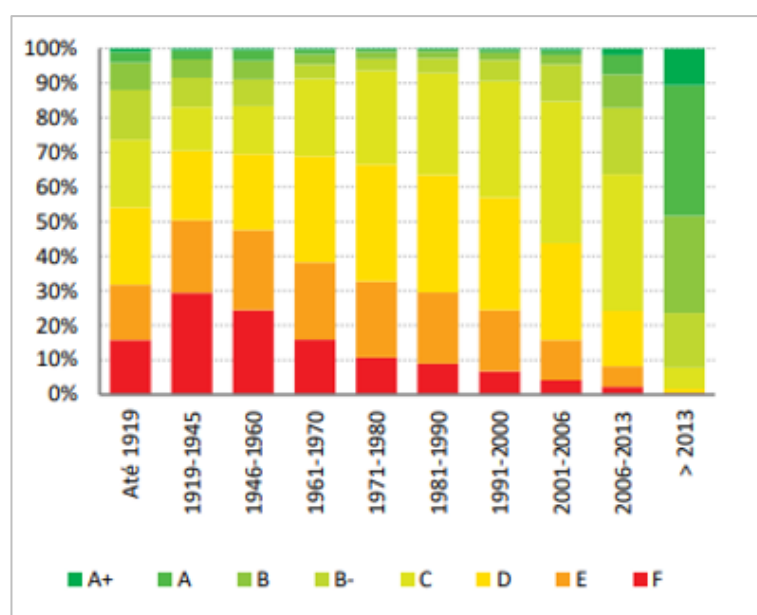


Figura 3.15. Desempenho energético por época construtiva. Fonte:[25]

4. Pobreza Energética

4.1. Enquadramento

Tendo reunido todos os dados relativos à situação do parque edificado em Portugal torna-se agora foco da presente dissertação, entender o modo como estes fatores influenciam a vida dos agregados familiares dentro de suas casas e a propensão existente para o desconforto no interior das habitações.

Desde o período neolítico, onde se deu início à sedentarização, o Homem sempre precisou de reunir fontes de energia necessárias para cozinhar ou para se aquecer e, já nessa altura haveria discrepâncias entre a quantidade de recursos a que cada agregado familiar conseguiria ter acesso. A pobreza de combustível é, portanto, um problema tão antigo quanto a própria raça humana [33].

Porém, o conceito de pobreza de combustível (*Fuel Poverty*, em inglês) é bem mais recente, tendo sido reconhecido como um problema pela primeira vez na década de 70, em Inglaterra, após a crise do petróleo de 1973-1974. Este termo estava associado à grande dependência do petróleo para a produção de energia, pois demonstrava ter um grande impacto na economia mundial e, definia o grau de desenvolvimento dos países [33]. A primeira definição surgiu em 1979, através de Isherwood e Hancock, que definiram que as pessoas que sofriam de pobreza de combustível eram as que “(...) *gastavam mais do dobro da média em combustível, eletricidade e energia*” [33]. Surgiram outros acrescentos a esta definição ao longo dos anos, culminando na clarificação do conceito em 1991, através do trabalho de Brenda Boardman, na sua publicação “*Fuel Poverty: From Cold Homes to Affordable Warmth*”, permitindo assim quantificar a pobreza de combustível do seguinte modo:

“(...) incapacidade de um agregado familiar obter uma quantidade adequada de serviços de energia para 10% do rendimento disponível.”

Esta definição foi utilizada pelo Reino Unido entre 2001 e 2011, sendo conhecido como o indicador “10%”, em que a razão de pobreza energética era dada por:

$$\text{Razão Pobreza Energética} = \frac{\text{consumo energético} * \text{preço energia}}{\text{rendimento}}$$

Em que, se a razão de pobreza energética fosse maior que 0,1, então o agregado familiar era considerado pobre energeticamente [34].

O Reino Unido tem estado na vanguarda da investigação deste tema, resultando em diversas definições nacionais revistas de pobreza energética (PE) e mecanismos para a detetar e resolver, tal como o “*Low income High Costs (LIHC) indicator*”, ou seja, o indicador de baixos recebimentos e altos custos. Devido às obrigações da UE, vários países formaram as suas definições de pobreza energética, sendo difícil obter uma única definição universal, muito devido ao facto de que a PE pode manifestar-se de diversas formas e com diferentes intensidades.

Contudo, é consensual entre a comunidade científica que a pobreza energética traduz-se na “incapacidade de obter um nível social e materialmente necessário de serviços energéticos domésticos”[35], sendo reconhecida a importância de incluir “todos os serviços energéticos cuja falta cause desconforto ou esteja associada a dificuldades” [20], não se focando só na capacidade de manter uma habitação a uma temperatura agradável nem no que se considera como necessidades básicas.

Pode ser fácil confundir a pobreza energética com a pobreza monetária, mas, estes dois conceitos não são equivalentes apesar de poderem estar interligados. Claro que um agregado familiar com rendimentos abaixo do limiar da pobreza está altamente em risco de sofrer de pobreza energética, porém existem também agregados que, para evitar despesas demasiado altas, se privam do uso de energia e, consequentemente não mantêm a sua habitação adequadamente aquecida ou arrefecida ou que se privam de determinados serviços energéticos.

4.2. Causas da pobreza energética

Segundo Bouzarovski, as causas da pobreza energética mundial dividem-se geograficamente em duas zonas: o norte e o sul global. Enquanto no Norte, a pobreza energética deve-se aos baixos rendimentos, ineficiência energética dos edifícios e aos preços elevados da energia, no sul global, deve-se maioritariamente à privação de energia [36].

Concentrando o foco nos países desenvolvidos [37], observa-se na Figura 4.1, representados pelas maiores áreas, as três principais causas de pobreza energética: os baixos salários, o preço da energia e, a eficiência energética das habitações. Posto isto, são as diferentes combinações entre estes fatores que vão ditar o impacto da pobreza energética de cada agregado.



Figura 4.1. Causas da pobreza energética e indicadores chave. Fonte: [37]

4.3. Baixos rendimentos vs preço da energia

Segundo a “World Health Organization”, a temperatura mínima de conforto térmico para uma habitação é de 18 °C, sendo aconselhado uma temperatura de 21°C para os grupos mais vulneráveis como os idosos, crianças e doentes cardiorrespiratórios. Acontece que manter a temperatura dentro das habitações neste intervalo torna-se dispendioso para muitas famílias, tendo em conta por exemplo o preço da eletricidade e o salário médio bruto. Os dois gráficos apresentados de seguida retratam a realidade nacional comparativamente ao resto da Europa, onde na Figura 4.3 é visível a grande discrepância salarial entre países, estando Portugal nos últimos lugares do ranking europeu, pese embora, o preço da eletricidade seja muito próximo da média da UE (Figura 4.2).

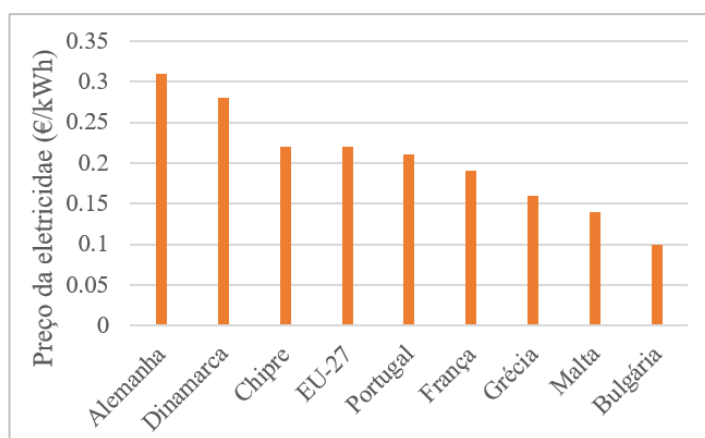


Figura 4.2. Preço da eletricidade em 2020 (€/kWh). Fonte:[38]

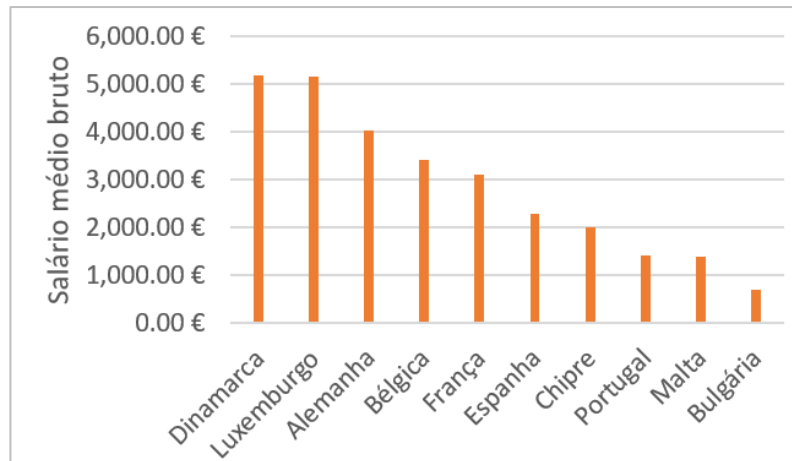


Figura 4.3. Salário médio líquido em 2020 [39]

É então visível a realidade que se vive em Portugal, onde os salários baixos aliados aos preços elevados da energia contribuem para evidenciar os problemas existentes na acessibilidade à mesma. Segundo dados da Eurostat [40], em 2019 Portugal era o país da Europa com a eletricidade mais cara em paridade com o poder de compra, levando a que Portugal seja também dos países onde mais consumidores domésticos tenham cortes no fornecimento de eletricidade devido ao não pagamento. Ou seja, se 70% dos certificados energéticos emitidos são de classe C ou inferior e, portanto, as casas são consideradas pouco eficientes e, se os agregados familiares não conseguem pagar as contas de eletricidade, então as famílias portuguesas não conseguem manter as casas adequadamente quentes no inverno. Todavia, a população portuguesa sofre uma dupla vulnerabilidade. Não só são incapazes de manter a casa adequadamente quentes como também a são incapazes de manter adequadamente fria no verão (Figura 4.4 e Figura 4.5).

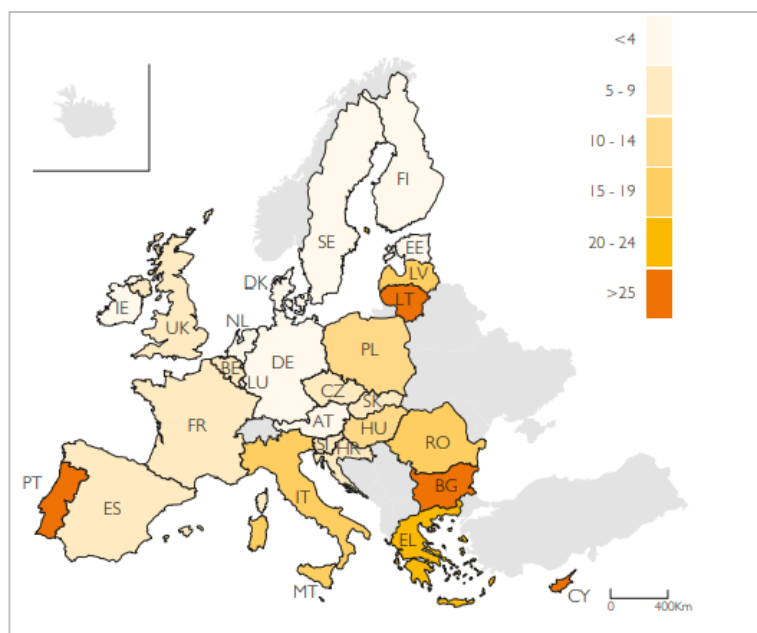


Figura 4.4. População incapaz de manter a habitação adequadamente quente, UE, 2008-18 (%). Fonte:[41]

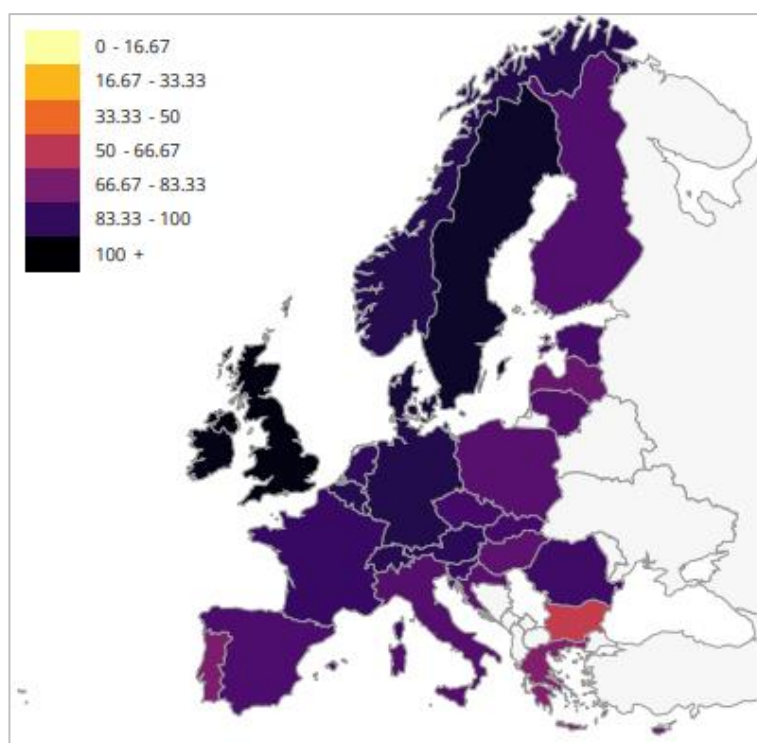


Figura 4.5. População que consegue manter a habitação adequadamente fria no verão, EU, 2012 (%). Fonte:[41]

No capítulo referente ao consumo de energia do setor residencial mostrou-se que, em Portugal, a percentagem de energia despendida no aquecimento do espaço era significativamente menor do que a média europeia e, constatou-se que simultaneamente, era dos países com uma temperatura média anual mais alta. Percebe-se agora que o fator que faz com que se utilize menos energia, não é o clima ameno, mas sim uma abstenção no consumo energético devido a problemas económicos.

4.4. Fraca eficiência energética dos edifícios

Outro fator responsável pela pobreza energética é a fraca eficiência dos edifícios, assunto já introduzido na caracterização do parque edificado português. Este é considerado pouco eficiente, já que sensivelmente 70% dos certificados energéticos emitidos são de classe C ou inferior, como já referido. É ainda de salientar que, os edifícios que possuem certificado energético são os que estão ou estiveram recentemente no mercado de compra e arrendamento de imóveis, visto que se tornou obrigatório a emissão de certificados energéticos desde 2013. Será de esperar, então, que o panorama real do edificado português seja pior do que aquele apresentado pelas estatísticas da ADENE e que a percentagem de edifícios pouco eficientes seja ainda mais alta. Neste âmbito [42], Portugal é o segundo país, atrás do Chipre, onde existe maior percentagem de pessoas a viver em habitações com infiltrações na cobertura, humidades em paredes, pavimentos ou alicerces, ou degradação em janelas ou pavimentos (25,5%), como é possível observar na Figura 4.6. Este é um indicador importante na deteção da pobreza energética e da má eficiência dos edifícios, salientando a baixa qualidade de construção de muitos edifícios residenciais em Portugal.

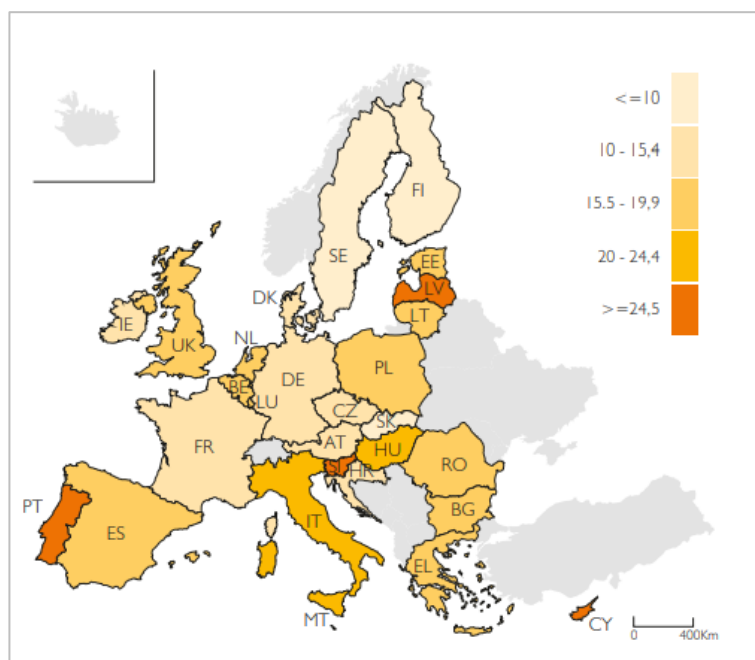


Figura 4.6. População a viver em habitações com infiltrações na cobertura, humidade em paredes, pavimentos ou alicerces, ou apodrecimentos em janelas ou pavimentos, UE, média 2007-17 (%). Fonte:[41]

É de seguida apresentado na Tabela 4.1 os valores máximos dos coeficientes de transmissão térmica (U) estipulados na Portaria 138-I/2021 de 1 de julho, para os elementos da envolvente exterior de edifícios, assim como os valores médios para Portugal dos mesmos elementos. Esta tabela permite compreender o porquê de os edifícios portugueses serem considerados pouco eficientes, visto que, por exemplo, para a zona climática de inverno I1, conforme Figura 4.7, os valores médios são todos

superiores aos valores limite, sendo os envidraçados os elementos mais vulneráveis à perda de calor em todo o continente, seguidos pelas coberturas e pelas paredes, onde o valor médio é também bastante superior ao limite.

Tabela 4.1 - Coeficientes de transmissão térmica máximos e médios da envolvente exterior (W/m².°C)

ELEMENTO	I1	I2	I3	MÉDIA NACIONAL
PAREDES	0,50	0,40	0,35	1,2
COBERTURA	0,40	0,35	0,30	2,1
ENVIDRAÇADOS	2,8	2,4	2,2	3,6

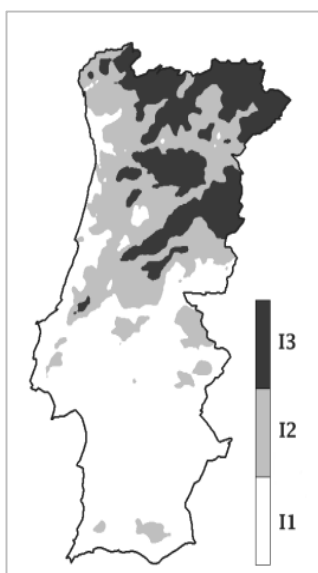


Figura 4.7. Zonas climáticas de inverno no continente. Fonte: [19]

4.5. Combate à pobreza energética

Estima-se que em Portugal, a pobreza energética afete entre 1,9 e 3 milhões de pessoas. Este é um problema que tem vindo a ser alvo cada vez de mais investigação e reconhecimento por parte não só da comunidade científica como da comunidade em geral, pese embora, ainda haja muito a fazer relativamente à implementação de medidas de combate à pobreza energética.

Para além dos problemas referentes à habitabilidade dos edifícios, este tipo de pobreza traz consequências à saúde e bem-estar dos ocupantes, tais como problemas respiratórios, cardíacos e até de saúde mental.

Determinar o número de pessoas em situação de pobreza energética e identificar os consumidores mais vulneráveis é uma premissa essencial para o seu combate. Apesar de ser uma tarefa dispendiosa e complexa, é fundamental conhecer o melhor possível a realidade nacional e até local para conseguir colmatar os impactos deste problema.

Uma das formas de reduzir o número de agregados que sofrem de pobreza energética passa por reabilitar o parque edificado, assunto discutido de seguida. A reabilitação de edifícios é uma das principais áreas de foco do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), onde nos próximos 5 anos, 300 dos 610 milhões de euros serão alocados à eficiência energética dos edifícios em Portugal [43].

5. Reabilitação higrotérmica de edifícios

5.1. Considerações gerais

Com o envelhecimento do parque edificado torna-se necessário tomar medidas de intervenção nos edifícios por forma a prolongar o seu tempo de vida útil. Para tal, existem várias operações, com objetivos distintos, que facilmente podem ser confundidos sendo essencial distingui-las [44]:

- **Restauro:** operações destinadas a restabelecer a unidade do edificio do ponto de vista da sua conceção e legitimidade originais;
- **Reconstrução:** ação de construir de novo um edifício, ou parte dela, que se encontre destruída ou em risco de destruição;
- **Reparação:** intervenções destinadas a corrigir anomalias por forma a manter o edifício no estado em que se encontrava antes da ocorrência da anomalia;
- **Reabilitação:** ações destinadas a aumentar os níveis de qualidade de um edifício, por forma a atingir a conformidade com as exigências funcionais mais severas do que aquelas para as quais o edifício foi projetado.

A reabilitação de edifícios afigura-se como uma das principais formas de sustentabilidade do setor da construção civil a nível mundial, visto que é uma alternativa que consome menos recursos como energia e materiais, não necessitando de um terreno novo para construção. Esta é uma grande mais-valia das obras de reabilitação, face à saturação de edifícios novos existentes em Portugal.

Todos os anos, o número de licenciamentos de obras novas é muito superior ao de obras de reabilitação, sendo que 2020 não foi exceção. Nesse ano, foram licenciados 13 101 edifícios em construções novas para habitação familiar, em comparação com os 4 747 edifícios para obras de reabilitação. Para além de serem sempre em número inferior, as obras de reabilitação licenciadas registaram decréscimos sucessivos desde 2015, atingindo um mínimo de 22,1% em 2020 [45], pese embora, entre 2011 e 2015, a tendência era de crescimento. Isto porque, Portugal entre estas datas recorria a ajuda financeira externa, o que levou à adoção de medidas politico-financeiras de austeridade concertadas pela Comissão Europeia, o Fundo Monetário e o Banco Central Europeu. O setor da construção civil foi muito abalado neste

período, principalmente o da construção nova, levando à adoção de uma estratégia diferente por parte dos construtores, que recorreram à reabilitação dos edifícios existentes.

De forma a conseguir incentivar a requalificação e revitalização das áreas mais degradadas, o Programa do XVII Governo Constitucional, em 2009, definiu uma série de incentivos fiscais à reabilitação urbana. O regime jurídico da reabilitação urbana, aprovada pelo Decreto-Lei n.º 307/2009, surgiu da necessidade de encontrar soluções para cinco grandes desafios que se colocavam à reabilitação urbana, sendo eles [46]:

- Articular o dever de reabilitação dos edifícios que incumbe aos privados com a responsabilidade pública de qualificar e modernizar o espaço, os equipamentos e as infraestruturas das áreas urbanas a reabilitar;
- Garantir a complementaridade e coordenação entre os diversos atores, concentrando recursos em operações integradas de reabilitação nas «áreas de reabilitação urbana», cuja delimitação incumbe aos municípios e nas quais se intensificam os apoios fiscais e financeiros;
- Diversificar os modelos de gestão das intervenções de reabilitação urbana, abrindo novas possibilidades de intervenção dos proprietários e outros parceiros privados;
- Criar mecanismos que permitam agilizar os procedimentos de controlo prévio das operações urbanísticas de reabilitação;
- Desenvolver novos instrumentos que permitam equilibrar os direitos dos proprietários com a necessidade de remover os obstáculos à reabilitação associados à estrutura de propriedade nestas áreas.

Com o Decreto-Lei n.º 53/2014, a promoção da reabilitação urbana por parte do Estado tornou-se ainda mais evidente, com a introdução do Regime excecional e temporário aplicável à reabilitação de edifícios, cuja construção tenha sido concluída há pelo menos 30 anos, onde era “...*permitida a não observância de normas legais ou regulamentares supervenientes à construção originária, desde que a operação de reabilitação urbana não origine ou agrave a desconformidade com essas normas...*” [47]. Estes edifícios estariam dispensados de aplicação de requisitos acústicos, térmicos, de eficiência energética, entre outros.

Mais recentemente o Decreto-Lei n.º 95/2019, que aprovou o Novo regime aplicável à reabilitação de edifícios, veio revogar o Decreto-Lei n.º 53/2014 [48].

Ao analisar a Figura 5.1, é possível observar a evolução da repartição entre a construção nova e as obras de reabilitação referido anteriormente.

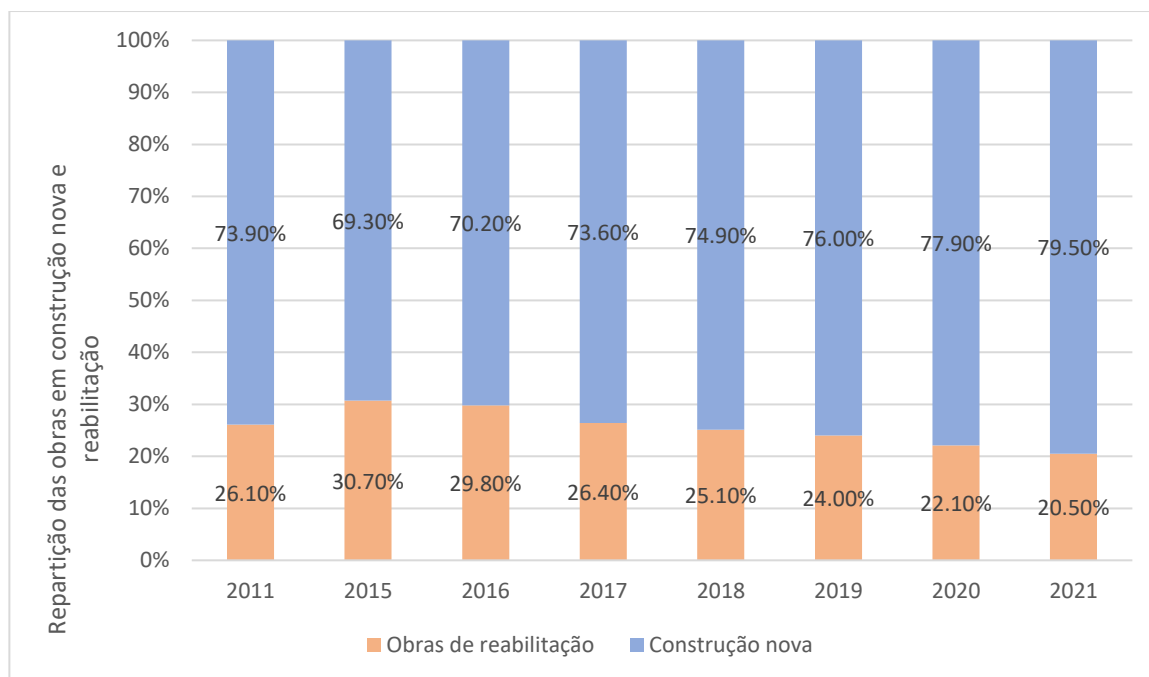


Figura 5.1. Evolução da repartição das obras de licenciamento em construção nova e reabilitação (2015-2021)

Fonte: [49]

Um dos problemas do excesso de construção nova e da redução do número de obras de reabilitação é a não preservação dos valores culturais associados aos edifícios. A reabilitação deve ser vista como um processo que agiliza o desenvolvimento e a regeneração das cidades de maneira a assegurar a longevidade do património, evitando a sua ruína, desvalorização e descaracterização.

Como se verificou, o setor da construção em Portugal está maioritariamente focado na construção nova, levando a que os valores de produtividade do segmento da reabilitação de edifícios fosse inferior à média europeia, em 2011, como se pode observar na Figura 5.2 [25]. Apenas países como a República Checa, Áustria, Eslováquia e Polónia apresentavam produtividades inferiores a Portugal.

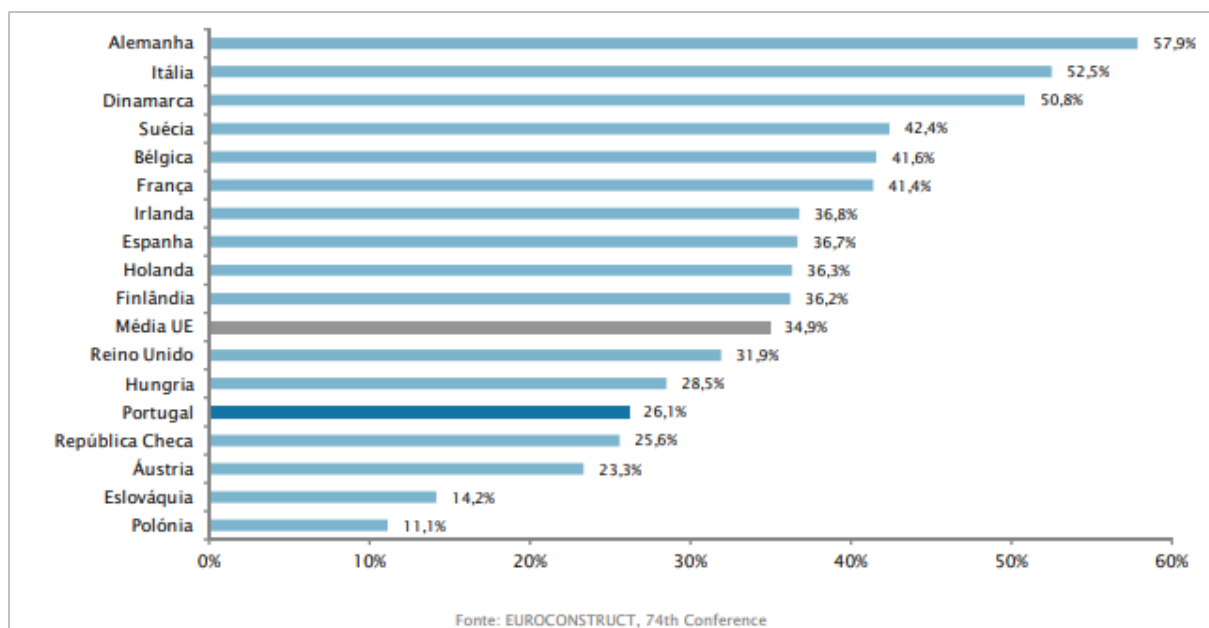


Figura 5.2. Produtividade do segmento de reabilitação de edifícios em países da UE, 2011. Fonte:[50]

Conforme constatado, existe um grande número de edifícios com necessidade de serem intervencionados devido ao seu pobre estado de conservação, ou seja, devida à presença de patologias que influenciam negativamente o conforto e a segurança no interior das habitações. Entende-se por patologia todas as manifestações que, ao longo do tempo de vida útil de um edifício, prejudicam o seu desempenho. Estas tanto afetam a envolvente exterior como a interior, sendo responsáveis pelo seu aparecimento inúmeros fatores.

As condições de conforto para os ocupantes no interior das habitações estão relacionadas com diversas variáveis, podendo estas ser agrupados em três grupos: características físicas, características fisiológicas e fatores externos. O primeiro grupo inclui a temperatura, a humidade relativa e a velocidade do ar. O segundo inclui características como a idade e o sexo. No terceiro contabiliza-se o tipo de atividade e a roupa [51].

Sendo o objetivo da presente dissertação o estudo higrotérmico de um edifício, foca-se agora a atenção nas características físicas, onde se enquadram os fatores de temperatura, humidade relativa e velocidade do ar que, quando não controlados, são também os principais geradores de anomalias no interior das habitações.

A temperatura e a humidade relativa são dois fatores que estão intimamente relacionados, na medida em que a alteração de um deles implica uma variação no outro e, consequentemente no estado higrotérmico do edifício. Assim sendo, faz sentido estudar estes dois em simultâneo.

5.1.1. Humidade relativa e temperatura

A humidade relativa traduz a relação entre a quantidade de vapor de água que o ar contém e a quantidade máxima de vapor de água que o ar poderia conter, à temperatura ambiente. Portanto quando se diz que está uma humidade relativa de 85%, significa que a quantidade de vapor de água presente no ar, corresponde a 85% da capacidade máxima que esse ar poderia ter à temperatura em questão [51]. Quando a humidade relativa atinge valores elevados, criam-se condições adequadas ao desenvolvimento de colonizações biológicas, uma anomalia bastante comum no parque edificado e responsável não só por criar uma sensação de desconforto no interior das habitações, assim como um ambiente não salubre. A maioria das espécies de fungos que se desenvolvem nos elementos construtivos, necessitam de uma humidade relativa entre os 70% e os 100% para proliferarem [51].

5.1.2. Estado higrotérmico do ar

Conforme referido, a concentração de vapor de água num ambiente provoca flutuações nos valores de humidade relativa. Todo o tipo de atividades que os ocupantes da habitação realizem como dormir, andar ou estudar são responsáveis pela libertação de vapor de água, assim como a realização de atividades domésticas correntes tais como banhos e confeção de alimentos. Esta libertação de vapor de água pode influenciar as condições do ambiente interior [51]. Assim, facilmente se percebe a importância da ventilação e da admissão de ar novo nos espaços interiores, de forma a obter um ambiente salubre, reduzindo a concentração de vapor de água e consequentemente a humidade relativa.

Com o intuito de melhor perceber a relação existente entre estes três fatores, apresenta-se agora um diagrama, chamado diagrama psicrométrico, presente na Figura 5.3. Neste, está presente no eixo das abcissas os valores de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), no eixo das ordenadas valores da concentração de vapor de água (g/m^3) e da pressão de saturação (Pa) e, um conjunto de curvas de humidade relativa (%).

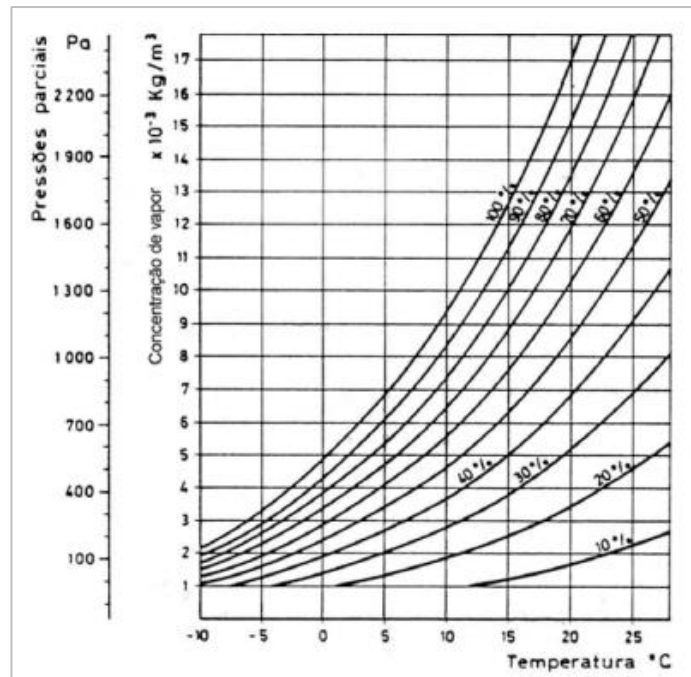


Figura 5.3. Diagrama psicrométrico. Fonte:[51]

Torna-se então nítido a relação existente entre temperatura, concentração de vapor de água e umidade relativa. Ambientes diferentes com a mesma umidade relativa terão temperaturas e concentrações de vapor diferentes, ambientes com a mesma concentração de vapor de água e temperaturas diferentes terão umidades relativas também diferentes, e ainda, ambientes com a mesma temperatura e concentrações de vapor diferentes resultarão em umidades relativas diferentes.

No entanto, a qualidade do ar interior (QAI) não depende unicamente da concentração de vapor de água, temperatura e umidade. Em ambientes internos, os ocupantes da habitação estão expostos, por longos períodos, a concentrações mais ou menos constantes de agentes poluidores gerados no próprio ambiente e oriundos do exterior.

O conforto térmico é um conceito não exato que depende de parâmetros individuais, físicos e ambientais. Segundo a ASHRAE, e conforme o definido na norma ISO 7730, conforto térmico é: “um estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico que envolve uma pessoa (nem quente nem frio)”[53]-[54].

Ambientes com reduzida taxa de renovações horárias do ar apresentam, por norma, elevadas concentrações de CO₂, partículas e microrganismos, para além de que quando associado a uma envolvente deficiente termicamente pode potenciar o aparecimento de alérgenos, bactérias e fungos.

5.1.3. Condensações superficiais

Por diminuição da temperatura, mantendo-se constante a concentração do vapor de água existente no ar (humidade absoluta), atinge-se a saturação, ou seja, a humidade relativa chega aos 100%. Aí ocorrerá a condensação do vapor de água que, quando acontece em paredes, tetos ou pavimentos, chamam-se de condensações superficiais [51]. Porém este não é o único motivo que pode provocar as condensações superficiais.

Quando a temperatura superficial é menor que a temperatura de ponto de orvalho, ou seja, quando a temperatura de uma superfície é menor que a temperatura para a qual o ar atinge a saturação, estamos também perante a ocorrência de condensações superficiais. Portanto, quanto mais baixa for a temperatura superficial dos elementos da envolvente, maior é a chance de ocorrerem fenómenos de condensações superficiais e, conseqüentemente, está-se perante as condições perfeitas para o desenvolvimento de bolores.

A proliferação das colonizações biológicas pode-se dar mesmo sem haver condensações visíveis, basta para isso estarem reunidas as condições ideais para o seu desenvolvimento. Uma das condições é obviamente a presença de oxigénio que, está garantida. Um intervalo de temperaturas entre os 5°C e os 25°C cria um ambiente propício ao seu desenvolvimento, o que se enquadra na realidade vivida dentro das habitações. Para além destes, a ausência de radiação solar incidente e a presença de níveis notavelmente constantes e elevados de humidade (70% a 100%) durante certos períodos de tempo é benéfico ao crescimento e desenvolvimento de bolores [55], como referenciado anteriormente. O fenómeno das condensações superficiais será novamente abordado no capítulo 5.2.2.3 .

5.1.4. Síndrome do edifício doente

As condensações superficiais, derivadas do efeito da temperatura, humidade e ventilação, são um sintoma bastante frequente naquilo a que se chama um edifício doente. O termo Síndrome dos Edifícios Doentes (SED), do inglês Sick Building Syndrome (SBS), pode ser definida como uma situação na qual os ocupantes / trabalhadores de um edifício específico, experienciam desconforto laboral e/ou problemas agudos de saúde. As queixas podem estar relacionadas com um compartimento ou com a totalidade do edifício [56].

Os efeitos sentidos pelos ocupantes de um edifício doente são variados e de intensidade diferente. Estes variam desde irritação ocular ou das vias aéreas a mal-estar, sonolência ou insónia. Mas podem ser também produzidas doenças mais graves, como hipersensibilidades, esterilidade, mutações genéticas ou cancro. Estima-se que 10% dos cancros de pulmão são causados pela má qualidade do ar dentro das casas. A qualidade do ar interior está relacionada não só com os ocupantes e suas actividades, mas também com os materiais utilizados na construção dos edifícios, com os equipamentos e mobiliário, com os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), e com a qualidade do ar

exterior [56]. Segundo a OMS, cerca de 30% dos edifícios a nível mundial são afetados pelo SED.

Estudos realizados pelo National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) [57] em vários edifícios, permitiram identificar os fatores responsáveis por uma deficiente qualidade do ar interior, sendo a principal a inadequada ventilação (52%). É ainda muitas vezes impossível identificar-se as eventuais causas do desconforto, Figura 5.4.

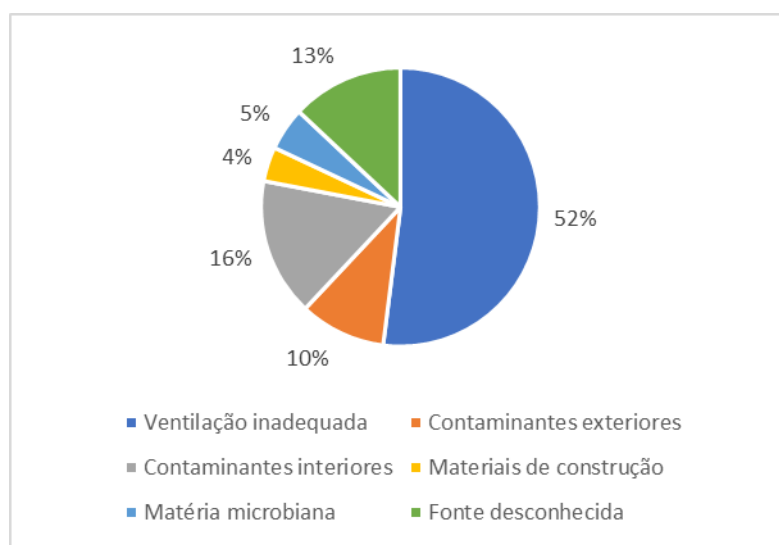


Figura 5.4. Fontes associadas à poluição interior. Fonte:[57]

5.2. Estratégias de reabilitação térmica

5.2.1. Considerações gerais

Neste subcapítulo analisar-se-á as várias possibilidades de tornar um edifício mais sustentável e eficiente energeticamente. Para tal, existem dois tipos de soluções que se podem adotar, as passivas e as ativas.

Caracteriza-se por uma solução passiva, aquela que integra o edifício em si para a redução do consumo energético, sem auxílio de ação mecânica. Por outras palavras, são aquelas soluções que permitem reduzir as necessidades de aquecimento/arrefecimento recorrendo a sistemas que não despendem recursos energéticos. Estas soluções passam pela forma, localização e orientação do edifício, sistemas de sombreamento, envolvente opaca, vãos envidraçados, iluminação natural, entre outros. Sendo o objetivo da presente dissertação a reabilitação de um edifício já existente, trata-se agora das soluções passivas que façam sentido ser aplicadas ao caso de estudo.

5.2.2. Reabilitação de paredes

5.2.2.1. Considerações gerais

Um dos elementos mais importantes de um edifício, tanto a nível estrutural como a nível de conforto, é a envolvente exterior opaca. Esta é constituída por paredes, pavimentos e coberturas e, é a primeira barreira entre o ambiente exterior e o interior. É através destas superfícies que vão ocorrer as transferências de calor que aquecem ou arrefecem uma divisão e, é sua função minimizar essas mesmas trocas de calor. As principais características destas envolventes a ter em consideração são a inércia térmica e o seu coeficiente de transmissão térmica [51].

5.2.2.2. Inercia térmica

A temperatura no interior de uma habitação é função da ocupação e das características da envolvente. Um ótimo exemplo do impacto que soluções construtivas distintas têm no comportamento térmico de um edifício é quando se compara a temperatura interior de uma igreja com a de uma casa de madeira, no mesmo ambiente. No caso de uma igreja, com paredes de grande massa, é sentido uma temperatura mais fresca no interior da igreja do que no exterior durante a estação de verão e o contrário no inverno. Já na situação da casa de madeira, com uma construção bastante ligeira, a diferença de temperatura entre o exterior e o interior é diminuta. O que provoca este fenómeno, entre outros fatores, são as diferentes massas dos materiais que constituem as envolventes exteriores.

O fluxo de calor (q) que atravessa uma parede pode ser facilmente calculado através da equação (1):

$$q = U(T_e - T_i) \quad (1)$$

Ao analisar a equação (1) percebe-se facilmente que para ocorrer fluxo de calor tem de haver um diferencial de temperaturas, entre o ambiente exterior e interior. Contudo, este fluxo não ocorre instantaneamente pela parede. Esta tem de acumular energia e aquecer gradualmente e, só ao fim de algum tempo, o calor atinge a outra face do elemento. A energia armazenada num elemento de construção é função do tempo, da massa volúmica, do calor específico e do volume do elemento [51].

Considere-se agora um caso onde as variações de temperatura exterior são periódicas e variam de forma sinusoidal, com os quais se pode calcular a média. Considere-se essa temperatura a temperatura exterior, (Figura 5.5a). Assumindo a temperatura interior como constante, veja-se a Figura 5.5b onde numa parede de massa infinitamente ligeira as transferências de calor se processam instantaneamente. Note-se que os valores positivos ou negativos do fluxo determinam o sentido em que a transmissão de calor ocorre. Note-se ainda que neste caso existe uma concordância total de tempo entre os pontos singulares dos gráficos a e b, não havendo qualquer desfasamento entre as temperaturas e os fluxos [51].

Se, pelo contrário, a parede tiver uma massa infinita, ocorreria um amortecimento total do fluxo de calor, ou seja, este nunca chegaria a atravessar a parede e a afetar o ambiente interior, como é visível na Figura 5.5c [51].

Nas situações correntes, os elementos de construção encontram-se num meio termo, em que a massa não é nula nem infinita, pelo que as curvas de variação de fluxo corresponderam aproximadamente ao apresentado na Figura 5.5d.

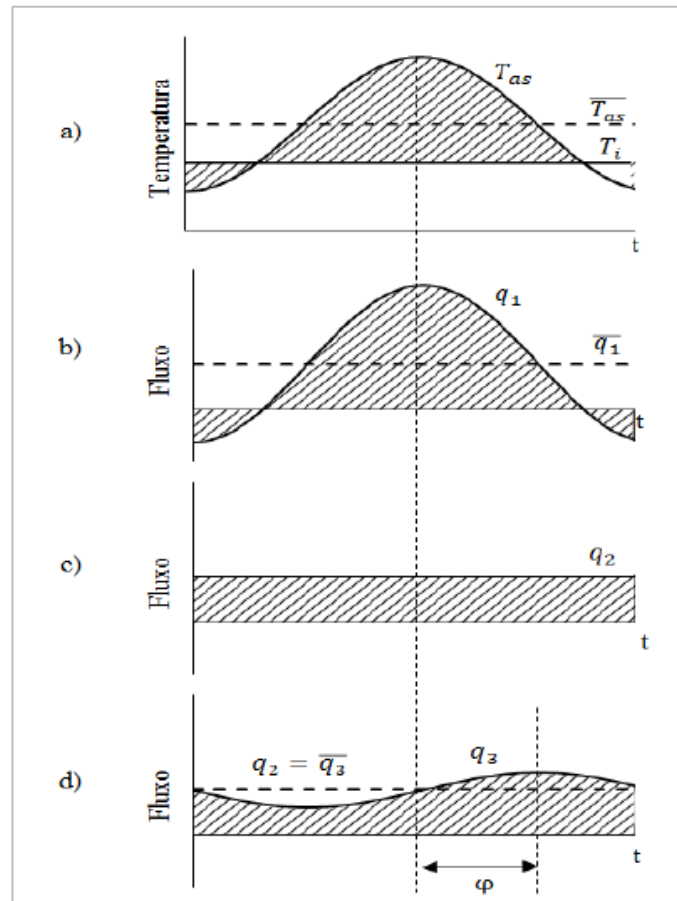


Figura 5.5 - Conceito de inércia térmica. Fonte:[51]

Entende-se por inércia térmica a capacidade que os elementos de construção têm em desfasar e amortecer o fluxo de calor que os atravessa [51], ou seja, quanto maior a inércia térmica de um edifício menor será a variação de temperatura no interior (amortecimento) e, mais distantes estão os picos de temperatura exterior e interior (desfasamento). Através da Figura 5.6, é possível observar graficamente estes conceitos.

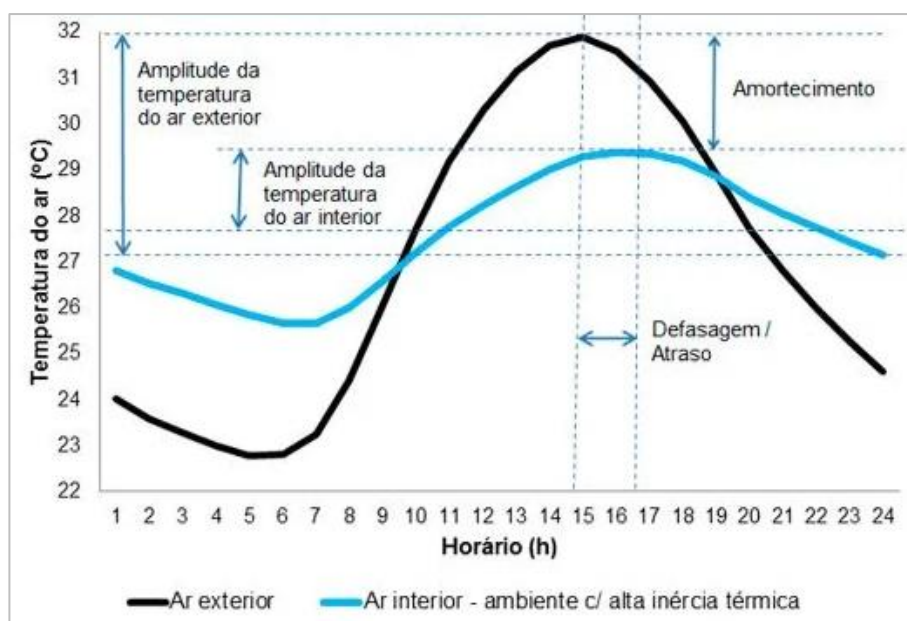


Figura 5.6. Inércia térmica, amortecimento e defasamento. Fonte:[51]

É ainda relevante salientar que, uma parede com os mesmos materiais, mas com uma solução construtiva diferente terá uma inércia térmica também diferente. De acordo com [58] é apresentado um quadro com diferentes soluções construtivas e com as suas vantagens e desvantagens. É interessante analisar que diferentes posicionamentos de uma camada de isolamento térmico influenciam o comportamento térmico da parede em questão.

Veja-se agora a Figura 5.7, que apresenta o caso de uma parede simples de alvenaria de tijolo furado com isolamento pelo exterior (à esquerda) e pelo interior (à direita).

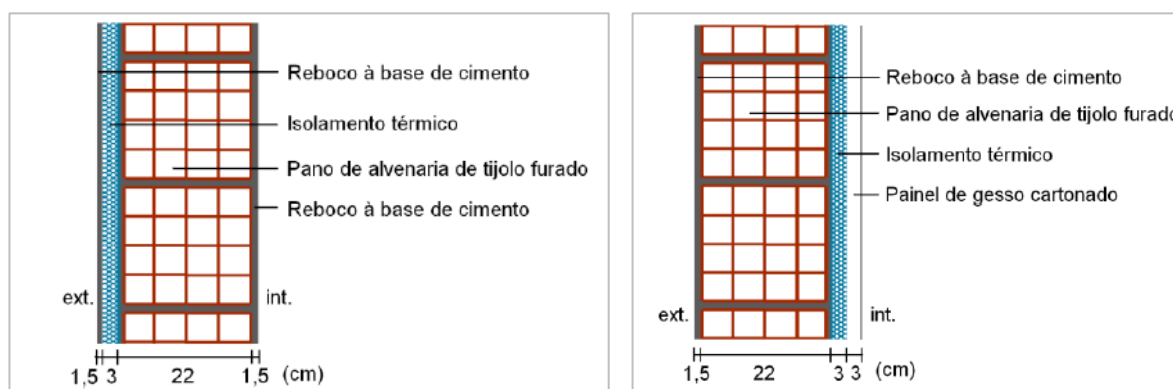


Figura 5.7. Soluções construtivas com isolamento térmico pelo interior e pelo exterior. Fonte:[58]

No caso de o isolamento térmico ser aplicado pelo exterior, como ETICS, toda a massa da parede contribui para a inércia térmica. Numa situação de inverno isto significa que, a totalidade da massa acumula o calor emanado pelo interior do edifício, como pelos aparelhos de aquecimento e ganhos devido à presença humana, e o retém dentro da parede, pelo facto de que isolamento está na face exterior

funcionando como barreira e impedindo que o calor se dissipe para o exterior. Mais tarde, nos períodos noturnos, esse calor é libertado de volta para o interior do espaço, aquecendo-o. Esta solução faz com que a temperatura no interior seja mais estável e que seja necessária menos energia para aquecer o espaço interior ao longo do dia. Por sua vez durante o verão, como o isolamento térmico está na face exterior, este funciona novamente como barreira mantendo a parede fria durante o dia evitando que haja um fluxo de calor considerável do exterior para o interior.

Porém, se se optar por colocar o isolamento térmico pelo interior, o paramento exterior já não contribui para a massa útil, reduzindo a inércia térmica do edifício. Na estação de aquecimento, como o isolamento está colocado pelo interior, o ambiente é aquecido mais rápido pela razão de não se ter de despende energia para aquecer a parede. Contudo, as variações de temperatura no interior são muito mais rápidas e maiores. Já na estação de arrefecimento, a parede estando desprotegida pelo exterior, aquece quando é atingida pela radiação solar. Consequentemente, existe um fluxo de calor para o interior, mas que é interrompido quando chega à superfície interior exatamente devido à presença do isolamento térmico. Esta barreira na face interior da envolvente, faz com que a divisão que é aquecida pela radiação que passa pelos envidraçados, fique presa no interior e, consequentemente, aqueça o interior da habitação.

5.2.2.3. Pontes térmicas

Uma ponte térmica (ver exemplo na Figura 5.9) é caracterizada por uma zona onde há alterações de geometria e das características dos materiais, como por exemplo a condutibilidade térmica que, afetam a direção do fluxo de calor. Este segue o caminho por onde há menos gasto de energia para atravessar a envolvente, ou seja, onde a resistência térmica é menor (elementos estruturais). Nas pontes térmicas, as linhas de fluxo deixam de ter um comportamento retilíneo, havendo uma maior concentração nessa zona, o que causa maiores trocas de calor, conforme Figura 5.8 [58].

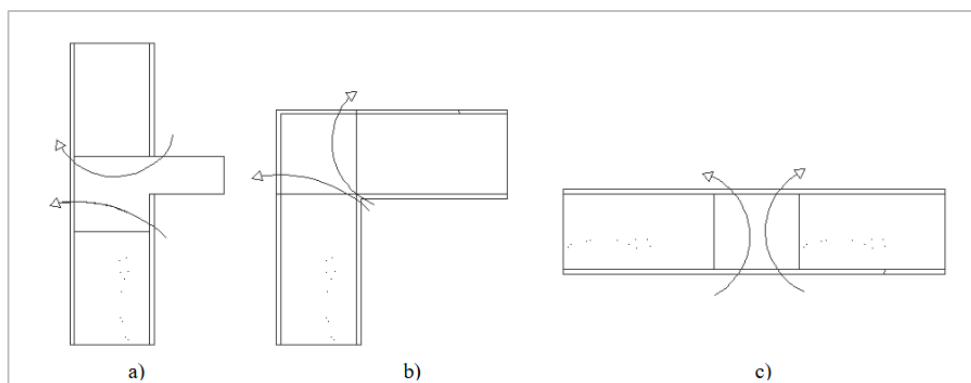


Figura 5.8-Tipos de pontes térmicas: a) corte vertical de uma ponte térmica devido à ligação da fachada com a laje; b) e c) corte horizontal de ponte térmica devido à ligação entre duas paredes verticais com transição entre materiais diferentes. Fonte:[58]

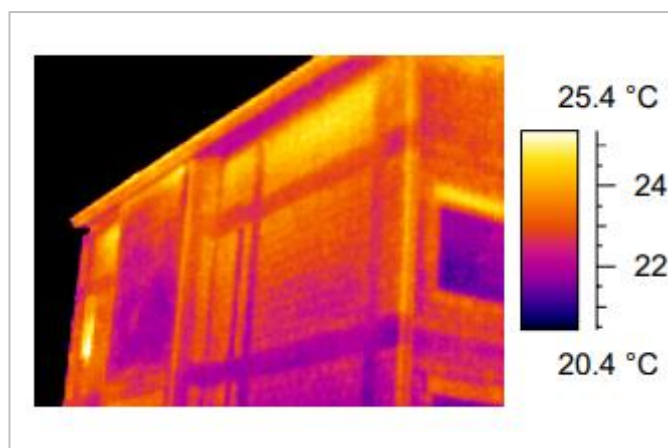


Figura 5.9. Pontes térmicas. Fonte: [37]

É ainda de referir que para além das pontes térmicas planas, já referenciadas, existem também as pontes térmicas lineares. Estas são constituídas pela ligação de dois ou mais elementos construtivos e caracterizam-se por um coeficiente de transmissão térmica linear ($W/m.^{\circ}C$) que, quando multiplicado pelo desenvolvimento linear da ponte térmica permite calcular as perdas nessas zonas [51].

Imaginando uma malha estrutural de um edifício, das zonas mais preocupantes são os vértices entre duas paredes exteriores ortogonais (Figura 5.10), devido à presença da própria ponte térmica e consequentemente das temperaturas superficiais mais baixas e à falta de radiação solar incidente, por exemplo na estação de inverno.



Figura 5.10. Ponte térmica linear. Fonte: [37]

De forma a ajudar a entender o impacto que as pontes térmicas têm na construção, analisa-se agora um exemplo dado em [51], onde num edifício os elementos construtivos têm os valores de U apresentado na Tabela 5.1. Nessa tabela, valores da temperatura superficial interior e de humidade relativa são também apresentados. Assume-se as condições exteriores de $0^{\circ}C$ e interiores de $18^{\circ}C$ e 75% de humidade relativa.

Tabela 5.1. Humidade relativa superficial em diversas zonas de um edifício. Fonte:[51]

Elemento	U (W/m ² . °C)	Θ _{si} (°C)	Hr (%)
Parede	0,7	16,4	83
Ponte térmica	2,1	13,1	100
Tecto	0,5	17,1	79

O estudo realizado por [51], sintetizado na Tabela 5.1 mostra que as zonas de ponte térmica, com maior U, apresentam temperaturas superficiais mais baixas devido ao ambiente frio que se faz sentir no exterior. Consequentemente, o ar em contacto com essas superfícies consegue reter menos vapor de água que, por sua vez, condensa a temperaturas mais baixas, conforme visto em 5.1.2. Assim, enquanto a humidade relativa do ar interior é de 75%, a humidade relativa superficial da ponte térmica é de 100%, havendo condensações superficiais nessa zona. Isto remete-nos para a importância da aplicação de isolamento térmico nestas zonas de descontinuidade.

5.2.2.4. Isolamento térmico

A aplicação de isolamento térmico é, salvo algumas exceções, benéfica em termos de conforto no interior do edifício. Esta barreira à transferência de calor, oriunda do exterior, possibilita grandes poupanças de energia ao evitar a utilização de equipamentos de aquecimento ou arrefecimento. Existem vários tipos de materiais e técnicas de isolamento, como visto anteriormente, dependendo a sua escolha do clima da zona de implantação, das características da própria envolvente e do grau de isolamento que se pretende obter.

Como já explicado, a colocação de uma camada de isolamento térmico pelo exterior ou pelo interior tem impacto na inércia térmica da parede, influenciando de forma profunda o comportamento higrotérmico do edifício. Contudo, existe ainda outro fator a salientar relativamente à posição do isolamento térmico.

Um sistema de isolamento eficaz passa pela aplicação de uma camada contínua nas paredes exteriores, cobrindo o máximo de área possível. Esta estratégia é conseguida quando se aplica o isolante pelo exterior, de forma ininterrupta e, cobrindo as pontes térmicas planas. Porém, este método é mais dispendioso quando comparado com a colocação de isolamento pelo interior e, por vezes, inviável no caso de edifícios mais antigos onde se pretende manter a fachada original intacta.

A aplicação de isolamento térmico pelo interior torna-se para além de mais económico mais prático visto, a sua aplicação, não depender das condições climáticas e facilmente se obtêm os níveis de isolamento desejados. Contudo, não permite de forma satisfatória a redução da influência das pontes

térmicas lineares e, inutiliza a inércia térmica da parede.

5.2.3. Reabilitação de elementos horizontais

As coberturas são as superfícies da envolvente que mais contribuem para as perdas de calor de um edifício, sendo que em edifícios antigos não isolados, 30 a 40% das perdas de energia ocorrem através dos telhados e coberturas [51]. O isolamento térmico de uma cobertura é considerado uma intervenção de eficiência energética prioritária, face aos benefícios imediatos em termos da diminuição das necessidades energéticas, e por se tratar de uma das medidas mais simples e menos dispendiosas [51].

Numa cobertura inclinada, da radiação solar que incide sobre o para-sol uma parte é refletiva e a outra absorvida. Devido a este acumular de energia, a temperatura superficial da cobertura inclinada aumenta, o que provoca perdas térmicas por convecção para o desvão e, por radiação para a laje. O fluxo de energia absorvido pela face exterior da laje é então dissipado novamente para o desvão, mas também para a face interior da laje, por condução, que é posteriormente dissipado para o interior da habitação, que aquece [51].

Numa situação de inverno, como o ambiente exterior está mais frio, as telhas que revestem o telhado também arrefecem, provocando a diminuição de temperatura do desvão por convecção. Aliado à convecção, ocorrem também fenómenos de radiação, mas desta vez no sentido inverso, ou seja, da laje para as telhas. Como a laje perde calor, o espaço interior também arrefece, funcionando de forma inversa à situação de verão [51]. Estes fenómenos estão ilustrados na Figura 5.11.

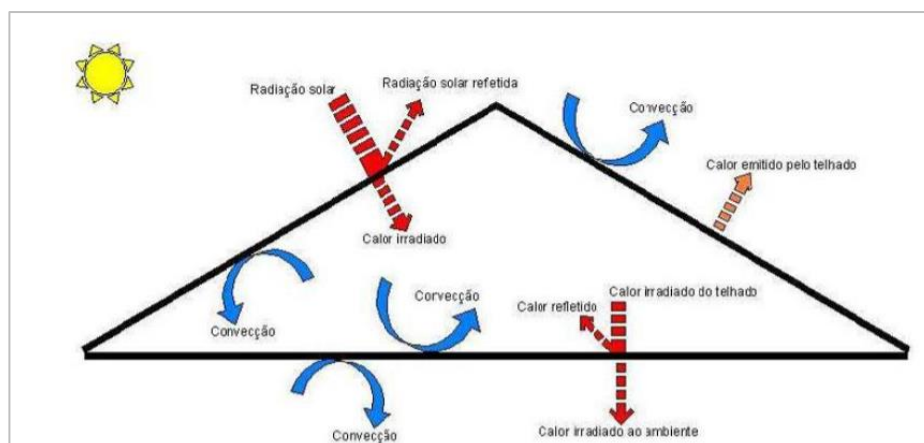


Figura 5.11. Transferência de calor numa cobertura inclinada com desvão

Existem duas formas de isolar uma cobertura. Uma delas é colocando o isolamento nas vertentes inclinadas e, a outra, isolando a laje de esteira.

5.2.3.1. Isolamento nas vertentes inclinadas

A maior parte do calor é perdido através do telhado, pelo que o isolamento desta zona reduz consideravelmente o consumo de energia. Um telhado inclinado é mais eficazmente isolado a partir do exterior, removendo as telhas para a colocação do isolamento. Esta solução reduz a temperatura do desvão, mas coloca em risco a ventilação desse espaço. O telhado poderá ser também isolado pelo interior, entre as vigas. Esta solução, de mais fácil implementação, não é tao eficaz como a anterior, mas tem a vantagem de não alterar a aparência da fachada [59].

5.2.3.2. Isolamento da laje de esteira

Outra solução bastante interessante é o isolamento da laje de esteira, ou seja, a que contacta com o espaço habitável e o sótão. Este desvão se não for aquecido nem utilizado como área de habitação tem potencial para melhorar a eficiência energética da habitação. Esta técnica é mais barata e de fácil execução que as anteriores. Se, em conjunto com a camada de isolamento, for aplicado um revestimento com um material com um coeficiente de absorção baixo, reduz-se a quantidade de energia que a laje absorve por radiação, melhorando ainda mais o comportamento higrotérmico do edifício. É importante ainda garantir a ventilação do desvão existente durante todo o ano, pois no verão arrefece o espaço e, no inverno diminui a humidade relativa [59].

5.2.4. **Reabilitação de vãos envidraçados**

Os elementos da envolvente de um edifício com maior coeficiente de transmissão térmica são, por norma, os envidraçados, como foi possível constatar no capítulo do parque edificado. Como tal, é através destes elementos por onde normalmente se dão as maiores trocas de energia e, onde o papel da reabilitação higrotérmica pode ter um papel decisivo. Estima-se que, em Portugal, cerca de 25 a 30% da energia consumida para aquecimento/arrefecimento é desperdiçada pelos vãos envidraçados devido à sua baixa eficiência energética [59].

Através dos vãos envidraçados podem existir três tipos de fluxo de energia, que se ilustram na Figura 5.12:

- Ganho de energia na forma de radiação solar;
- Ganhos e perdas de energia por condução, convecção e radiação;
- Trocas de ar (infiltração)

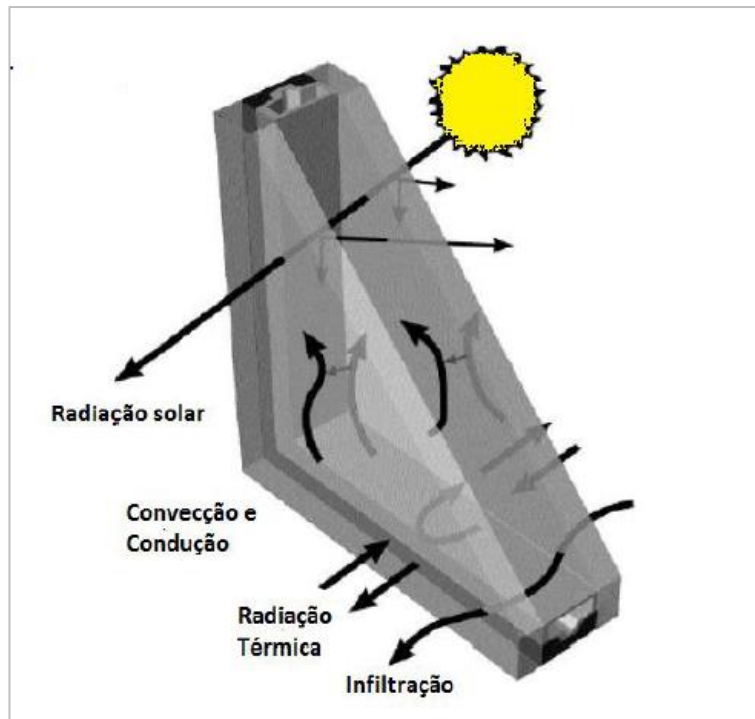


Figura 5.12. Fluxos de energia num vão envidraçado. Fonte:[59]

Existem, portanto, três fatores a ter em consideração, no que toca aos vãos envidraçados. A área da superfície envidraçada, a escolha da caixilharia e o tipo de vidro.

5.2.4.1. Área da superfície envidraçada

Se, por um lado, os envidraçados podem contribuir para a entrada de calor sem custos, por outro, podem ser consideradas como saídas através das quais o calor se dissipa. Assim, a área dos vãos envidraçados é de extrema importância. Se o edifício estiver orientado a sul, com uma área envidraçada de mais de 50% da superfície total do lado sul, a luz solar conseguida no inverno não aumentará significativamente, mas, as divisões situadas na parte sul ficarão expostas a um calor excessivo no verão, com a diminuição drástica do conforto e bem-estar. Já uma área envidraçada reduzida, apesar de evitar o sobreaquecimento no verão também diminui a luz solar, aumentando assim o consumo de energia associado à iluminação artificial e ao aquecimento [51].

5.2.4.2. Tipo de vidro

Sendo a maioria da área do vão envidraçado constituída por vidro, este é o responsável pela quantidade de calor e radiação solar que chega ao interior da habitação. De forma a controlar estes fluxos existem duas características que devem ser tomadas em conta, o coeficiente de transmissão térmica e o fator solar.

Existem várias formas de melhorar o coeficiente de transmissão térmica do vidro, tais como aplicar:

- Vidros duplos: reduz-se pouco a transmissão de luz, comparativamente ao vidro simples e, a caixa de ar garante uma maior resistência térmica;
- Vidros coloridos: absorvem o calor e reduzem a transmissão de luz;
- Vidros e películas refletivas: reduzem o ganho de calor solar e a passagem de luz, através do efeito de espelho;
- Camadas de baixa emissividade: garantem a reflexão da radiação solar de maior comprimento
- Gases de baixa condutibilidade: quando inseridos nas caixas de ar, diminuem as perdas/ganhos por condução, reduzem a ocorrência de condensações e não reduzem a transmissão de luz visível.

Para além do coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados é importante considerar o fator solar do vidro. Este representa o quociente entre a energia transmitida para o interior através do vidro e a energia da radiação solar que nele incide [51]. Assim, se um vidro tiver um fator solar de 0,85, significa que 85% da radiação solar que nele incide o atravessa.

5.2.4.3. Caixilharia

O vão envidraçado é composto pelo vidro e pela caixilharia. Já explicado o impacto que o vidro tem no conjunto, falta agora perceber a influência da caixilharia. Dependendo do seu material, podem tornar o conjunto mais ou menos eficiente, sendo que se trata de pontos fracos do vão envidraçado, devido ao seu alto coeficiente de transmissão térmica que aumenta o valor de U do conjunto, Figura 5.13.

A caixilharia é também responsável pela permeabilidade ao ar da envolvente, sendo que se trata de zonas que permitem a admissão de ar, promovendo a ventilação natural do edifício.

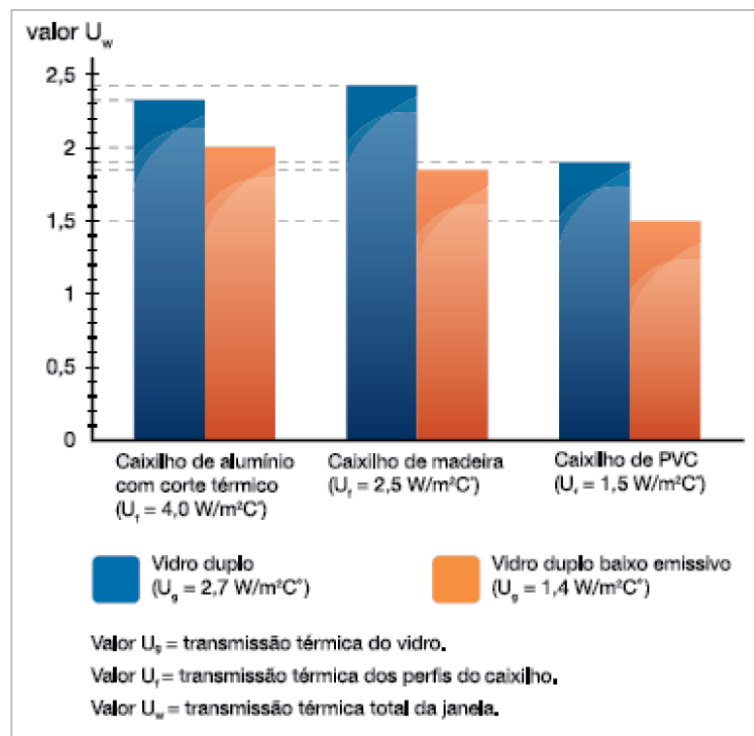


Figura 5.13 - Valores de U_g , U_f e U_w para diversas soluções de envidraçados. Fonte: [36]

5.2.5. Ventilação

A ventilação do ambiente interior de um edifício é um fator determinante nas condições de conforto. Não só cria um ambiente saudável e agradável como evita o aparecimento de patologias. Existem vários tipos de sistemas de ventilação, podendo ser classificados como sistema de ventilação natural, sistema mecânico ou sistema misto [60].

Entende-se por sistema de ventilação natural o sistema constituído por componentes, designadamente, aberturas, passagens de ar interiores e condutas, que permitem assegurar, em termos médios, a renovação de ar exclusivamente promovida pelos efeitos da diferença de temperatura e ação do vento, sem qualquer sistema mecânico [60].

A ventilação com recurso a meios mecânicos baseia-se na utilização de sistemas e equipamentos que promovam a renovação do ar interior por extração e/ou insuflação de ar [60].

Já os sistemas de ventilação mistos, são uma combinação dos dois sistemas descritos anteriormente, sujeitos a controlo por parte dos utilizadores ou automático, destinando-se os equipamentos mecânicos a intensificar a ventilação nos compartimentos de serviço [60].

Sendo o objetivo da dissertação o estudo de técnicas passivas de reabilitação, foca-se agora o estudo nos sistemas de ventilação natural.

A ventilação natural de um edifício é baseada nos mecanismos de tiragem térmica ou de diferenças de pressão entre o interior e o exterior, causadas pelo diferencial de temperaturas.

Em suma, o processo de ventilação natural ocorre com a admissão de ar através de aberturas nos compartimentos principais, como salas de estar e quartos, que permitem a entrada de um caudal suficiente para garantir as renovações de ar impostas por lei. O ar admitido no interior da habitação, através dos compartimentos principais, deve poder circular dentro do fogo até aos compartimentos de serviço (cozinha e instalações sanitárias), mesmo quando as portas de comunicação entre eles estão fechadas. É nos compartimentos de serviço que se dá a evacuação do ar de modo independente de qualquer ação dos utilizadores, o que pressupõe a existência de condutas de exaustão nesses locais que conduzam o ar viciado ao exterior [51] [61].

6. Metodologia

6.1. Considerações gerais

Nesta dissertação pretendeu-se estudar o impacto de várias soluções de reabilitação térmica da envolvente, com recurso a um modelo de simulação dinâmica de um edifício existente. Para a execução do estudo higratérmico foi considerada uma fração autónoma inserida numa habitação multifamiliar sita em Sabóia, no distrito de Beja. Esta fração é utilizada como 2ª habitação, estando ocupada unicamente em altura de férias dos proprietários.

A metodologia utilizada para esta análise consistiu primeiramente na modelação do caso de estudo, através do sistema de coordenadas do EnergyPlus. Este programa foi utilizado como ferramenta de simulação dinâmica, térmica e energética. Com o intuito de avaliar o impacto da implementação de diferentes soluções construtivas, foi necessário calibrar e validar o modelo com base numa campanha de monitorização realizada ao longo de um ano, que recolheu dados de temperatura e humidade relativa.

O modelo validado e calibrado foi utilizado, numa primeira fase, para avaliar a eficácia da adoção de diferentes espessuras de isolamento térmico nas paredes e de diferentes vãos envidraçados, em termos de temperatura e humidade relativa interiores. No total foram definidas 4 soluções de envolvente opaca, com um incremento da espessura de isolamento térmico pelo interior e, 16 soluções de vãos envidraçados conjugando diferentes coeficientes de transmissão térmica com diversos fatores solares.

Numa segunda fase o objetivo foi comparar o desempenho energético da fração em estudo com as diferentes soluções construtivas. Para tal, foi definida uma base de referência comum a todas as simulações para estimar as necessidades energéticas, conforme estipulado no manual SCE para edifícios de habitação. Ou seja, para a avaliação em condições nominais dos balanços de energia (N_{ic} e N_{vc}), considerou-se que todas as simulações teriam:

- Uma temperatura interior mínima de 18 °C na estação de aquecimento e uma temperatura interior máxima de 25 °C na estação de arrefecimento;

- A ativação das proteções solares quando a radiação incidente no envidraçado for superior a 300W/m^2 ;
- Ganhos internos constantes de 4W/m^2 .

6.2. Caso de estudo

6.2.1. Descrição geral

Para o desenvolvimento do estudo higrotérmico selecionou-se um edifício multifamiliar localizado na aldeia de Sabóia, no município de Odemira, distrito de Beja (Figura 6.1).

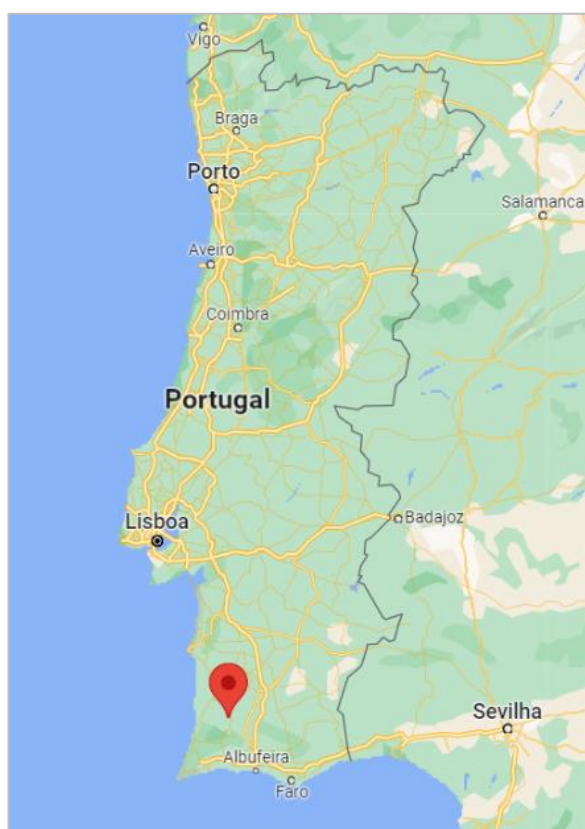


Figura 6.1 - Localização do caso de estudo

O caso de estudo trata-se de um edifício da década de 70/80, com 3 pisos e uma estrutura porticada em betão armado e alvenaria em pano simples de tijolo cerâmico. Inicialmente foi construído com o intuito de desempenhar o papel de cinema e salão de festas, tendo sido reconvertido no final da década de 90 em edifício de habitação multifamiliar com reabilitação profunda, sem, contudo, se ter alterado a solução de paredes, pisos e cobertura, e permanecendo sem qualquer tipo de isolamento térmico.

Como já mencionado, o primeiro regulamento térmico foi publicado em 1990 e refere que estão abrangidas por este "...as grandes intervenções de remodelação ou de alteração na envolvente..." e que se

entende por grande intervenção "...as intervenções na envolvente ou nas instalações cujo custo seja superior a 25% do valor do edifício" [1]. Assim, o edifício em estudo aquando da intervenção a que foi sujeito e, já estando abrangido pelo RCCTE, teve de cumprir os requisitos impostos por este, abordados em 2.3.

6.2.2. Arquitetura

O edifício, de 3 andares habitáveis (Figura 6.2, Figura 6.3, Figura 6.4, Figura 6.5, Figura 6.6), pé direito de 2,6m e planta retangular, está organizado da seguinte forma:

- Piso -1:
 - 1 garagem;
 - 1 fração autónoma de tipologia T1 com 1 sala, 1 instalação sanitária, 1 zona de circulação, 1 cozinha e 1 quarto.
- Piso 0:
 - 1 fração autónoma de tipologia T1 com 1 open space, 1 instalação sanitária e 1 quarto;
 - 1 fração autónoma de tipologia T4 com 1 sala, 2 instalações sanitárias, 1 zona de circulação, 1 cozinha, 4 quartos e 1 sala de arrumos (selecionada como caso de estudo);
- Piso 1:
 - 2 frações autónomas simétricas de tipologia T2, sendo cada uma constituída por: 1 sala, 1 instalação sanitária, 1 zona de circulação, 1 cozinha e 2 quartos.
- Cobertura:
 - Com desvão fortemente ventilado e 4 águas

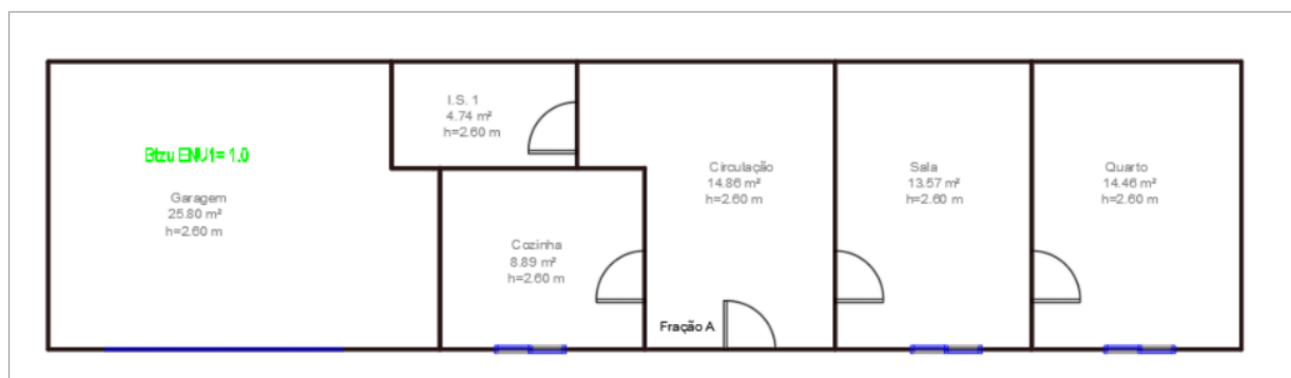


Figura 6.2 - Planta do piso -1

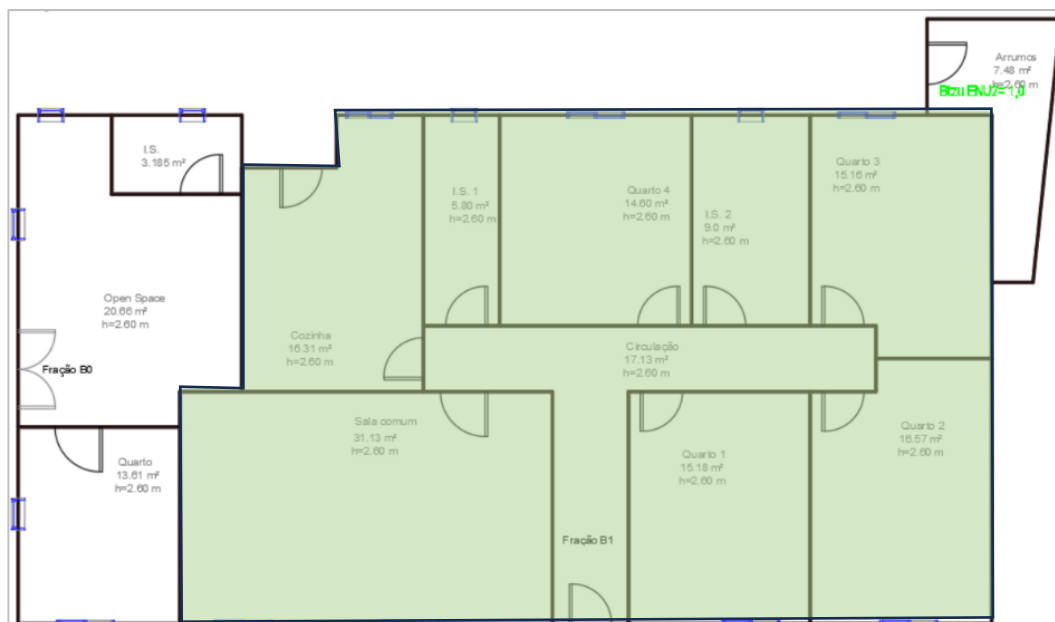


Figura 6.3 - Planta do piso 0 (fração do caso de estudo em destaque, a verde)

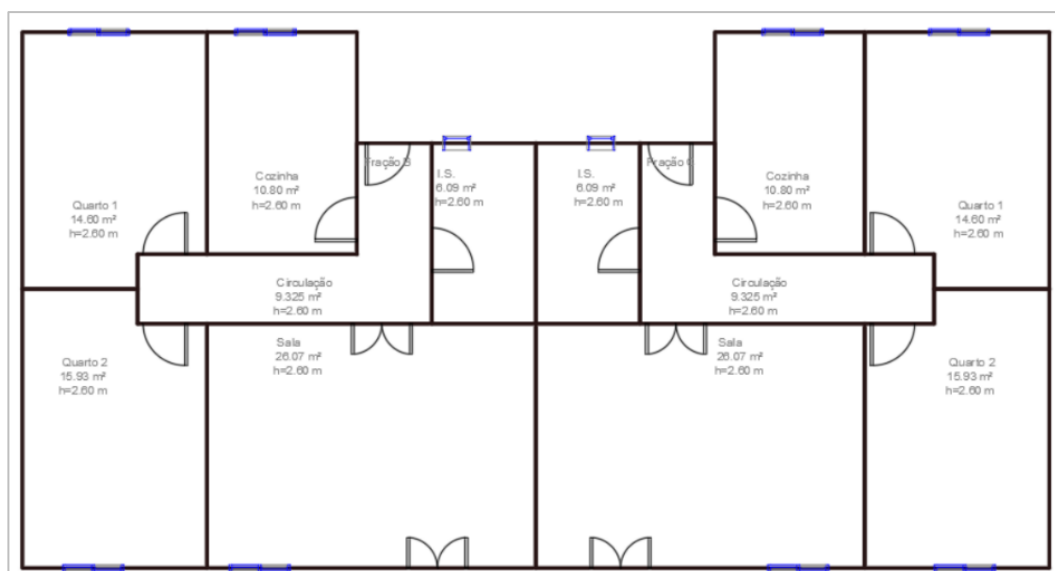


Figura 6.4 - Planta do piso 1



Figura 6.5 - Fachada Noroeste



Figura 6.6 - Fachada Sudeste

6.2.3. Soluções construtivas

Como já referido, o edifício devido à sua época de construção apresenta soluções construtivas antiquadas, sendo notória a falta de isolamento térmico na sua envolvente. Este tipo de construção vai ao encontro daquilo que foi apresentado anteriormente, na Tabela 3.2, onde um valor característico de coeficiente de transmissão térmica para este tipo de construção ronda os $1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e, portanto, muito superior aos limites hoje estipulados na legislação. O mesmo se aplica aos elementos horizontais e vãos envidraçados.

As soluções construtivas encontram-se descritas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Características térmicas dos elementos da envolvente

Elemento	Material	e(m)	R ($\text{m}^2\text{C/W}$)	λ (W/m.C)	ρ (Kg/m ³)	C _p (J/Kg.C)
Parede exterior Exterior → Interior	Reboco	0.02	0.58	1.30	1900	1046
	Tijolo furado	0.22			589	850
	Reboco	0.02		1.30	1900	1046
Parede enterrada Exterior → Interior	Muro em betão	0.20	0.39	2.50	2400	1000
	Reboco	0.02		1.30	1900	1046
	Reboco	0.02		1.30	1900	1046
Parede divisória Exterior → Interior	Reboco	0.02	0.39	1.30	1900	1046
	Tijolo furado	0.15			625	850
	Reboco	0.02		1.30	1900	1046
Pavimento em contacto com o solo Exterior → Interior	Laje de betão armado	0.20		2.30	2350	1000
	Enchimento	0.08		0.22	800	850
	Betonilha	0.04		1.15	1700	880
	Ladrilho hidráulico	0.02		1.30	2300	950
	Reboco	0.02		1.30	1900	1046
Pavimento interior Exterior → Interior	Laje de betão armado	0.20		2.30	2350	1000
	Enchimento	0.08		0.22	800	850
	Betonilha	0.04		1.15	1700	880
	Ladrilho hidráulico	0.02		1.30	2300	950
	Ladrilho hidráulico	0.02		1.30	2300	950
Teto Exterior → Interior	Betonilha	0.04		1.15	1700	880
	Enchimento	0.08		0.22	800	850
	Laje aligeirada	0.21		0.75	1243	840
	Reboco	0.02		1.30	1900	1046
	Reboco	0.02		1.30	1900	1046
Cobertura Exterior → Interior	Laje aligeirada	0.21		0.75	1243	840
	Reboco	0.02		1.30	1900	1046
Janelas	Vidro simples com proteção solar			Uw=4.5 w/m ² .°C		SHGC = 0.85
	Vidro simples sem proteção solar			Uw=6.0 w/m ² .°C		SHGC = 0.85
	Vidro duplo com proteção solar			Uw=3.2 w/m ² .°C		SHGC = 0.75
	Vidro duplo sem proteção solar			Uw=3.9 w/m ² .°C		SHGC = 0.75

6.2.3.1. Elementos verticais de zona corrente

Existem atualmente 2 soluções distintas de paredes na envolvente exterior do edifício, todas sem qualquer tipo de isolamento térmico. As paredes em contacto com o exterior possuem um coeficiente de transmissão térmica de $1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e, são constituídas por um pano de alvenaria cerâmica furada com 22 cm de espessura, rebocada em ambas as faces com uma camada de reboco de 2 cm. Já nas zonas de ponte térmica da envolvente exterior, existe uma viga/pilar de 30 cm, revestida(o) por reboco dos dois lados e com um valor de U praticamente 3 vezes mais alto ($3,7 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$). A parede enterrada na fachada tardoz é constituída por um muro em betão armado de 20 cm, rebocado interiormente e, esta solução apresenta um valor de resistência térmica de $0,31 \text{ m}^2\text{C/W}$.

6.2.3.2. Elementos horizontais de zona corrente

O pavimento do piso -1, em contacto com o terreno, é composto por 10cm de massame armado, 4 cm de betonilha e revestido com 2cm de ladrilho hidráulico. Esta solução tem um coeficiente de transmissão térmica de $3,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$.

No piso 0, apenas metade do piso está em contacto com o terreno, sendo que a outra metade confina com o piso inferior. A solução construtiva existente é formada por uma laje de betão armado de 20 cm de espessura, 8 cm de enchimento e, 4 cm de betonilha revestida por ladrilho hidráulico de 2 cm. A parte desta laje em contacto com o espaço habitável do piso inferior é ainda revestida na face inferior com 2 cm de reboco. Apresentam valores de resistência térmica de $0,67 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ e $0,77 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ respetivamente. O pavimento do último andar, tem apenas uma pequena parte em contacto com o exterior, que é constituído por reboco (2cm), laje aligeirada de 21 cm, enchimento de 6 cm, betonilha de 4 cm e, por fim, uma camada de ladrilho hidráulico de 2 cm. Este pavimento tem um U de $1,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$.

6.2.3.3. Vãos envidraçados

No edifício em estudo existem 4 soluções distintas de vãos envidraçados. As duas primeiras, com proteção solar, são compostas por um vidro simples com U de $4,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ e fator solar de 0,85 e com vidro duplo de U de $3,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ e fator solar de 0,75, respetivamente. As duas últimas soluções de janelas, sem proteção solar, são constituídas por um vidro simples de U $6,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ e fator solar 0,85 e, por fim, U de $3,9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ e fator solar de 0,75.

6.2.3.4. Cobertura

Por fim, a cobertura inclinada com 4 águas do edifício é constituída por uma laje aligeirada com vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos com 2 furos e lâmina de betão perfazendo um total de 21 cm, revestida inferiormente por uma camada de reboco de 2 cm. As águas da cobertura são revestidas a telha cerâmica.

6.2.4. **Clima local**

Para se conseguir entender as condições higrotérmicas no interior da fração em estudo, é necessário caracterizar o clima local onde o edifício está implantado. Como já referido, o caso de estudo está localizado em Sabóia, na região do Alentejo e, apresenta um clima mediterrânico influenciado pela proximidade do Oceano Atlântico. Durante os meses de verão (junho a setembro), as temperaturas médias variam entre 25°C e 30°C , sendo julho e agosto os meses mais quentes, com temperaturas máximas que podem superar 35°C . Já durante os meses de inverno (dezembro a fevereiro), as temperaturas médias variam entre 10°C e 15°C [60].

A precipitação segue um padrão sazonal, concentrando-se nos meses de inverno e outono, com a média anual variando entre 500 e 800 milímetros. Já a humidade relativa média ao longo do ano tende a ser elevada, devida à proximidade do mar. Esta varia entre 70% e 80%, sendo mais elevada durante os meses de inverno e outono, quando a região recebe mais chuva. Os ventos predominantes são de noroeste, vindos do oceano, e de leste. A intensidade dos ventos pode variar ao longo do ano, mas geralmente não são extremos [60].

Relativamente à zona climática de inverno, Sabóia pertence à zona I1, o que significa que o número de graus-dia na base de 18°C é inferior a 1300. No que toca à zona climática de verão, a temperatura média exterior é superior a 22°C, o que significa que é considerado uma zona V3. As zonas climáticas são apresentadas na Figura 6.7.

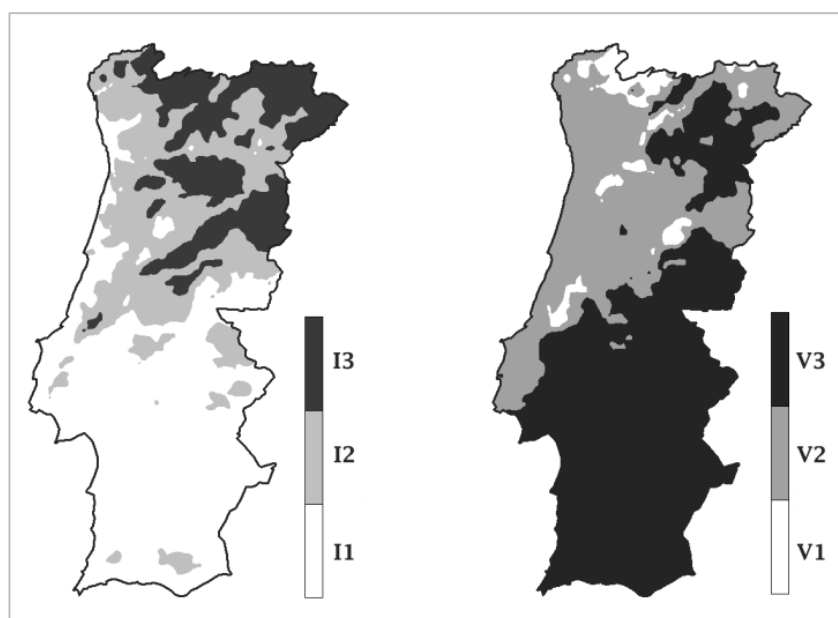


Figura 6.7. Zonas climáticas de inverno e verão de acordo com a legislação SCE. Fonte:[60]

6.3. Campanha de monitorização

6.3.1. Considerações gerais

A monitorização do clima em edifícios desempenha um papel importante na caracterização das suas condições interiores, assim como permite conduzir estudos higrotérmicos e estudar as melhores formas de reabilitar um edifício. Para tal, é necessário levar a cabo uma campanha de monitorização, através da instalação de sensores, que permita medir a temperatura e humidade relativa interior e exterior.

6.3.2. Sensores

A fim de escolher um sensor adequado para a campanha de monitorização, há vários fatores que devem ser considerados, tais como a compatibilidade do sensor com as condições ambientais, a sua resolução, exatidão, tempo de resposta, desvio e compatibilidade com o instrumento de registo [62].

A exatidão dos sensores deve respeitar determinados limites. Para a temperatura, a norma EN 15758 [63] recomenda a utilização de sensores com uma exatidão mínima de 0,5 °C, mas preferencialmente de 0,2°C. Para a humidade relativa, a norma EN 16242 [64] recomenda a utilização de sensores com uma precisão mínima de 3 % HR para sensores eletrónicos.

Para compreender o clima interior da fração em estudo, foi utilizado um conjunto de sensores de registo automático e manual, à semelhança do conjunto utilizado por Hugo Silva [62]. Para medir a temperatura, foi utilizado um termístor 10k PT103J2 com uma precisão de $\pm 0,2$ °C da US Sensor/Littelfuse. Para a medição da humidade relativa, foi utilizado um SHT31-DIS da Sensirion com uma exatidão típica de $\pm 2\%$ HR.

Enquanto os valores de temperatura e de humidade relativa foram obtidos de forma direta, os valores de pressão de vapor de água foram calculados através da equação (2), respeitando a formulação presente em EN 16242 [65]:

$$e = 0,06112 \times 10^{\frac{7,65 \cdot T}{243,12 + T}} \times RH \quad (2)$$

Em que:

- e – Pressão de vapor de água (kPa)
- T – Temperatura (°C)
- HR – Humidade relativa (%)

Estes sensores de temperatura e humidade relativa são acoplados e foram um data logger, com energia fornecida por baterias recarregáveis de 1.2 V e 2700mAh.

6.3.3. Descrição

Numa campanha de monitorização é crucial selecionar cuidadosamente a localização dos “data loggers”, tanto em planta como em altura, para registar com precisão as variações climáticas no interior, evitando a influência de fatores externos indesejados como a radiação solar, o fluxo de ar por portas ou janelas e as perdas de calor através da envolvente. No caso dos sensores colocados no exterior, é ainda importante tomar em consideração a influência da chuva.

A campanha de monitorização deve ser suficientemente longa para registar completamente a variabilidade do clima interior, e a frequência de registo tem de permitir a reconstrução adequada do ambiente interior com o número mínimo de valores. Segundo Camuffo [66], recomenda-se que as campanhas de monitorização tenham a duração mínima de um ano completo e uma frequência de registo de 10 minutos, argumentando que a monitorização do clima deve abranger quatro dimensões para descrever a variabilidade espacial (x, y, z) e temporal. A norma EN 15757 [67] define a mesma abordagem, argumentando que, para definir o clima interior, é necessário realizar uma campanha de monitorização de longo prazo, com duração mínima de um ano e frequência de registo de uma hora ou menos.

Para este caso de estudo, 3 data loggers foram utilizados. Um deles foi instalado no exterior e os outros dois no interior, conforme Figura 6.8. Os data loggers utilizados estão também representado na figura.

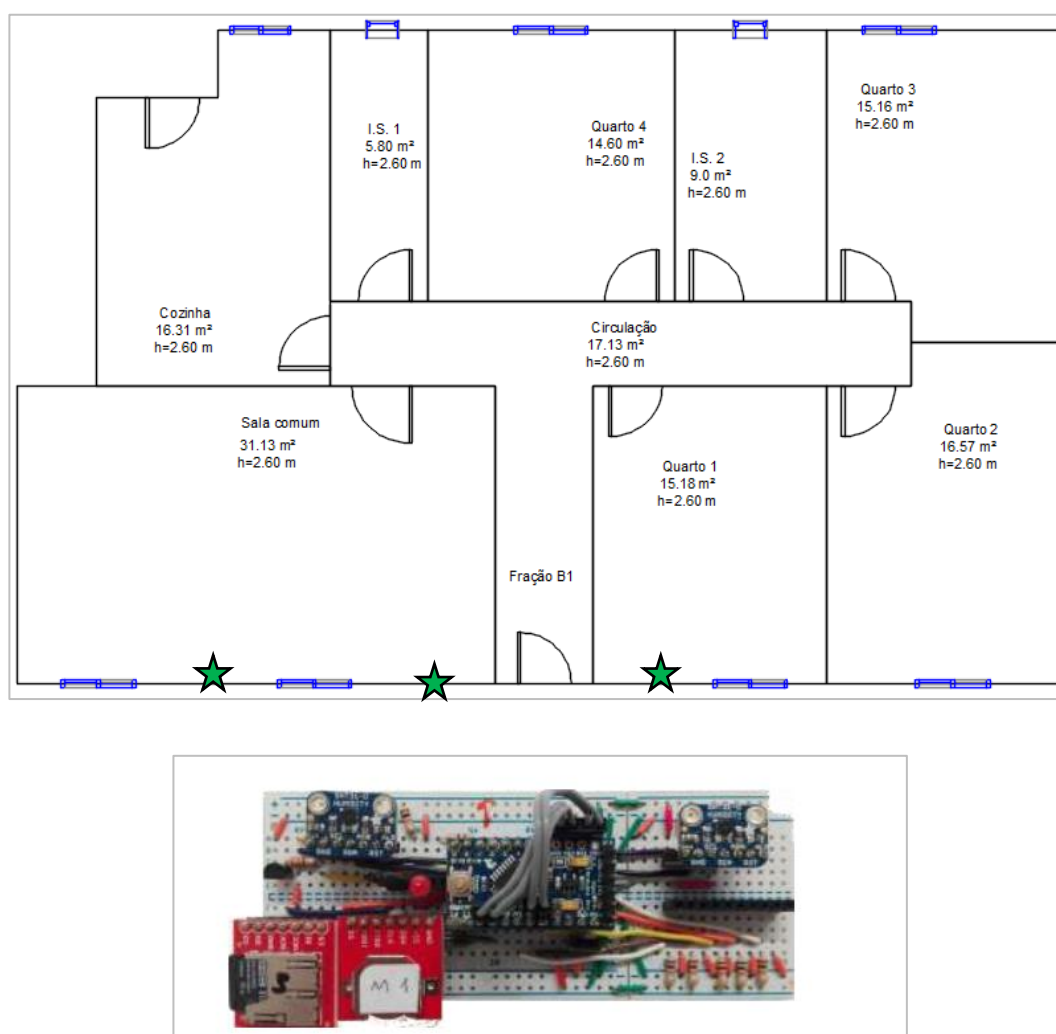


Figura 6.8. Localização dos sensores e imagem do *data logger* utilizado

Para analisar o clima interior, foram utilizados os valores médios obtidos a partir dos dois data loggers instalados no interior da fração. Seguindo as recomendações da norma EN 15757, devem ser utilizados

períodos de monitorização de pelo menos um ano, ou períodos múltiplos. Assim, optou-se por realizar a análise entre janeiro de 2018 e janeiro de 2019, com registo de valores em intervalos horários. Contudo, um problema técnico levou a que entre meados de junho a meados de setembro não se registassem valores, o que justifica os espaços em branco.

6.4. Modelação do caso de estudo

6.4.1. Considerações gerais

Com o intuito de simular o comportamento higrotérmico do edifício em estudo, utilizou-se um software chamado *EnergyPlus*. Este programa, totalmente gratuito e, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, veio facilitar a compreensão do comportamento térmico de edifícios e do consumo de energia a que lhes está associado. Para a realização da presente dissertação, a versão 9.5.0 do programa foi utilizada.

A partir da introdução de um ficheiro climático, também disponível no site do *EnergyPlus*, da geometria do edifício, das soluções construtivas e das características dos materiais que as integram, e do tipo de utilização da habitação, o programa fornece resultados acerca de ganhos e perdas de calor pela envolvente, temperatura, humidade, necessidades energéticas, entre outros. Estas características tornam o programa bastante útil, tornando-se uma mais-valia.

Os dados de entrada (Input) e de saída (Output) são em formato de texto, na extensão IDF. Para editar os dados correspondentes à simulação ou ao edifício, o *EnergyPlus* apresenta uma ferramenta chamada de IDF-Editor, acessível através do EP-Launch, Figura 6.9. É nesta ferramenta que, por sua vez, se insere os ficheiros climáticos e se dá início à simulação.

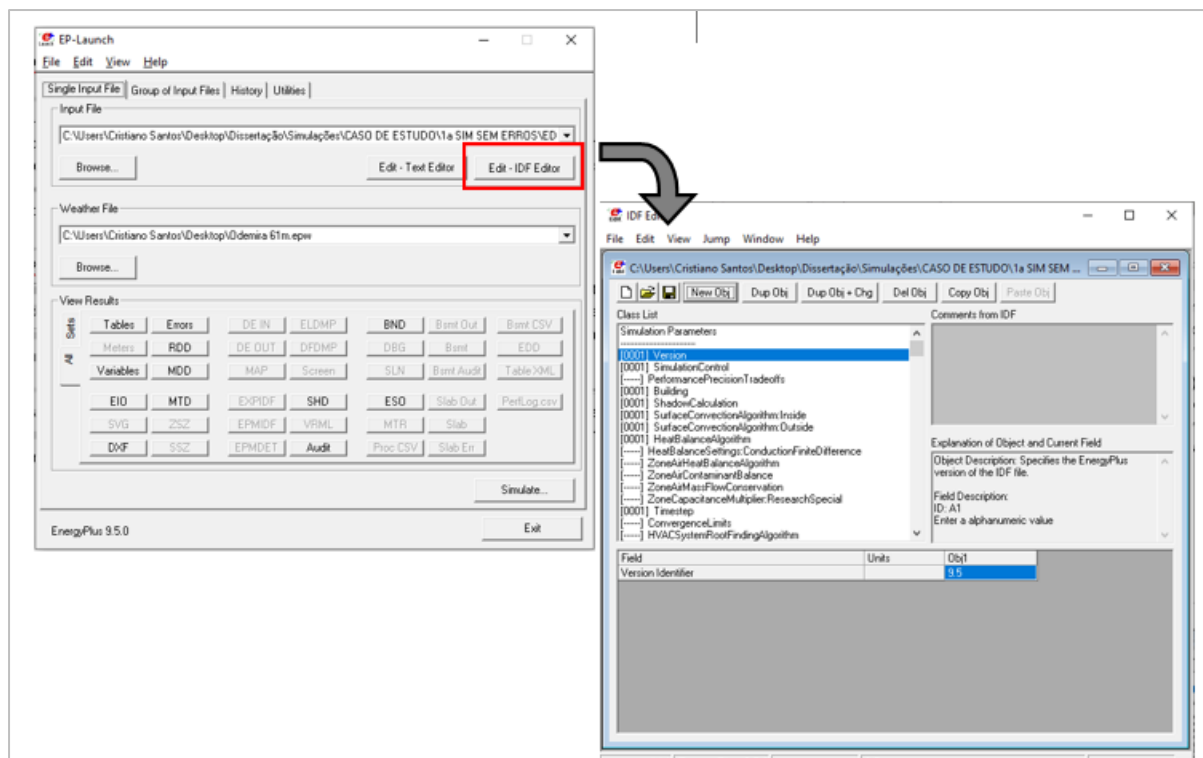


Figura 6.9. IDF - Editor

Relativamente aos ficheiros de saída, denominados como Outputs, o programa fornece um ficheiro Excel com as variáveis solicitadas, como temperaturas ou humidades, um ficheiro de erros para que, caso existam, o utilizador poder identificá-los e, ainda, um ficheiro em CAD com a geometria do edifício em estudo.

A interface gráfica do *EnergyPlus* é considerada pouco apelativa, mas funcional. Em várias dissertações e teses, tais como [68], [69] e [70], onde se trabalha com este programa, é prática comum utilizar o *Google SketchUp* com o Plug-in do *OpenStudio* para a introdução da geometria do edifício, pelo facto de permitir uma modelação 3D e a introdução de vários parâmetros sem que seja necessário recorrer ao próprio *EP-Launch*, aliado a um ambiente gráfico mais apelativo. É possível depois exportar o modelo 3D do edifício com a extensão IDF e utilizá-lo no *EnergyPlus*.

Contudo, devido à complexidade da planta do edifício em estudo com várias saliências e frações autónomas, a utilização do *OpenStudio* não foi vantajosa e provocou vários erros de geometria quando exportado para o *EP-Launch*. Assim, optou-se por utilizar o método mais convencional e, definir a geometria do edifício por coordenadas cartesianas através do *EnergyPlus*.

6.4.2. Inputs do EnergyPlus

6.4.2.1. Considerações gerais

Apresenta-se de seguida a metodologia utilizada para a realização das simulações no *EnergyPlus*. Contudo, não serão explicados todos os campos de *Input*, pelo facto de alguns saírem do âmbito da presente dissertação, como é o caso da climatização mecânica.

Todas as características relativas ao edifício em estudo são introduzidas, como já mencionado, no IDF-Editor. Este editor está organizado em separadores que, por sua vez, estão divididos em grupos que são descritos de seguida.

6.4.2.2. Parâmetros de simulação

O primeiro separador que deve ser preenchido para realizar uma simulação higrotérmica no *EnergyPlus* é o “*Simulation Parameters*”, Figura 6.10. Aqui, encontramos vários grupos que permitem ao utilizador definir: a versão do programa (*Version*); o tipo de controlo da simulação a realizar (*Simulation Control*); parâmetros sobre o edifício em estudo (*Building*); a frequência de cálculo acerca do sombreamento (*ShadowCalculation*); os algoritmos de convecção interior e exterior (*SurfaceConvectionAlgorithm*) e o intervalo de tempo em que se deseja obter os resultados (*Timestep*).

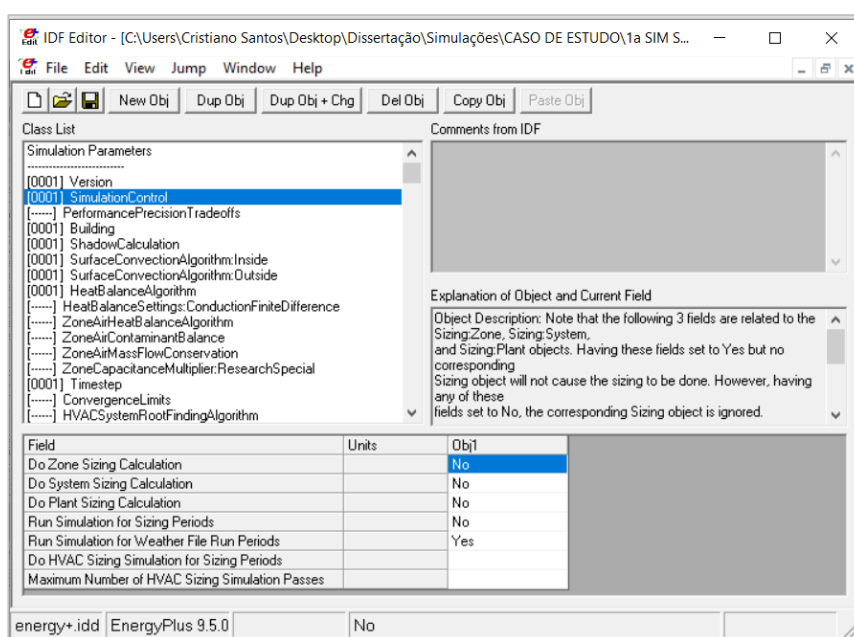


Figura 6.10. Parâmetros de simulação

No que toca aos parâmetros sobre o edifício em estudo, é essencial definir o ângulo que o edifício faz com o norte geográfico, o tipo de terreno ou zona de implantação e a distribuição solar.

Preferencialmente, neste último campo deveria ser selecionada a opção *FullExteriorAndInterior*, que considera que a radiação solar incide sobre qualquer superfície (paredes ou pavimentos).

Contudo esta opção apenas é válida quando a geometria do edifício é convexa, daí se ter optado por *FullExterior*, que considera que toda a radiação direta incide no pavimento. Relativamente ao sombreamento, uma vez desnecessário considerar a variação diária de sombras, apenas se considerou que as mudanças significativas da posição solar ocorreriam de 20 em 20 dias. A vantagem de considerar este intervalo temporário é reduzir o tempo necessário para realizar uma simulação, mantendo ainda assim algum rigor e prevenindo imprecisões nos resultados. Por último, no campo *Timestep*, define-se um intervalo de tempo de simulação inferior a uma hora. O *EnergyPlus*, apenas aceita valores que sejam divisíveis por 60, de forma que o intervalo de tempo seja positivo e inteiro. O valor utilizado foi 6.

6.4.2.3. Localização e clima

Neste separador, através do campo *Location*, são inseridas informações relativas à localização do edifício como latitude, longitude e elevação. O segundo campo preenchido foi o *RunPeriod*, ou seja, o período a simular. Optou-se por realizar simulações de 1 ano, onde é também necessário identificar qual o primeiro e último dia/mês da simulação.

É ainda necessário determinar a temperatura do terreno em *GroundTemperature: BuildingSurface*. Para tal, no separador *Utilities*, na ferramenta *EP-Launch*, selecionou-se a opção *Basement* que calcula a temperatura superficial exterior para as paredes e lajes enterradas, Figura 6.11.

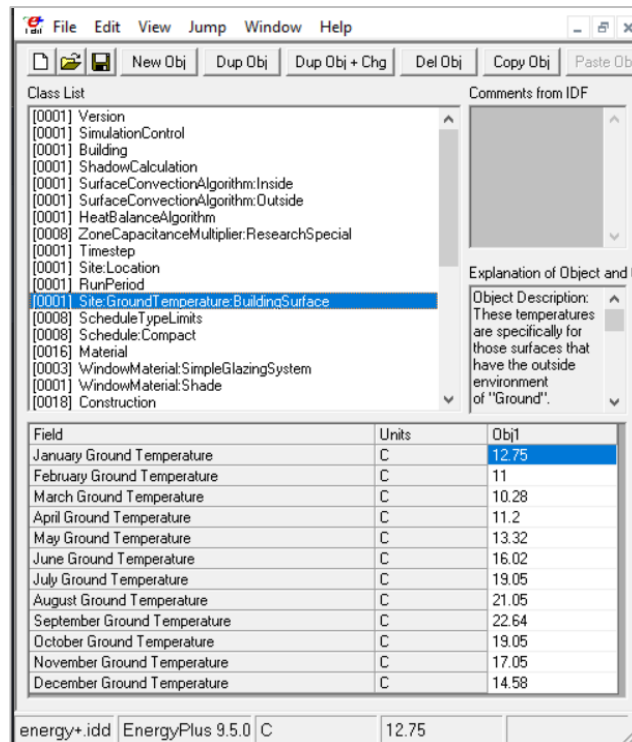


Figura 6.11. Ground temperature building surface

6.4.2.4. Horários

É neste separador onde se definem os horários essenciais ao funcionamento de outros campos do programa e das simulações que se pretendem realizar. Primeiramente, é necessário estipular intervalos de valores admissíveis para os *Schedules*, que se vão definir adiante, em *SchedulesTypeLimits*. Neste objeto, estabelecem-se os valores máximos e mínimos e ainda se indica se as variáveis são discretas ou continuas.

O programa apresenta uma hierarquia de módulos do tipo *Schedule*, havendo *DaySchedule*, *WeekSchedule* e *Schedule* (anual). Para permitir que todos os horários sejam acedidos num único comando utiliza-se a opção *ScheduleCompact*, que facilita o processo. Aqui, cada objeto terá de ter início no dia 1 de janeiro e fim a 31 de dezembro, independentemente do período que se pretende analisar. A título de exemplo, apresenta-se a Figura 6.12, que define o funcionamento da ventilação natural nas frações autónomas. O objeto 2 diz que, durante todo o ano, a ventilação natural ocorre a 100%.

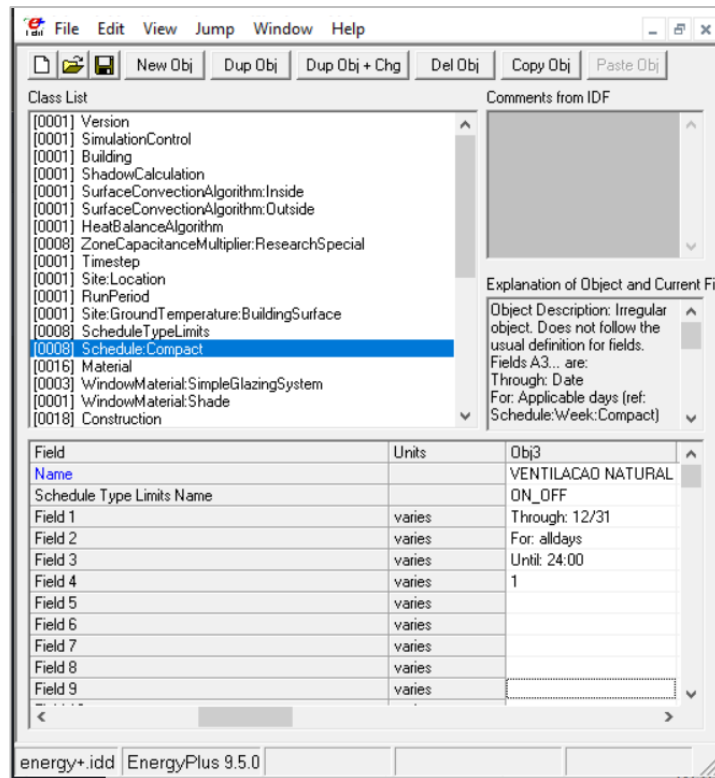


Figura 6.12. Schedules

6.4.2.5. Elementos da construção da superfície

Neste separador foram preenchidos quatro campos referentes à envolvente do edifício. Primeiro é necessário definir os materiais constituintes das soluções construtivas, em *Material*. Aqui, cada objeto corresponderá a um único material e é necessário preencher dados relativos à rugosidade, espessura, condutibilidade, densidade e calor específico.

Depois, pode-se definir as soluções construtivas existentes, em *Construction*, selecionando os materiais definidos anteriormente, obrigatoriamente colocados do exterior para o interior, Figura 6.13.

No que diz respeito aos envidraçados, optou-se por usar um método simplificado e introduzir em *WindowMaterial:SimpleGlazingSystem* as características das janelas, ou seja, os valores de coeficiente de transmissão térmica e o fator solar. Foi ainda introduzido um campo referentes às proteções solares (estores) em *WindowMaterial:Shade*.

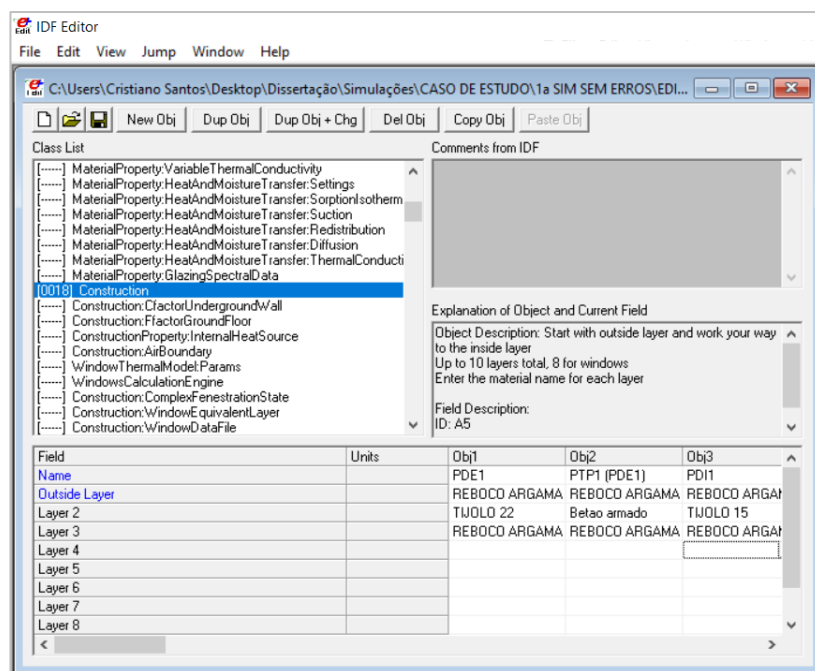


Figura 6.13. Construction

6.4.2.6. Zonas térmicas e superfícies

É neste separador que é criada a geometria do edificado. Para tal, é imprescindível estabelecer alguns critérios em *GlobalGeometryRules*. Dada a geometria ser definida através de um sistema de coordenadas cartesianas é preciso esclarecer qual será o primeiro vértice e o sentido de orientação dos restantes. Optou-se pelo primeiro vértice ser o do canto inferior esquerdo, com os restantes vértices orientados no sentido contrarrelógio. Contudo, estas indicações estão suscetíveis a erros de interpretação, pelo que a posição do observador deve ser pelo exterior do elemento a construir, Figura 6.14.

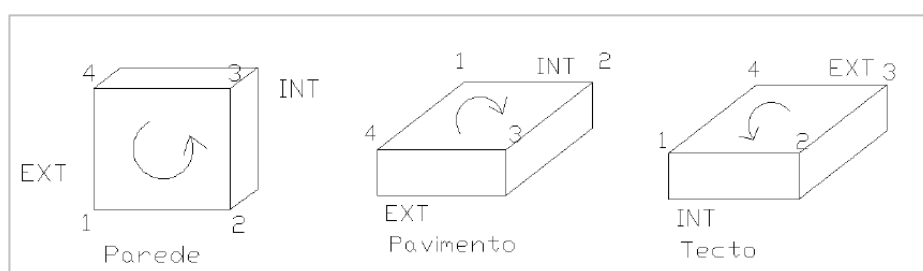


Figura 6.14. Orientação dos vértices das superfícies

O próximo passo foi identificar o número de zonas existentes. Define-se como zona um conjunto de espaços que se encontram submetidos ao mesmo controlo térmico. As diferentes zonas de uma determinada construção podem interagir entre si, através de fluxos de calor nas superfícies adjacentes. Neste caso, consideraram-se 8 zonas distintas, visíveis na Figura 6.15.

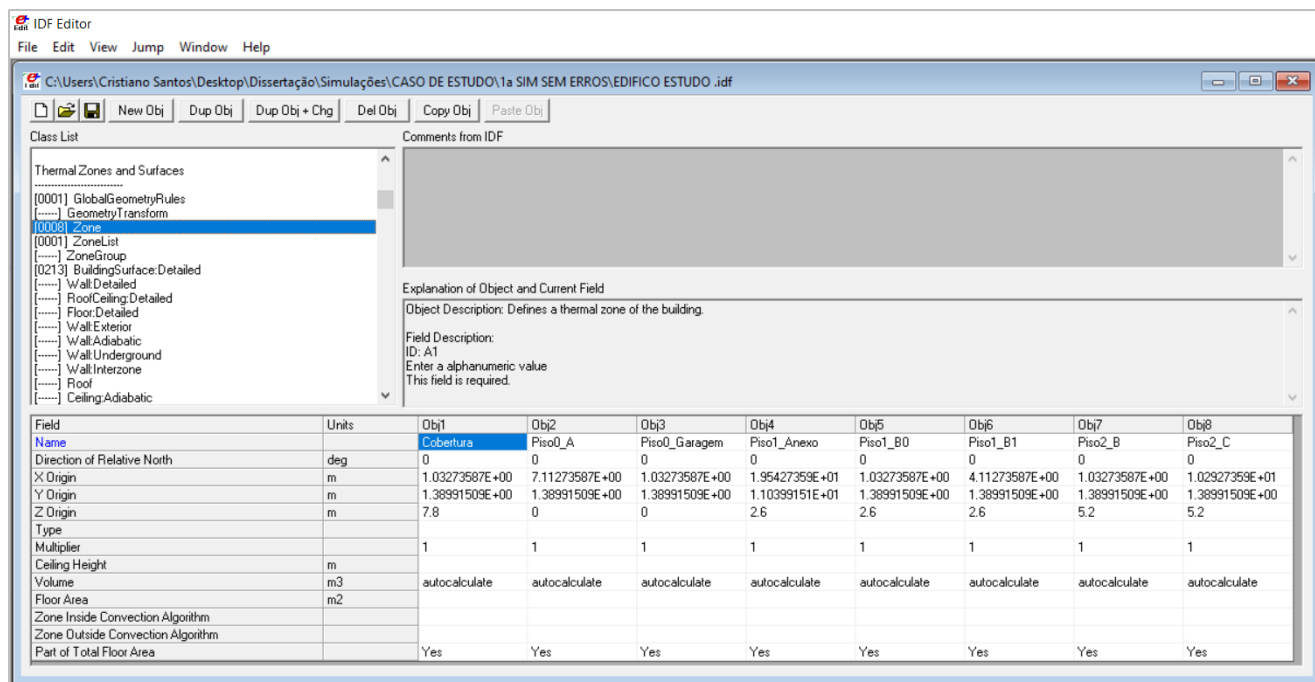


Figura 6.15. Zonas térmicas

Depois de estabelecidas as soluções construtivas e as zonas térmicas é então tempo de definir a envolvente do edifício, em *BuildingSurface:Detailed*, tendo em conta as regras referidas sobre a escolha do primeiro vértice e sentido de orientação dos restantes, Figura 6.16.

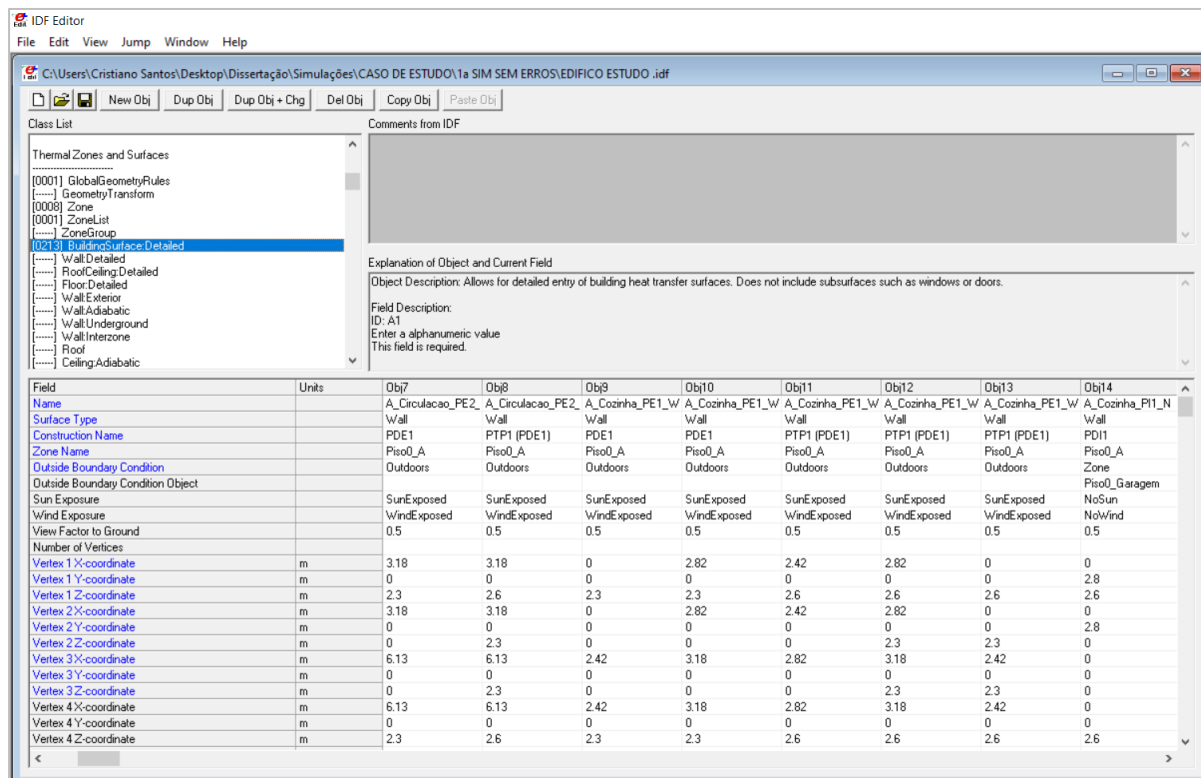


Figura 6.16. Building surface detailed

É importante salientar que o *EnergyPlus* tem uma limitação. Cada superfície poderá ter 4 vértices, no máximo. Se se utilizar superfícies com 5 ou mais vértices ocorreram erros geométricos. Para a correta atribuição de uma solução construtiva é necessário identificar se a superfície em questão se trata de uma parede, telhado, piso ou teto, qual a condição de fronteira no exterior, se está exposta ou não ao sol e vento e, o *View Factor to Ground* que assume valores de 0,5 para elementos verticais e 1 para elementos horizontais. Contudo, aqui só se criam os elementos opacos, tendo os envidraçados um campo específico em que a metodologia é em tudo semelhante.

É ainda possível neste separador que se controla o funcionamento dos elementos de proteção solar. Por fim, o último campo preenchido foi o correspondente aos elementos de sombreamento. O resultado da geometria do edifício é visível na Figura 6.17.

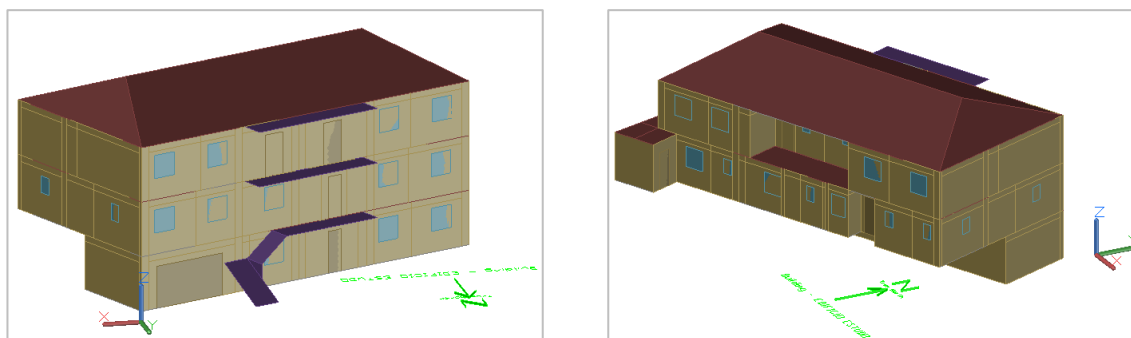


Figura 6.17. Geometria do edifício em estudo

6.4.2.7. Ganhos internos

a) Calibração do modelo

A simulação térmica requer informação sobre as ações desenvolvidas no interior do edifício, ou seja, é necessário estabelecer os ganhos internos quer por ocupação, iluminação, entre outros. É por existir uma grande variabilidade de ações dentro das habitações, com a entrada e saída de pessoas, com a iluminação e equipamentos a serem ligados e desligados que foi necessário definir os *Schedules* anteriormente.

Para uma primeira fase, os ganhos térmicos associados a fontes internas de calor assumiram o valor de 0 W/m^2 , para evitar erros na validação do modelo.

b) Metodologia SCE

Nas simulações energéticas nominais, consideraram-se ganhos internos de 4 W/m² de acordo com a metodologia SCE [60].

c) Perfil real de utilização real

Embora a presente dissertação não se baseie na aplicação de um perfil real de utilização este, quando desenvolvido, desempenha um papel fundamental na avaliação do desempenho higrotérmico e energético pelo facto de contextualizar o caso de estudo numa situação real. Por oferecer uma base sólida e fornecer informações valiosas para futuras pesquisas, é apresentado de seguida o desenvolvimento de um perfil real de utilização.

As cargas internas são definidas como a quantidade de calor sensível e latente que é emitida por uma fonte num determinado espaço (por exemplo, o corpo humano, a iluminação e outros equipamentos elétricos). Enquanto a fração de calor latente é responsável por um aumento da concentração de vapor de água, a fração de calor sensível é absorvida e armazenada pelas superfícies circundantes. Estima-se que entre 20-60% do calor sensível emitido assume a forma de radiação, que depende de vários aspetos como o vestuário, a temperatura radiante média e velocidade do ar [71].

O calor gerado pelo corpo humano ocorre devido à oxidação e depende da pessoa, nomeadamente do seu sexo, idade e nível de atividade. Este tipo de calor é designado por taxa metabólica e é geralmente apresentado em met. Uma unidade de taxa metabólica (1 met) corresponde à quantidade de energia gerada por um adulto europeu padrão do sexo masculino sentado em repouso, com uma área corporal de 1,8 m², o que corresponde a um fluxo de energia de 58,2 W/m² [72].

A taxa metabólica para cada atividade é baseada na quantidade de calor que é emitido por uma pessoa média em repouso. Por outras palavras, 1,6 taxa metabólica significa que a pessoa está a emitir 1,6 mais calor do que a quantidade de calor produzida por uma pessoa média em repouso.

A quantidade de energia emitida por uma pessoa pode ser determinada através da taxa metabólica multiplicada pela área de superfície da pele, proposta por DuBois [72]:

$$A_D = 0.202 \cdot m^{0.425} \cdot l^{0.725} \quad (3)$$

Onde A_D é a área da superfície da pele (normalmente designada por área Dubois) (m²), m é a massa da pessoa (kg) e l é a altura da pessoa (m).

Para este trabalho, foi tomado como referência um adulto com 1,81 m e 90 kg. Para as mulheres considerou-se um fator de redução de 0.70 e para as crianças de 0.55. Considerou-se ainda que o edifício

apresenta uma ocupação típica de 4 pessoas: 1 homem, 1 mulher e 2 crianças.

De acordo com o CIBSE Guia A [71] e com a ISO EN 7730 [53], definiram-se as tarefas e respectivas taxas metabólicas apresentadas na Tabela 6.2:

Tabela 6.2 - Tarefas e respectivas taxas metabólicas [71], [53]

Ocupação	met
Dormir	0.7
Sentado a ver tv	1
Ler	1
Computador	1.1
Cozinhar	1.6
Limpezas	2
Brincar	2.2

O calor gerado pelo corpo humano é dissipado da superfície do corpo através de uma combinação de radiação, convecção, evaporação e respiração. A taxa de perda de calor sensível (perdas por convecção e radiação) e a taxa de perda de calor latente (perdas por evaporação e respiração) não são constantes e dependem da taxa metabólica e das condições ambientais e a sua quantificação é um processo moroso e difícil.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos da América apresentou e aplicou ao software EnergyPlus uma equação polinomial [73] para estimar a quantidade de calor sensível em função da taxa metabólica e da temperatura do ar:

$$\begin{aligned}
 S = & 6.461927 + 0.946892 \cdot M + 0.0000255737 \cdot M^2 + 7.139322 \cdot T \\
 & - 0.0627909 \cdot T \cdot M + 0.0000589172 \cdot T \cdot M^2 \\
 & - 0.198550 \cdot T^2 + 0.000940018 \cdot T^2 \cdot M \\
 & - 0.00000149532 \cdot T^2 \cdot M^2
 \end{aligned} \tag{4}$$

em que S é a quantidade de calor sensível (W); M é a taxa metabólica (W) e T é a temperatura do ar (°C).

De acordo com o Capítulo 9 do ASHRAE Handbook - Fundamentals [74], o calor sensível pode ser dividido em frações radiativas e convectivas como 0,6 e 0,4, respetivamente, para condições típicas de escritório. Aqui, este rácio foi considerado admissível.

Conhecendo a quantidade total de calor e a fração sensível, a quantidade de calor latente pode ser facilmente obtida:

$$L = M - S \quad (5)$$

Onde L significa a quantidade de calor latente (W), M significa a quantidade de calor total (W) e S é o calor sensível (W).

Na Tabela 6.3 apresentam-se os valores de taxa metabólica e de produção de calor total, latente e sensível para um homem, para as diversas atividades consideradas.

Tabela 6.3 - Taxa metabólica e ganhos de calor

Ocupação	met	Geração de humidade [g/h.pessoa]	Temperatura ar (°C)	Massa (kg)	Altura (m)	Área corporal (m ²)	Ganho calor total [W]	Calor latente [W]	Calor sensível [W]	Fração convectiva
Dormir	0.7	40	22	90	1.81	2.10	85.7	25.1	60.6	0.4
Sentado a ver tv	1.0	70	22	90	1.81	2.10	122.4	43.9	78.5	0.4
Ler	1.0	70	22	90	1.81	2.10	122.4	43.9	78.5	0.4
Computador	1.1	90	22	90	1.81	2.10	134.6	56.4	78.2	0.4
Cozinhar	1.6	160	22	90	1.81	2.10	195.8	100.3	95.5	0.4
Limpezas	2.0	215	22	90	1.81	2.10	244.7	134.8	109.9	0.4
Brincar	2.2	250	22	90	1.81	2.10	269.2	156.7	112.5	0.4

No que diz respeito à iluminação, a energia elétrica utilizada por uma lâmpada é transformada em calor e dissipada por convecção e radiação. Para além da influência das propriedades da lâmpada, a própria luminária tem uma influência importante na divisão da energia, afetando a relação entre o calor radiante e o calor convectivo.

A proporção de calor que entra no compartimento depende do tipo e da localização dos aparelhos de iluminação. Quando as luminárias ou lâmpadas estão suspensas do teto ou montadas nas paredes, todo o calor aparecerá como um ganho interno. Quando as luminárias estão embutidas no teto ou no teto falso, parte da potência emitida resulta num ganho de calor para a estrutura que a envolve.

A forma de dissipação de calor para várias configurações de luminárias com lâmpadas fluorescentes é apresentada na Tabela 6.4 de acordo com os valores presentes no manual do utilizador do software EnergyPlus [74].

Tabela 6.4. Forma de dissipação de calor para cada tipo de luminária [74]

Tipo de dissipação	Configuração da luminária			
	Suspensa	À superfície	Encastrado	Teto luminoso e encastrado
Radiante	0.6	0.9	0.55	0.55
Convectivo	0.40	0.10	0.45	0.45

6.4.2.8. Ventilação

Todo o tipo de atividades que os ocupantes da habitação realizam como dormir, andar ou estudar são responsáveis pela libertação de vapor de água. Esta libertação de vapor de água pode influenciar as condições do ambiente interior [51], tornando imprescindível a ventilação dos espaços com o intuito de obter um ambiente salubre, reduzindo a concentração de CO₂, vapor de água e consequentemente a humidade relativa.

Com o propósito de estimar a taxa de renovações horárias de ar, recorreu-se a uma folha de cálculo de aplicação do regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação, fornecida pelo Itecons (Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade).

Tomando em consideração as características das condutas e grelhas para admissão e exaustão de ar, a permeabilidade ao ar das janelas, a altura do edifício e a sua localização, estima-se o valor de renovações de horas da fração.

Apesar de ser um valor estimado para efeitos de certificação energética, uma vez que não existiam medições de caudais de ventilação ou de gases traçadores, optou-se por utilizar este método para que o valor utilizado fosse coerente com o sistema nacional.

6.4.2.9. Ficheiro climático

Com base na campanha de monitorização, descrita em 6.3, e dos dados recolhidos de temperatura, humidade relativa e pressão de vapor de água ao longo de um ano, foi construído um ficheiro climático. Este, emitido pelo gerador de ficheiro climáticos, permitiu a comparação com a metodologia do sistema SCE.

6.4.3. **Outputs do EnergyPlus**

De forma a obter os resultados de saída do programa é necessário preencher, no separador *Output Reporting*, as variáveis que o utilizador pretende analisar, em *Output:Variable*. Visto haver uma longa lista de variáveis possíveis de solicitar ao *EnergyPlus*, optou-se por apenas mencionar as que foram utilizadas no decorrer da presente dissertação.

Sendo o principal objetivo deste trabalho fazer uma análise comparativa do comportamento higrotérmico de diversas soluções construtivas, torna-se essencial obter os seguintes resultados:

- Do ambiente exterior: Temperatura (Site Outdoor Air DryBulb Temperature) e humidade relativa (Site Outdoor Air Relative Humidity);
- Das superfícies do edifício: temperatura superficial (*Surface Inside Face Temperature*;

- De cada zona térmica: Temperatura interior (Zone Mean Air Temperature), humidade relativa interior (Zone Air Relative Humidity), ganhos de calor pelas janelas (Zone Windows Total Heat Gain Rate), perdas de calor pelas janelas (Zone Windows Total Heat Loss Rate), necessidades de aquecimento (Zone Ideal Loads Zone Sensible Heating Rate), necessidades de arrefecimento (Zone Ideal Loads Zone Sensible Cooling Rate), ganhos pela envolvente opaca (Zone Opaque Surface Inside Faces Total Conduction Heat Gain Rate), perdas de calor pela envolvente opaca (Zone Opaque Surface Inside Faces Total Conduction Heat Loss Rate), perdas de calor por ventilação (Zone Infiltration Sensible Heat Loss Energy), ganhos de calor por ventilação (Zone Infiltration Sensible Heat Gain Energy), ganhos internos (Zone Total Internal Total Heating Rate) e ganhos solares (Zone Exterior Windows Total Transmitted Beam Solar Radiation Rate).

6.5. Calibração e validação do modelo

6.5.1. Análise estatística - comparação com os dados recolhidos

Existem inúmeros métodos para calibrar modelos de simulação higrotérmica de edifícios e, uma das abordagens mais adotada consiste em comparar os dados climáticos interiores medidos no local com os obtidos através de simulações numéricas [75].

A diferença entre os dados horários simulados e medidos é designada por "erro". Quando a quantificação dos erros obedece a requisitos específicos, o modelo pode ser definido como calibrado, validado ou ambos [76]. Com o intuito de conseguir fazer convergir o modelo com as medições feitas no local, foi realizada uma comparação gráfica entre os valores simulados e medidos, assim como uma análise estatística.

A calibração é o processo de ajustamento dos parâmetros físicos no modelo computacional para melhorar a concordância com os dados experimentais [77].

As indicações da ASHRAE Guideline 14 [78] são frequentemente utilizadas para as calibrações baseadas em parâmetros climáticos interiores. Um modelo é definido como "calibrado" quando cumpre os limiares definidos para os índices estatísticos dos erros [79]. Os índices estatísticos considerados na Directriz 14 da ASHRAE são:

O coeficiente de determinação (R^2), que descreve a correlação entre os valores medidos e simulados, pode ser calculado através da seguinte equação:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (X_{i,med} - \overline{X_{med}}) \cdot (X_{i,sim} - \overline{X_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{i,med} - \overline{X_{med}})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (X_{i,sim} - \overline{X_{sim}})^2}} \right)^2 \quad (6)$$

- O coeficiente de variação da raiz quadrada do erro (CVRMSE) demonstra como o modelo se ajusta aos valores medidos, contornando possíveis erros de compensação do NMBE e mostra a influência dos erros mais elevados.

$$CVRMSE = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{i,med} - X_{i,sim})^2}{(n-1)}}}{\overline{X_{med}}} \quad (7)$$

- O erro de desvio médio normalizado (NMBE) mostra a influência de erros mais pequenos e pode ser calculado a partir da equação:

$$NMBE = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (X_{i,med} - X_{i,sim})}{\overline{X_{med}} \cdot (n-1)} \quad (8)$$

De acordo com a Diretriz, os três parâmetros devem ser superiores a 0,75 e inferiores a 30% e 10% respetivamente, para modelos calibrados com base em medições horárias.

A validação é o processo de avaliação da exatidão física do modelo através da comparação entre a simulação e os resultados experimentais [76].

Os índices estatísticos são utilizados frequentemente na literatura nacional e internacional, como os apresentados em [62], 80 e 81] e, contribuem para a validação garantindo a robustez dos resultados. Na literatura mencionada, os modelos foram considerados validados com valores de R^2 de 0.99, 0.98 e 0.97 para temperatura, apresentando boas aproximações à realidade. Já para os índices CVRMSE e NMBE, enquanto [81] utilizou os limites estipulados pela diretriz mencionados anteriormente, [62] optou por ser mais robusto na validação dos resultados e utilizou um limite admissível de 5% para NMBE. Assim, os resultados apresentados para o índice de CVRMSE foram de 14% e 2.5% respetivamente para a temperatura e, para o índice NMBE, valores de 2% e 2.1% foram atingidos.

6.5.2. Comparação dos consumos energéticos do modelo com a metodologia SCE

Tendo um modelo higrotérmico validado e calibrado e, com o objetivo de reabilitar o edifício de forma a reduzir as suas necessidades energéticas, criou-se outro modelo de simulação. Este novo modelo tem como base o anterior, com a mesma geometria, mas com algumas alterações para poder ser utilizado em condições nominais.

As condições nominais definidas no manual SCE [60] caracterizam as condições de referência utilizadas para avaliar o desempenho energético dos edifícios de habitação durante o processo de certificação energética.

Essas condições nominais são definidas para representar um conjunto de parâmetros standardizados, de forma a serem utilizados como base de comparação entre diferentes edifícios. Assim, os balanços de energia são determinados considerando-se uma temperatura interior de 18 °C na estação de aquecimento e de 25 °C na estação de arrefecimento.

As necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}) representam a quantidade de energia necessária para manter uma habitação a uma temperatura constante de 18°C ao longo de 24 horas, durante toda a estação de aquecimento. Essas necessidades são calculadas considerando a transferência de calor através da envolvente do edifício, a ventilação e os ganhos de calor úteis, provenientes dos ganhos solares pelas janelas e das cargas internas no edifício.

O valor de N_{ic} é determinado com base na metodologia prevista na Norma EN ISO 13790, através da seguinte equação:

$$N_{ic} = \frac{Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - Q_{gu,i}}{A_p} \quad (9)$$

Em que:

- N_{ic} - Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento [kWh/(m².ano)];
- $Q_{tr,i}$ - Transferência de calor por transmissão através da envolvente do edifício na estação de aquecimento [kWh/ano];
- $Q_{ve,i}$ - Transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento [kWh/ano];
- $Q_{gu,i}$ - Ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento resultante dos ganhos solares e ganhos internos [kWh/ano];
- A_p - Área interior útil de pavimento [m²];

As necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (N_{vc}) representam a quantidade de energia necessária para manter a habitação a uma temperatura constante de 25°C ao longo de 24 horas, durante toda a estação de arrefecimento. Essas necessidades são calculadas considerando a transferência de calor através da envolvente do edifício, a ventilação e os ganhos térmicos provenientes dos ganhos solares pelas janelas, pela envolvente opaca e das cargas internas no edifício.

O valor de N_{vc} é determinado com base na metodologia prevista na Norma EN ISO 13790, através da equação:

$$N_{vc} = \frac{(1 - \eta_v) \cdot Q_{g,v}}{A_p} \quad (10)$$

Em que:

- N_{vc} - Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento [kWh/(m².ano)];
- η_v – Fator de utilização de ganhos térmicos na estação de arrefecimento;
- $Q_{g,v}$ – Ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento [kWh/ano];
- A_p – Área interior útil de pavimento [m²];

Para determinar as necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento, o novo modelo construído no EnergyPlus sofreu, como já referido, algumas alterações. Primeiro, foi definido um sistema de AVAC fictício, ou seja, um sistema de controlo de temperatura que mistura o ar interior com uma quantidade específica de ar exterior e que depois adiciona ou retira calor e humidade com 100% de eficácia. Para a ativação do sistema de AVAC foi definido como valores de referência mínima e máxima do termostato 18°C e 25°C, respetivamente.

Outra condição para utilizar o modelo em condições nominais é a ativação das proteções solares quando a radiação solar incidente nos envidraçados ultrapassa os 300w/m². Para a validação do modelo higró-térmico foi considerado que as proteções solares estavam sempre ativas e, por isso, um fator solar de 0.09 foi utilizado. Agora, repôs-se o fator solar original dos envidraçados e acionou-se as proteções solares nas condições referidas.

6.6. Impacto do isolamento térmico

Com o intuito de avaliar o impacto do isolamento térmico no edifício existente, foi efetuado um conjunto inicial de simulações, testando a colocação de isolamento térmico pelo interior com quatro espessuras diferentes, mantendo todas as outras características do edifício inalteradas, conforme esquematizado na Figura 6.18.

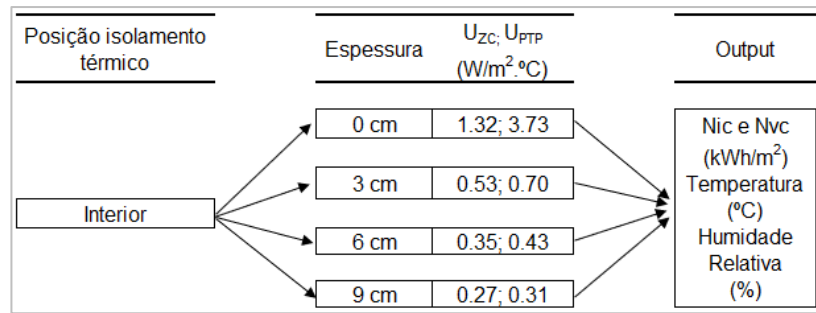


Figura 6.18 - Espessuras de isolamento e coeficientes de transmissão térmica de paredes das soluções utilizadas

6.7. Impacto dos vãos envidraçados – coeficiente de transmissão térmica

Para compreender o impacto individual do coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados, procedeu-se à simulação de 4 soluções distintas, mantendo os restantes parâmetros constantes. Esta abordagem está exemplificada na Figura 6.19.

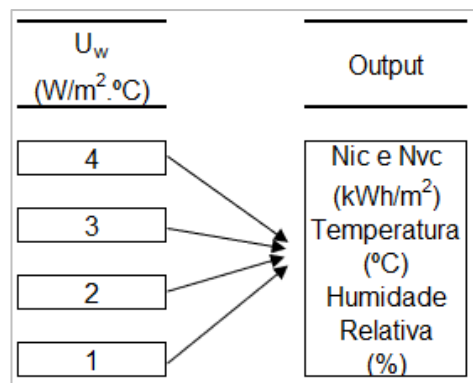


Figura 6.19 - Coeficientes de transmissão térmica de vãos envidraçados utilizados

6.8. Impacto dos vãos envidraçados – fator solar

Para compreender o impacto individual do fator solar associado aos vãos envidraçados, procedeu-se à simulação de 4 soluções distintas, mantendo os restantes parâmetros constantes, conforme Figura 6.20. Note-se que para além do fator solar do vidro, considerou-se a ativação automática dos elementos de proteção solar exterior quando a radiação incidente ultrapassa os $300 W/m^2$.

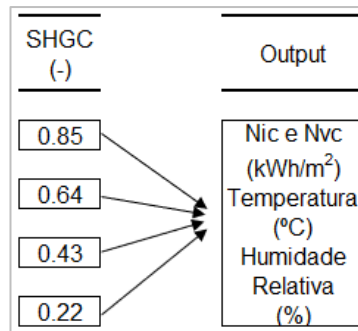


Figura 6.20 - Fator solar (SHGC) dos vãos envidraçados utilizados

6.9. Estudo de sensibilidade

Com o objetivo de compreender o impacto da envolvente no desempenho energético do edifício, foi realizado um estudo de sensibilidade que considerou quatro coeficientes de transmissão térmica para a envolvente opaca, quatro coeficientes de transmissão térmica para os vãos envidraçados e, quatro fatores solares através de um estudo de sensibilidade para correlacionar todas as variáveis, efetuando um total de 64 simulações.

Relativamente à envolvente opaca, representada na Figura 6.21, foram avaliados quatro cenários diferentes de transmissão térmica: o primeiro considerando a parede original sem isolamento térmico ($U_{zc}=1,3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $U_{ptp}=3,7 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$); o segundo caso considerando a utilização de 3 cm de isolamento térmico (lã mineral), espaço de ar com 1,5 cm e uma placa de gesso cartonado de 1,5 cm ($U_{zc}=0,53 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $U_{ptp}=0,70 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$); o terceiro cenário considerando uma camada de isolamento térmico com 6 cm, espaço de ar com 1,5 cm e uma placa de gesso cartonado de 1,5 cm ($U_{zc}=0,35 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $U_{ptp}=0,43 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$); e o quarto e último cenário considerando uma camada de isolamento térmico com 9 cm, espaço de ar com 1,5 cm e uma placa de gesso cartonado de 1,5 cm ($U_{zc}=0,27 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $U_{ptp}=0,31 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$). Os cálculos destes valores estão apresentados na Tabela 6.5.

Para o efeito, considerou-se uma placa de gesso cartonado da Knauf Standart, com massa volúmica de 630 Kg/m^3 e condutividade térmica de $0,21 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ e, lã mineral Rocterm PN70 com condutibilidade térmica de $0,033 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

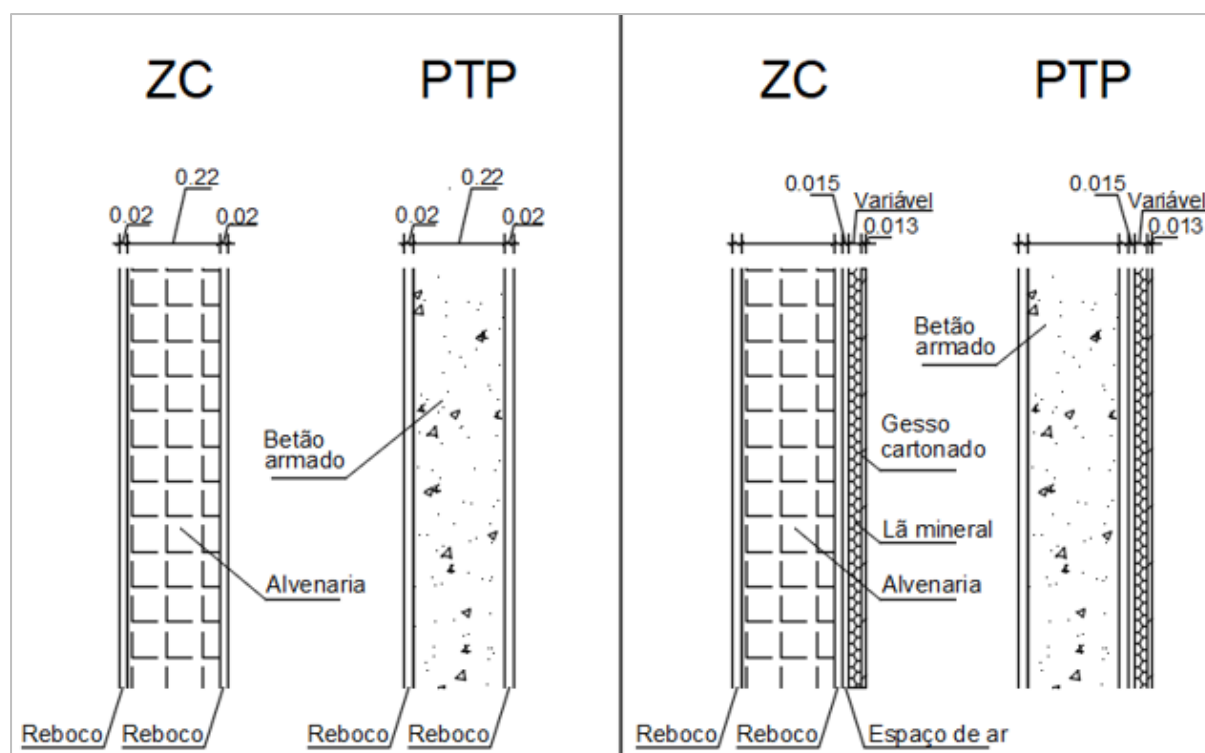


Figura 6.21 - Soluções construtivas de envoltório opaca utilizadas (ZC=zona corrente; PTP=Ponte térmica plana)

Tabela 6.5 - Determinação dos coeficientes de transmissão térmica das soluções utilizadas

Solução	Elemento	Material	e (m)	λ (W/m.°C)	R (m²°C/W)	Rt (m²°C/W)	U (W/m².°C)
1	Zona corrente Exterior → Interior	Reboco	0.020	1.3	0.015	0.77	1.3
		Tijolo furado	0.220		0.52		
		Reboco	0.020	1.3	0.015		
	Zona ponte térmica Exterior → Interior	Reboco	0.020	1.3	0.015	0.27	3.7
		Betão armado	0.220	2.0	0.11		
		Reboco	0.020	1.3	0.015		
2	Zona corrente Exterior → Interior	Reboco	0.020	1.3	0.015	1.89	0.53
		Tijolo furado	0.220		0.52		
		Reboco	0.020	1.3	0.02		
		Espaço de ar	0.015		0.17		
		Lã mineral	0.030	0.03	0.91		
		Gesso cartonado	0.013	0.21	0.06		
	Zona corrente Exterior → Interior	Reboco	0.020	1.3	0.015	1.43	0.70
		Betão armado	0.220	2.0	0.11		
		Reboco	0.020	1.3	0.02		
		Espaço de ar	0.015		0.17		
		Lã mineral	0.030	0.03	0.91		
		Gesso cartonado	0.013	0.21	0.06		
3	Zona corrente Exterior → Interior	Reboco	0.020	1.3	0.015	2.86	0.35
		Tijolo furado	0.220		0.52		
		Reboco	0.020	1.3	0.02		
		Espaço de ar	0.015		0.17		
		Lã mineral	0.060	0.03	1.82		
		Gesso cartonado	0.013	0.21	0.06		
	Zona corrente Exterior → Interior	Reboco	0.020	1.3	0.015	2.33	0.43
		Betão armado	0.220	2.0	0.11		
		Reboco	0.020	1.3	0.02		
		Espaço de ar	0.015		0.17		
		Lã mineral	0.060	0.03	1.82		
		Gesso cartonado	0.013	0.21	0.06		
4	Zona corrente Exterior → Interior	Reboco	0.020	1.3	0.015	3.70	0.27
		Tijolo furado	0.220		0.52		
		Reboco	0.020	1.3	0.02		
		Espaço de ar	0.015		0.17		
		Lã mineral	0.090	0.03	2.73		
		Gesso cartonado	0.013	0.21	0.06		
	Zona corrente Exterior → Interior	Reboco	0.020	1.3	0.015	3.23	0.31
		Betão armado	0.220	2.0	0.11		
		Reboco	0.020	1.3	0.02		
		Espaço de ar	0.015		0.17		
		Lã mineral	0.090	0.03	2.73		
		Gesso cartonado	0.013	0.21	0.06		

Para os vãos envidraçados os valores de U_w admitidos foram $U_w=4 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, $U_w=3 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, $U_w=2 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $U_w=1 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$. Os valores de fator solar (SHGC), por sua vez, foram 0,85; 0,64; 0,43 e 0,22. A combinação destes valores não representam uma solução de vão envidraçado em concreto, apenas permitem avaliar o contributo da redução do valor de U_w e do SHGC em intervalos constantes. Para efeitos de uniformização, todas as janelas existentes na fração foram consideradas com as mesmas características. O diagrama das simulações é apresentado na Figura 6.22. Note-se que para além do fator solar do vidro, considerou-se a ativação automática dos elementos de proteção solar exterior

quando a radiação incidente ultrapassa os 300 W/m².

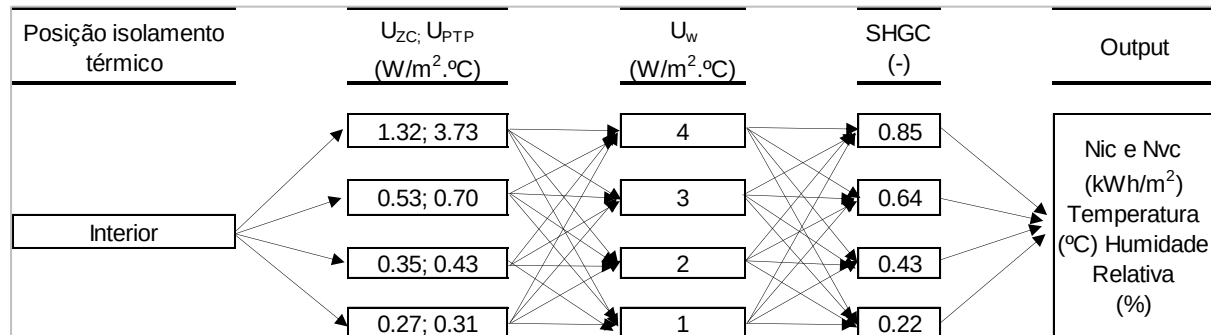


Figura 6.22 - Diagrama de simulações realizadas

É ainda de salientar que, apenas se optou por colocar isolamento térmico unicamente pelo interior do edifício. Por se tratar de uma propriedade horizontal torna-se mais simples realizar este tipo de intervenções, pelo facto de não se ter de alterar a fachada do edifício.

7. Resultados

7.1. Monitorização do clima interior

Os resultados da campanha de monitorização são apresentados na Figura 7.1. Importa referir que durante alguns períodos os sensores apresentaram problemas técnicos que impossibilitaram o registo de dados. Estes períodos encontram-se representados sem preenchimento nas figuras.

No que diz respeito à temperatura, o clima interior apresenta um desenvolvimento bastante semelhante ao clima exterior, sem haver grande desfasamento ou amortecimento das temperaturas. É de salientar o facto de que o edifício encontra-se desocupado durante a maior parte do ano, razão pela qual o clima interior tende a atingir o equilíbrio com os ciclos do clima exterior. Em termos numéricos, conforme apresentado na Tabela 7.1, comprova-se que as temperaturas médias interior e exterior são bastante semelhantes, apresentando uma diferença de 0,4°C.

Tabela 7.1 - Valores de temperatura medidos

	Exterior	Interior
Média (°C)	15.1	15.5
Máximo (°C)	33.7	25.7
Mínimo (°C)	0.4	7.3
Desvio padrão (°C)	4.9	3.7

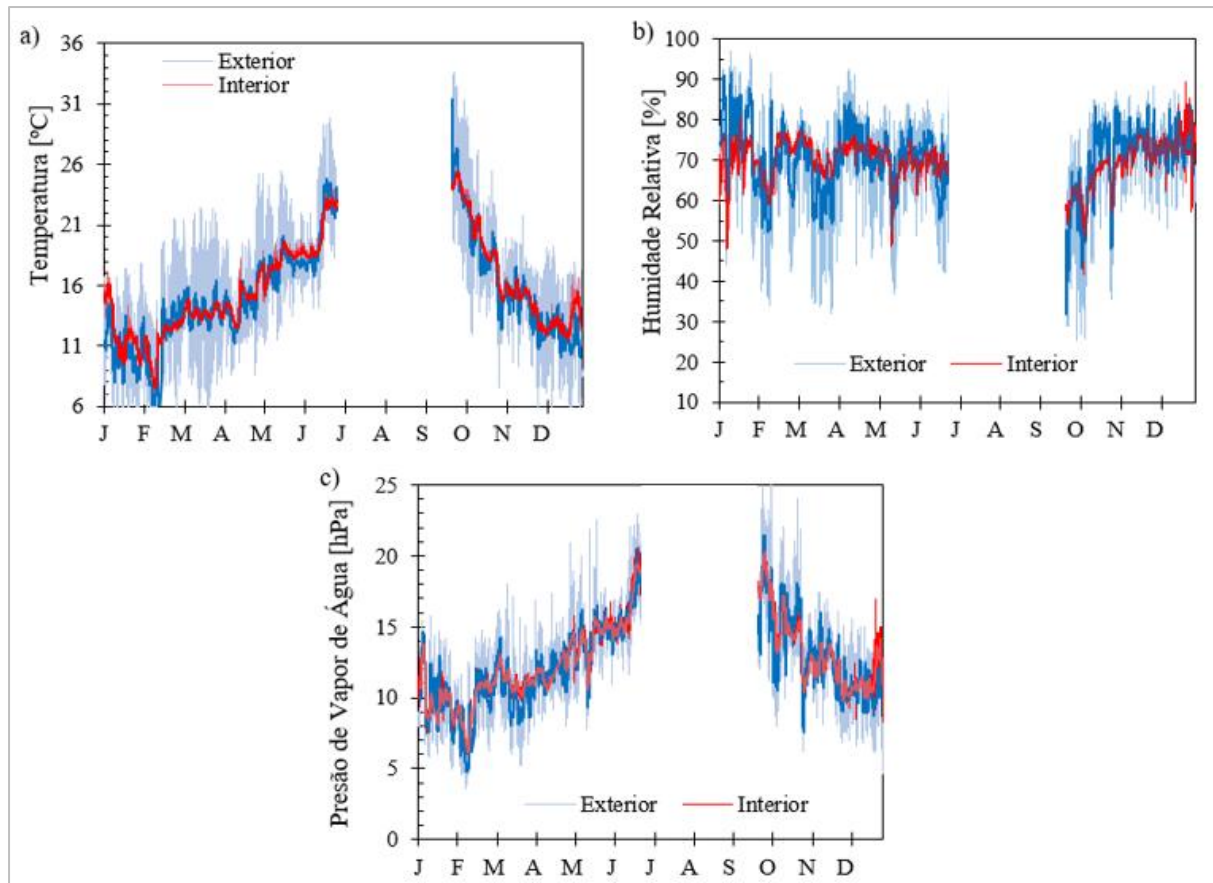


Figura 7.1 - Resultados da campanha de monitorização

Relativamente à humidade relativa, apresentada na Figura 7.1b), o clima interior apresenta menores flutuações ao longo do ano comparativamente às condições exteriores. Não obstante, os valores médios medidos durante a campanha de monitorização foram bastante semelhantes, havendo uma diferença residual de 0,2%. Embora a humidade relativa seja o parâmetro mais utilizado para descrever as condições higrométricas do ar, é importante destacar que esta depende da temperatura e da pressão de vapor de água. A análise individual da humidade relativa não permite concluir se as suas flutuações são causadas por variações de temperatura ou de pressão de vapor de água. A análise da Figura 7.1c) revela que a pressão de vapor de água interna segue de perto a tendência do clima externo, embora com flutuações menores.

7.2. Validação do modelo

7.2.1. Comparação com o clima monitorizado

Depois do edifício corretamente modelado e dos erros geométricos e de input corrigidos, deu-se início à primeira simulação, com o intuito de analisar a validade do ficheiro construído.

Como o caso de estudo não é habitado, torna-se fácil quantificar certas características do edifício, tais como os ganhos solares e os ganhos internos. Assim, considerou-se uma taxa de renovações horárias de ar de 0.2 e, em termos de ganhos solares, considerou-se o fator solar original das janelas (0.85 e 0.75). Dada a desocupação do edifício não foram tomados em consideração os ganhos internos.

Na Figura 7.2 apresentam-se os resultados da primeira simulação, permitindo concluir que o modelo não se aproxima do comportamento real do edifício.

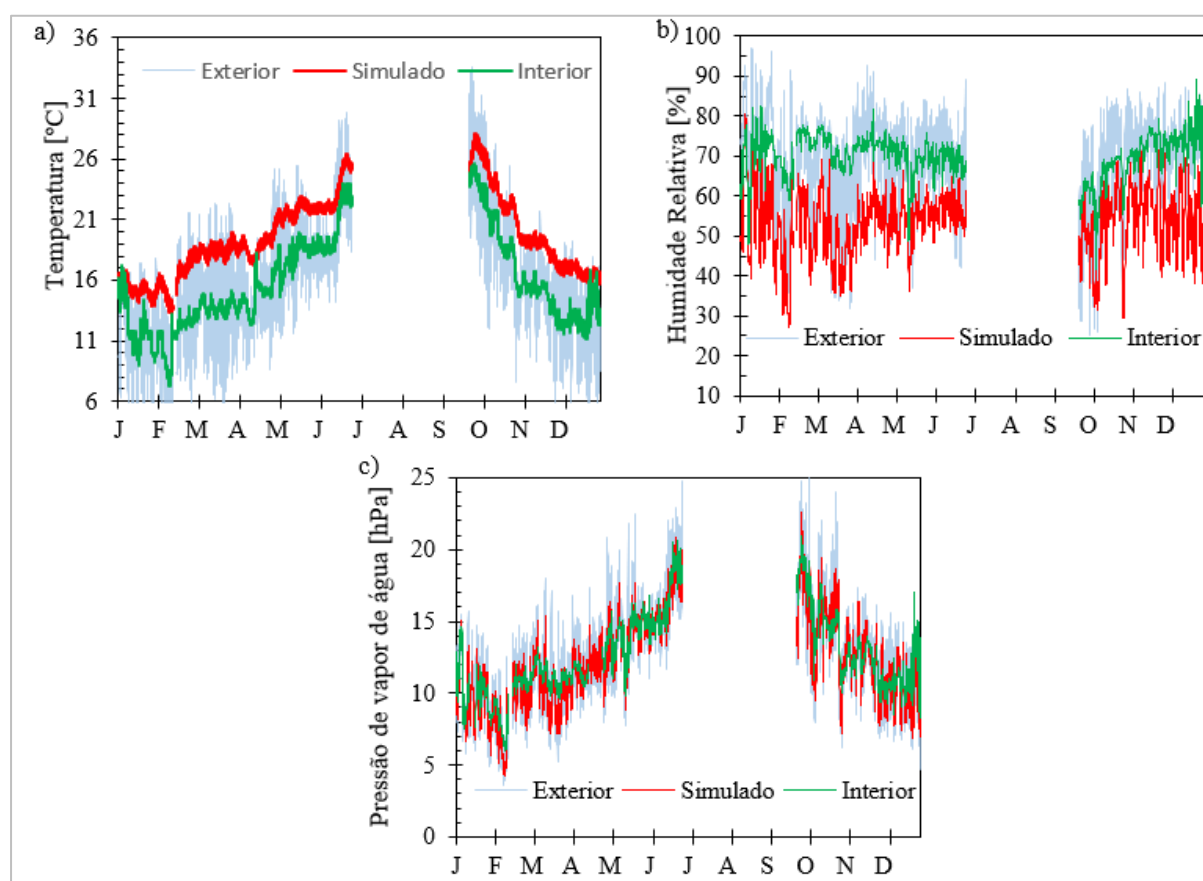


Figura 7.2 - Comparação de valores de temperaturas (a), humidade relativa (b) e pressão de vapor de água (c) medidos e simulados

Analisando a Figura 7.2a), vê-se claramente que existe uma discrepância considerável em termos de valores de temperatura simulada e medida no interior da habitação, sendo a temperatura média 19.4°C e 15.5°C, respetivamente. Todavia, o coeficiente de determinação (R^2) é de 0.92 e, portanto, considerado válido pela Diretriz 14 da ASHRAE. Conclui-se ainda que não é possível utilizar o R^2 como critério individual para validar modelos.

Isto sucede-se porque o desenvolvimento da temperatura simulada é muito semelhante ao da temperatura que foi medida no local, atingindo os picos de temperatura sensivelmente na mesma data, aumentando/reduzindo nos mesmos intervalos de tempo, mas, com valores mais elevados. Apesar do índice estatístico (R^2) apresentar um bom resultado, os valores dos índices CVRMSE e NMBE estão para além do valor limite estipulado, devido a essa diferença de temperaturas. Isto é a prova da necessidade de utilizar estes três índices estatísticos em simultâneo, para não ocorrer o risco de ser induzido em erro.

Analisando a Figura 7.2c), os valores de pressão de vapor de água simulados apresentam uma boa aproximação aos valores determinados no local, apresentando a mesma tendência e valores coerentes. Como a humidade relativa depende da pressão de vapor de água e da temperatura, é normal que os valores de humidade relativa simulados (Figura 7.2.b) estejam abaixo dos reais, visto o ar interior estar mais quente, com a mesma pressão de vapor de água.

Com o intuito de fazer convergir o modelo com a realidade, recorreu-se à literatura para perceber que soluções e métodos estavam a ser utilizados para conseguir validar e calibrar os modelos higrótérmicos.

O Itecons fornece uma folha de cálculo de aplicação do regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação (REH), onde é preenchida toda a informação necessária do edifício em estudo e é emitido um certificado energético do mesmo. Para além do certificado, a folha de cálculo determina o número de renovações horárias de ar, as necessidades energéticas de aquecimento, de arrefecimento, as perdas de calor por pontes térmicas, entre outras informações.

António Antunes, da Universidade do Minho [69] utilizou esta ferramenta de cálculo para avaliar o impacto que a variação das áreas dos envidraçados por orientação, coeficiente de transmissão térmica e fator solar dos vãos envidraçados tinham nas necessidades energéticas de moradia unifamiliar construída na década de 80. Ana Cortez, também da Universidade do Minho [82], fez uso da mesma ferramenta para avaliar a influência de medidas passivas de utilização corrente, tais como a variação do coeficiente de transmissão térmica na cobertura, paredes exteriores e pavimentos. Ambos chegaram a conclusões pertinentes e objetivas, coerentes com a realidade e com o conhecimento científico existente nesta área, comprovando que a utilização desta ferramenta é viável.

Contudo, estes autores não compararam as necessidades energéticas determinadas pela ferramenta fornecida pela Itecons com valores obtidos através de instrumentos de simulação dinâmica. Esse é um dos pontos que irá ser abordado de seguida.

Utilizando esta folha de cálculo do Itecons, determinou-se a taxa de renovação horária de ar para a fração em estudo, tendo em consideração as condutas e grelhas para admissão e exaustão de ar, a permeabilidade ao ar das janelas, altura de edifício e localização. O resultado obtido foi de 0.26 renovações por hora (Figura 7.3). Lembra-se que, na primeira simulação, o valor utilizado foi de $0.2h^{-1}$.

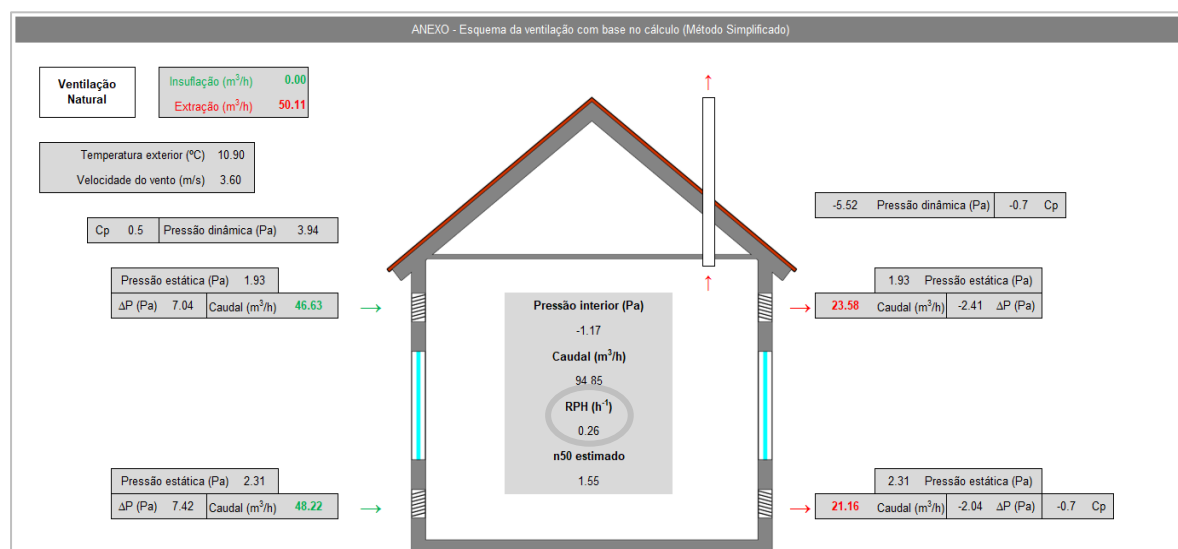


Figura 7.3 - Excerto da folha de cálculo fornecida pelo Itecons. Valor de renovações horárias de ar interior

Susana Rodrigues [83], realizou um estudo de análise e comparação dos resultados obtidos através de simulações no EnergyPlus com os consumos reais, obtidos através da análise de faturas energéticas, utilizando diversas metodologias no âmbito da certificação energética dos edifícios. Esta abordagem é também interessante no sentido em que se têm acesso a um caso de estudo, neste caso um T4 em Lisboa, utilizado como primeira habitação e onde se sabe exatamente quais as necessidades energéticas da habitação, sendo diferente neste aspeto da presente dissertação. Não obstante, a autora conseguiu validar o modelo e apresentar resultados interessantes relativos à diferença entre simulações monozona e multizona, sendo este último método mais fidedigno e apresentando melhores resultados. Porém, nesse modelo validado, a autora considerou os efeitos das pontes térmicas planas e/ou lineares majoradas por um coeficiente.

Tendo em consideração que as pontes térmicas são zonas onde ocorrem maiores perdas de calor, derivada à sua baixa resistência térmica, achou-se prudente na presente dissertação alterar o modelo e, considerar o efeito real e não o efeito majorado das pontes térmicas lineares e planas.

Em complemento e, segundo o trabalho de Júlio Pessoa [84], as pontes térmicas são responsáveis por cerca de 16% de todas as perdas de calor e podem representar aproximadamente 30% das necessidades energéticas globais de um edifício. O autor salienta ainda que, o efeito das pontes térmicas lineares é mais pronunciado que as pontes térmicas planas.

As pontes térmicas planas são relativamente fáceis de implementar no modelo do EnergyPlus bastando, para isso, conhecer as dimensões dos pilares e vigas do edifício e, criar superfícies com a solução construtiva da ponte térmica. Todavia, o programa não considera as pontes térmicas lineares. Para isso, é necessário criar superfícies. Essas superfícies terão a solução construtiva que se entender, com um determinado coeficiente de transmissão térmica e, é com esse valor de U e com as perdas pelas PTL que se determina a área da nova superfície a inserir na geometria do modelo (Tabela 7.2). Neste caso, utilizou-se o mesmo coeficiente de transmissão térmica das pontes térmicas planas, pois já existia essa solução construtiva definida.

Tabela 7.2 - Determinação da área das pontes térmicas lineares

Fração	Hext (W/°C)	U (W/m²°C)	A (m²)
	(1)	(2)	(3) = (1)x(2) ⁻¹
B1	61.26	3.73	16.42

Para determinar as perdas de calor pelas pontes térmicas lineares primeiro é necessário identificá-las, para depois determinar o seu comprimento. Na Figura 7.4, são apresentadas duas plantas da fração em estudo, uma ao nível do pavimento e outra ao nível do teto, com a identificação das pontes térmicas lineares.



Figura 7.4 - Identificação das pontes térmicas lineares

Em alguns estudos, como [72, 74 e 89], na tentativa de conseguir validar o modelo, os autores optaram por alterar o fator solar dos vãos envidraçados, por norma reduzindo-o, de forma a compensar a sujidade dos envidraçados que impede a radiação solar de aquecer o espaço interior. Rafael Raposo, [85] conseguiu validar o modelo com medições feitas no local, reduzindo o fator solar de algumas janelas e aumento-o noutras. O autor também explorou os efeitos da alteração da rugosidade dos materiais, mas concluiu ser infrutuoso. Uma variação do calor específico dos materiais aliado com o fator solar alterado também trouxe boas aproximações para este caso de estudo.

Como os resultados obtidos na 1ª simulação, no presente caso de estudo, apresentavam temperaturas muito superiores às medidas no local, também se optou por reduzir o fator solar, não por considerar o vidro sujo, mas para considerar que os dispositivos de proteção solar estavam ativos. Novamente, como a habitação é utilizada como casa de férias, esta passa a maior parte do tempo com as janelas e com as proteções solares fechadas. Assim e, segundo o manual SCE [60], considerou-se o fator solar do vão envidraçado com vidro corrente duplo e dispositivo de proteção solar exterior de portada de lâminas fixas de 0.09, invés de 0.85 utilizado inicialmente.

Outros trabalhos também optaram por comparar diferentes zonas térmicas com diferentes estações do ano ou diferentes intervalos temporais, como duas semanas invés do ano inteiro. Todavia não se achou apropriadas essas tentativas de validação do modelo.

Foi ainda sujeito a alterações o ficheiro climático usado no EnergyPlus mas, o primeiro ficheiro climático criado foi o que devolveu melhores resultados. Este foi construído com base nos dados climáticos obtidos através da campanha de monitorização realizada e descrita anteriormente.

Feitas as alterações mencionadas anteriormente, sintetizadas na Tabela 7.3, simulou-se novamente o modelo e obteve-se os seguintes valores:

Tabela 7.3- Alterações realizadas ao modelo

	1ª tentativa	Modelo final
Fator solar	0.85 / 0.75	0.09
Renovações horárias de ar (h^{-1})	0.2	0.26
Pontes térmicas (PTP e PTL)	Não	Sim
$R^2 > 0,75$		
(Temperatura; Humidade relativa; Pressão de vapor de água)	0,92; 0,50; 0,81	0,93; 0,51; 0,81
$CV(RMSE) < 30\%$		
(Temperatura; Humidade relativa; Pressão de vapor de água)	10,1; 14,4; 11,2	10,8; 14,6; 11,2
$NMBE < 10\%$		
(Temperatura; Humidade relativa; Pressão de vapor de água)	8,8; 11,5; 8,8	9,7; 12; 8,8

Para o período de simulação de um ano, os índices estatísticos dos erros apresentam-se dentro dos valores limite para a temperatura interior ($R^2=0.93 > 0.75$; $CV(RMSE)=10.8\% < 30\%$; $NMBE=9.7\% < 10\%$) e para a pressão de vapor de água ($R^2=0.81 > 0.75$; $CV(RMSE)=11.2\% < 30\%$; $NMBE=8.8\% < 10\%$). Relativamente aos valores de humidade relativa, este já não foram tão satisfatórios ($R^2=0.51 < 0.75$; $CV(RMSE)=14.6\% < 30\%$; $NMBE=12 > 10\%$), conforme é visível na Figura 7.5.

Kramer, Schijndel e Schellen [86] validaram o modelo de um museu histórico em Amsterdão com erros máximos de 2°C para a temperatura interior e de 4% para a humidade relativa. Noutros estudos, como por exemplo [57] e [58] os modelos de edifícios históricos, localizados na cidade do Porto, foram considerados validados quando os erros eram inferiores a 1°C e 4,5%, para a temperatura e humidade relativa, respetivamente. Como é possível observar, existe uma disparidade entre diversos autores que, consideram o seu modelo validado com diferentes graus de exigência. Assim, face à necessidade de existir uma conformidade de valores de erros considerados admissíveis, foi recentemente proposto um novo método [89], que propõe três níveis de exatidão: excelente, aceitável e baixa.

Os resultados excelentes são observados quando os erros estão compreendidos entre $\pm 1^\circ\text{C}$ (T) e $\pm 5\%$ (HR), enquanto são aceitáveis os erros que estiverem compreendidos entre $\pm 3^\circ\text{C}$ (T) e $\pm 10\%$ (RH). A validação e comparação dos erros é definida com base no 95º percentil.

Para o presente caso de estudo, e após a construção do modelo final, o percentil 95º dos erros apresentava valores de erro de 1.3°C para a temperatura e de 1% para a humidade relativa, sendo considerados bastante aceitáveis, segundo [89].

Globalmente, o modelo construído é considerado calibrado e validado para os valores de temperatura e de pressão de vapor de água, visto cumprir os limiares definidos para os índices estatísticos dos erros [79] mencionados anteriormente (R^2 , CV(RMSE) e NMBE) e, apresentar um nível de exatidão física considerado aceitável.

Em termos de humidade relativa, o modelo não pode ser considerado calibrado visto que os valores de R^2 e NMBE não foram satisfatórios. A comparação dos erros definida com base no 95º percentil permite validar o modelo.

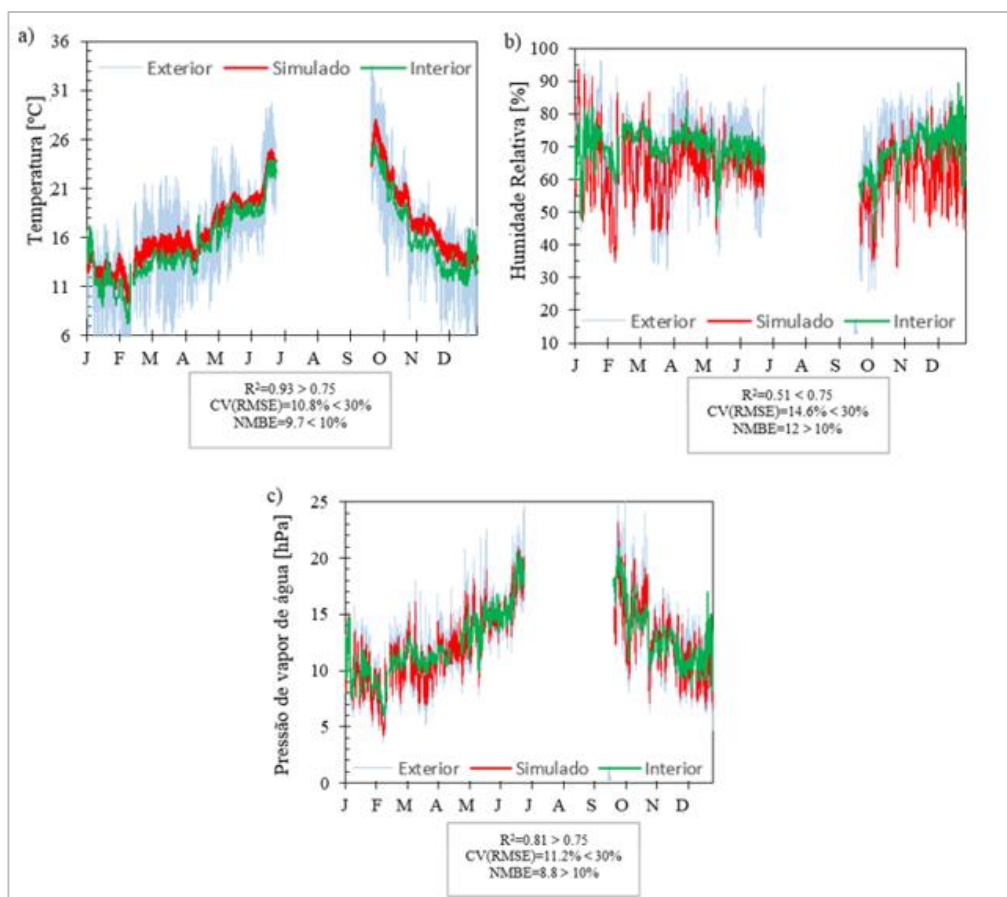


Figura 7.5 - Comparação de valores de temperaturas (a), humidade relativa (b) e pressão de vapor de água (c) medidos e simulados

7.2.2. Comparação dos dados energéticos

Com o novo modelo definido, procedeu-se a uma nova simulação, desta vez com o objetivo de retirar os valores de Nic e Nvc das frações para condições nominais e comparar os resultados com o cálculo estático definido na legislação nacional no seguimento do DL 101-D/2020 [32] e demais portarias [19].

Com o auxílio da folha de cálculo fornecida pelo Itecons, foi possível determinar as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento também em condições nominais, para ter uma referência com que validar o Nic e Nvc, à semelhança do que se fez anteriormente.

Porém, quando cruzados os valores simulados com os obtidos pela ferramenta do Itecons não se obteve uma boa aproximação de valores, como se pode concluir com a análise da Figura 7.6.

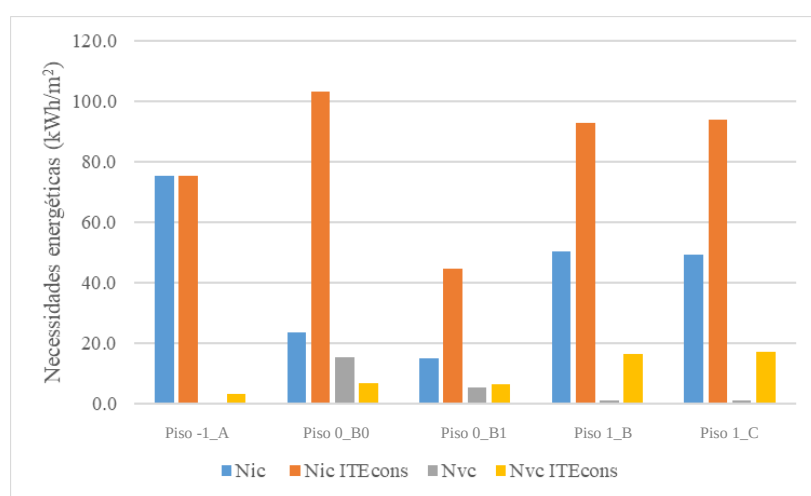


Figura 7.6 - Comparação de valores de necessidades de aquecimento e arrefecimento simulados.

Apesar do modelo previamente validado com base nos dados medidos no local, constatou-se a impossibilidade de obter resultados de consumo energético nominal semelhantes aos devolvidos pela metodologia de cálculo preconizada na legislação nacional. Isto deve-se ao facto de se estar a comparar uma ferramenta de cálculo em Excel (método estacionário) com uma ferramenta de modelação dinâmica, pelo que é natural obter resultados muito diferentes. Note-se ainda que, o caso de estudo utilizado na validação do modelo é a fração Piso0_B1.

Considera-se que deve ser feita mais investigação neste campo para validar o modelo de cálculo nacional por comparação com a simulação dinâmica e com base em valores medidos. Contudo, uma vez que não é este o âmbito da presente dissertação, prosseguiu-se com o modelo validado por comparação com os valores medidos de temperatura e humidade relativa.

7.3. Reabilitação passiva

A evolução da legislação portuguesa em relação aos requisitos térmicos em edifícios de habitação tem sido marcada por um progressivo aumento das exigências ao longo do tempo, com o objetivo de promover a eficiência energética nos edifícios, como já referenciado anteriormente no capítulo dedicado à evolução legislativa. Com o objetivo de reabilitar o edifício em estudo, primeiro é necessário enquadrá-lo nesse contexto.

O país está dividido em 6 zonas climáticas. 3 zonas para o verão e 3 zonas para o inverno. Cada zona climática de inverno (I1, I2 e I3) tem requisitos térmicos diferentes para as soluções construtivas, derivadas ao clima distinto entre cada região.

O concelho de Odemira está localizado na zona oeste do Alentejo e, portanto, na zona climática de inverno I1, a que apresenta os requisitos mais brandos. Na Tabela 7.4 está sintetizado os valores de coeficientes de transmissão térmica da envolvente opaca e dos envidraçados existentes no edifício em estudo e os valores de referência, para essa mesma zona climática [19].

Tabela 7.4 - Valores de coeficiente de transmissão térmica versus de referência [19]

	U (W/m ² .°C)	
	Existente	Referência
Elementos opacos verticais	1,3	0,50
Vãos envidraçados	4,5	
	3,2	2,8
	6,0	

Conforme expectável e, tendo sido o edifício construído entre a década de 70 e 80, não só as soluções construtivas existentes não cumprem os valores regulamentais, como o ultrapassam em larga escala.

O objetivo daqui em diante será testar o impacto que os vãos envidraçados e a envolvente exterior opaca têm nos consumos energéticos da fração em estudo.

7.4. Impacto das medidas de reabilitação no consumo energético

7.4.1. Impacto da melhoria da envolvente opaca

Com o intuito de avaliar o impacto do isolamento térmico no edifício existente, foi efetuado um conjunto inicial de simulações, testando a colocação de isolamento térmico pelo interior, mantendo todas as outras características do edifício iguais.

Na Figura 7.7 avalia-se o impacto que a aplicação de isolamento térmico, e consequentemente a redução do coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca, traz nos consumos de energia para a estação de aquecimento, de arrefecimento e para o consumo total.

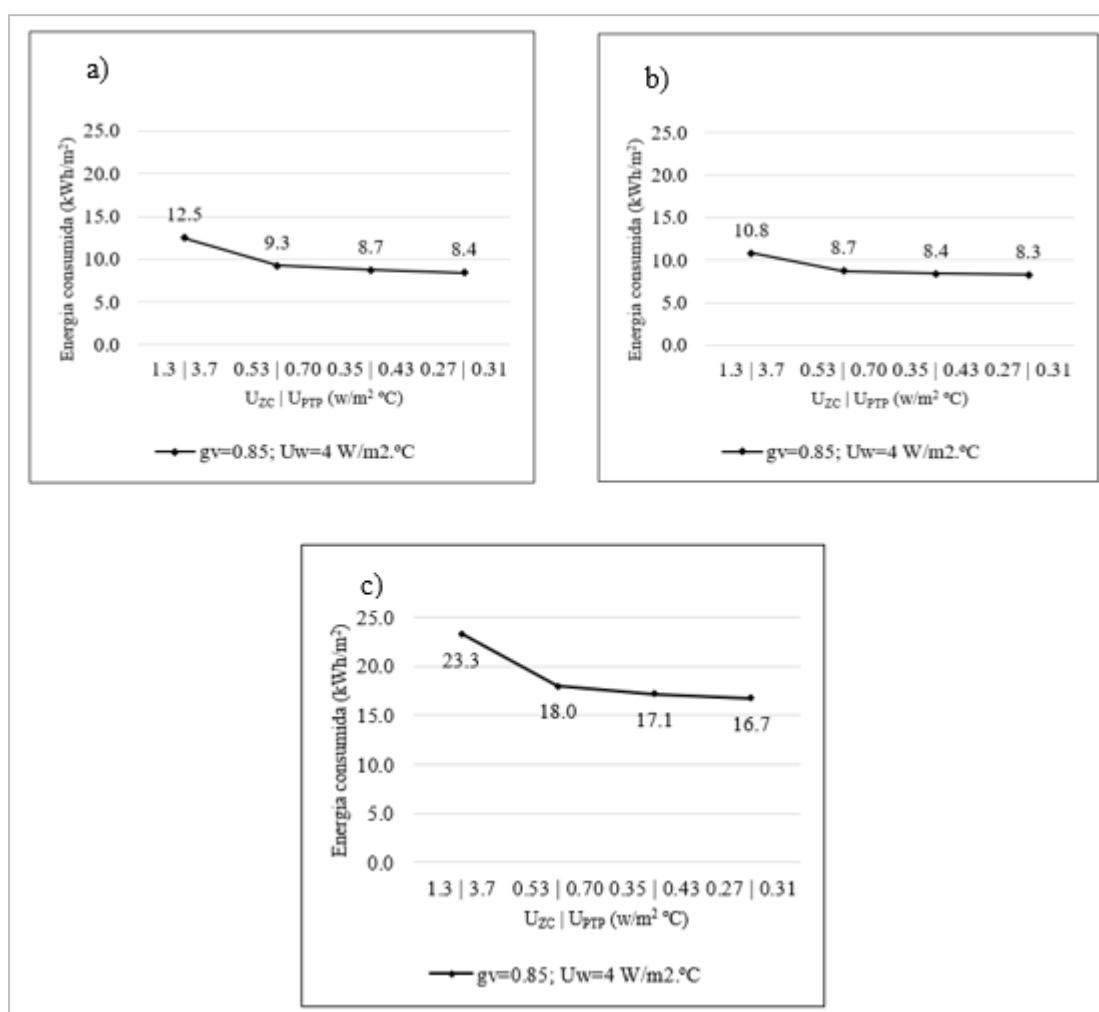


Figura 7.7 - Impacto da redução do coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca.

a) Consumo de energia para aquecimento; b) Consumo de energia para arrefecimento; c) Consumo de energia total

Com um envidraçado de U_w de $4 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e fator solar de 0.85, a solução construtiva sem isolamento térmico ($U_{ZC}=1,3 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $U_{PTP}=3,7 \text{ W/m}^2\text{°C}$) apresenta naturalmente os maiores consumos.

A maior diferença em termos de consumos energéticos totais acontece quando se aplicam três centímetros de lã mineral, reduzindo o consumo de energia total em cerca de 30%. Dos três para os seis centímetros de isolamento, a diferença reduz substancialmente, sendo de apenas 5%, e de 2% para os nove centímetros.

É ainda expectável que, com o aumento da espessura de isolamento para além dos nove centímetros, a aplicação de isolamento atinga uma assíntota e deixe de contribuir para a melhoria da eficiência do edifício, tal como outros autores também comprovaram [76].

Com base nos valores de output dos Energyplus, foi construída a Figura 7.8, onde estão quantificados as perdas e os ganhos de calor do edifício.

Conforme mencionado, a redução do valor de U da envolvente opaca reduz as trocas de calor com o exterior através desta. Mantendo-se todas as outras condições inalteráveis, os ganhos e as perdas de calor pelos vãos envidraçados, ventilação, ganhos internos e ganhos solares mantêm-se também praticamente os mesmos. Assim, dá-se uma redução geral do consumo de energia na estação de aquecimento, na estação de arrefecimento e, consequentemente no consumo energético ao longo do ano.

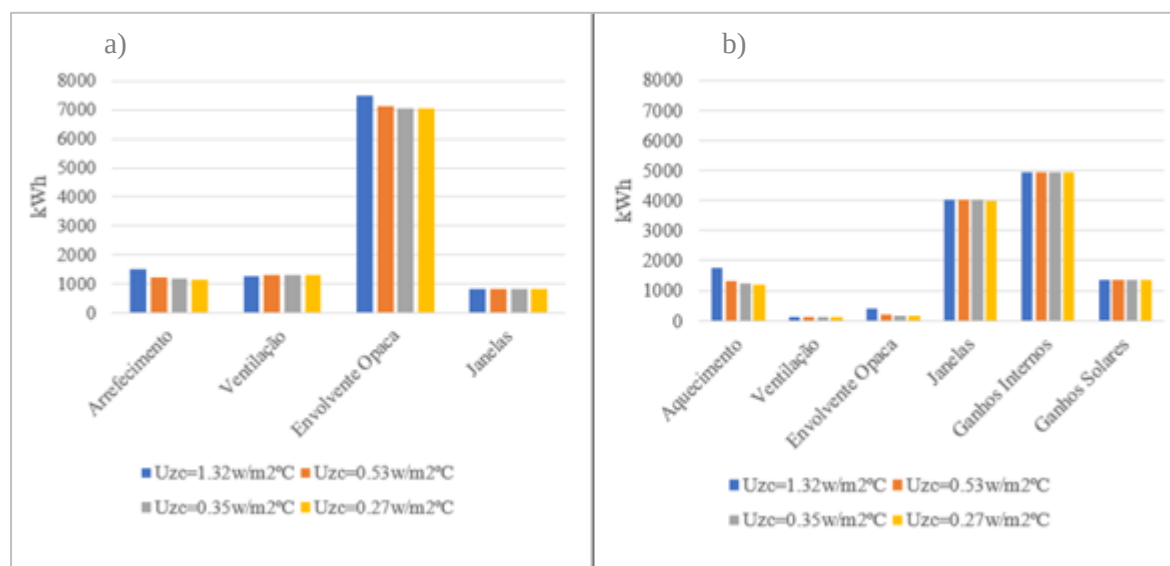


Figura 7.8 -a) Perdas de calor com a redução de U da envolvente opaca; b) Ganhos de calor com a redução de U da envolvente opaca

Quando foram definidos os outputs do Energyplus selecionaram-se, para além das variáveis já analisadas, as temperaturas superficiais interiores da envolvente opaca. Esta depende da temperatura interior e exterior, mas principalmente do coeficiente de transmissão térmica da solução construtiva da parede. A temperatura superficial dos elementos, em regime permanente, calcula-se da seguinte forma:

$$\theta_{si} = \theta_i - \frac{1}{h_i} \cdot U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad 11$$

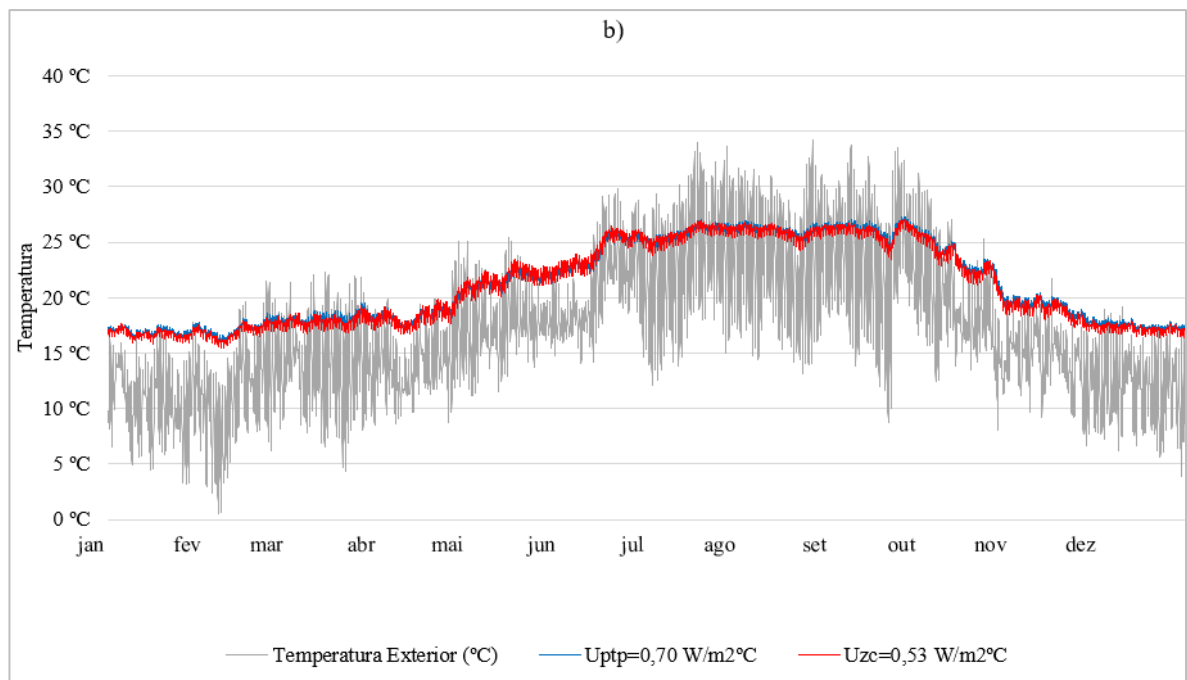
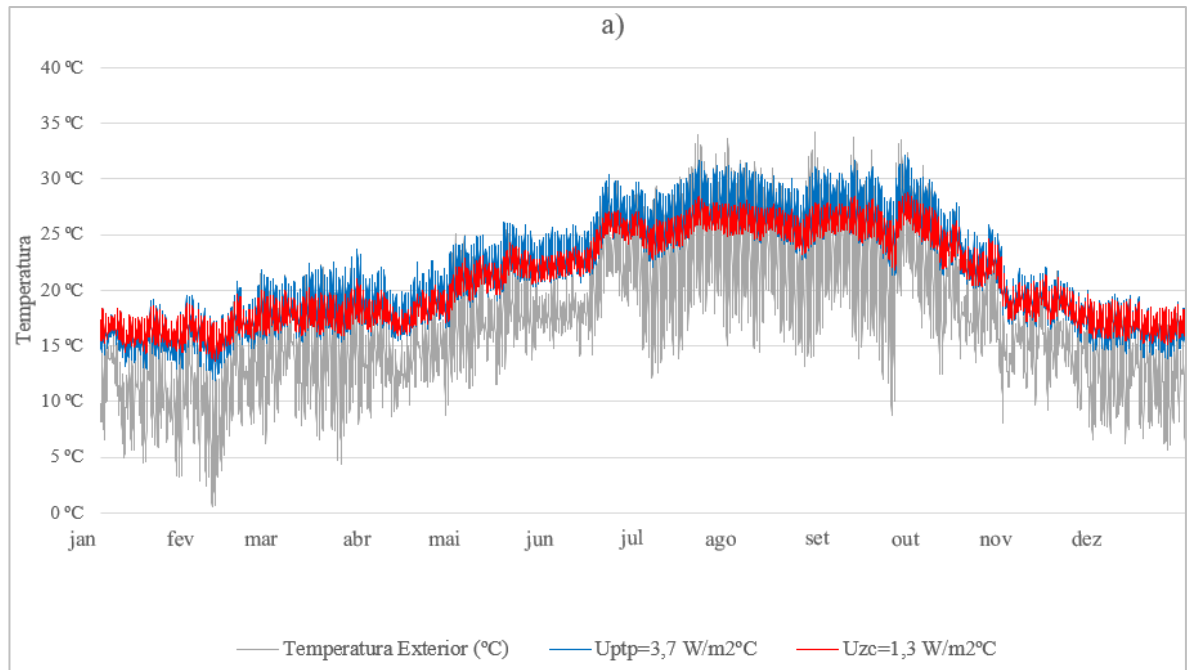
Em que:

- θ_{si} -Temperatura superficial
- θ_i -Temperatura interior
- h_i -Condutância térmica superficial interior
- U -Coeficiente de transmissão térmica
- θ_e -Temperatura exterior

No que toca à evolução das temperaturas superficiais com a alteração do coeficiente de transmissão térmica da envolvente e, tal como acontece para as necessidades energéticas, o aumento sucessivo da espessura de isolamento térmico deixa de trazer melhorias consideradas relevantes a partir do momento em que se aplica 3cm de isolamento térmico. Analisando a Figura 7.9, constata-se isso mesmo, onde no gráfico a) existem grandes amplitudes térmicas superficiais tanto em zona corrente como em zona de ponte térmica.

Esta amplitude é derivada à inexistência de isolamento, o que faz com que com a variação de temperatura exterior se faça sentir com maior expressão no interior da habitação. Para este caso, a temperatura superficial máxima acontece na zona de ponte térmica, que atinge 32°C, sendo a temperatura exterior máxima de 34°C, conforme se observa na Tabela 7.5.

A partir do momento que se aplica isolamento térmica na solução construtiva (Figura 7.9b), c) e d)) os valores de temperatura superficial encontram-se muito mais concentrados, sendo praticamente coincidentes os valores entre zona corrente e ponte térmica. Ambos os valores máximos e mínimos de temperaturas são bastante semelhantes entre as 3 espessuras de isolamento, conforme Tabela 7.5



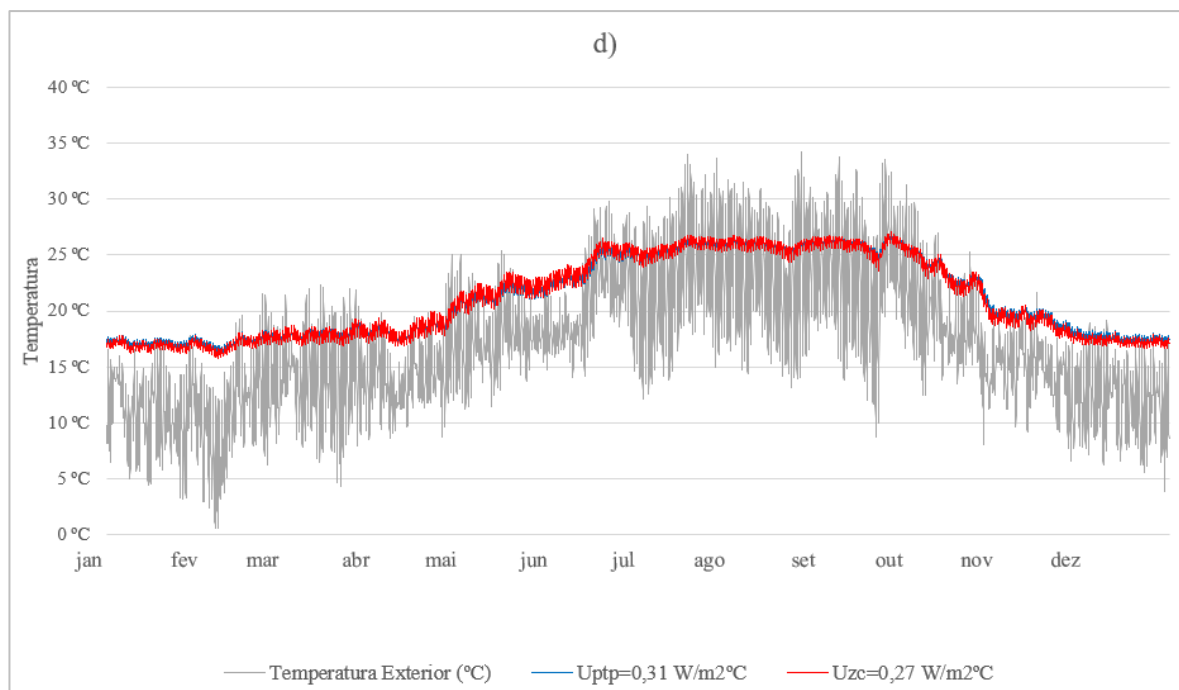
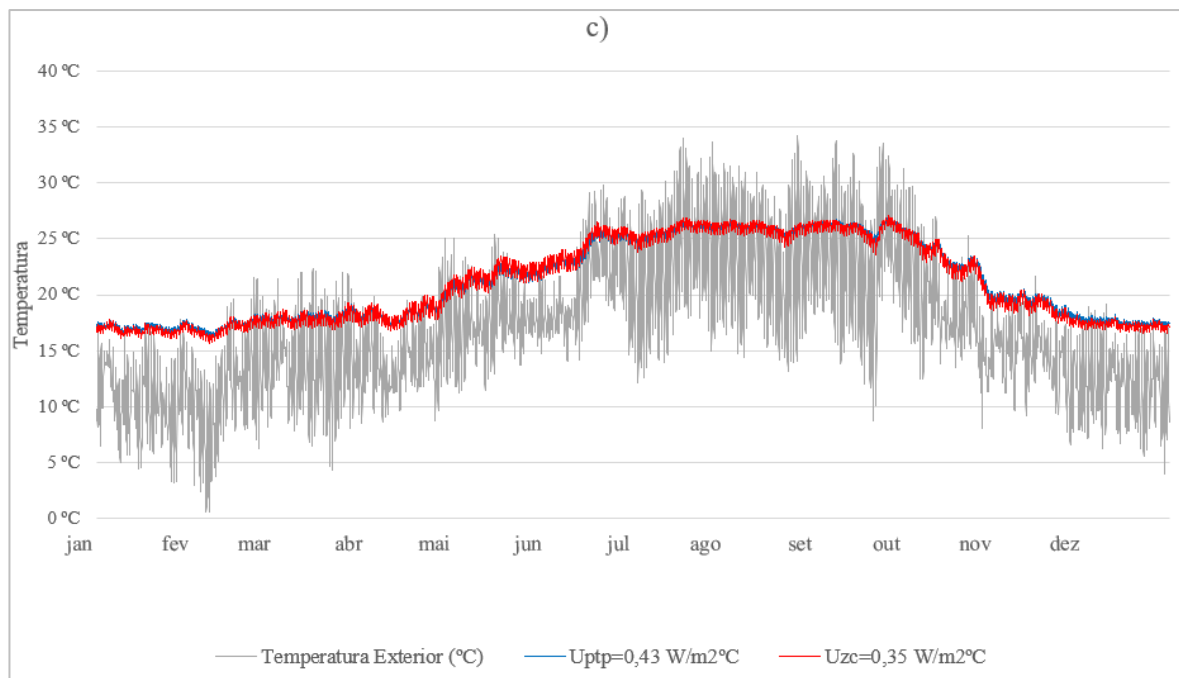


Figura 7.9) - Temperaturas superficiais interiores com a redução do coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca. a) $U_{tp}=3,7 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $U_{zc}=1,3 \text{ W/m}^2\text{°C}$; b) $U_{tp}=0,70 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $U_{zc}=0,53 \text{ W/m}^2\text{°C}$; c) $U_{tp}=0,43 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $U_{zc}=0,35 \text{ W/m}^2\text{°C}$; d) $U_{tp}=0,31 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $U_{zc}=0,27 \text{ W/m}^2\text{°C}$

Tabela 7.5 - Temperaturas superficiais máximas e mínimas

	Envolvente opaca	
	T _{min} (°C)	T _{máx} (°C)
U _{zc} =1,32 w/m ² °C	13.7	28.7
U _{tp} =3,73 w/m ² °C	11.8	32.1
U _{zc} =0,53 w/m ² °C	15.4	27.1
U _{tp} =0,70 w/m ² °C	15.8	27.3
U _{zc} =0,35 w/m ² °C	15.7	27.1
U _{tp} =0,43 w/m ² °C	16.1	26.9
U _{zc} =0,27 w/m ² °C	15.8	27.0
U _{tp} =0,31 w/m ² °C	16.3	26.8

De acordo com alguns autores [90] e [58], para o estudo de uma fração autónoma situada em Lisboa, conclui-se que a redução do coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca eram dos maiores responsáveis pela redução das necessidades energéticas totais, à semelhança do presente estudo.

O estudo realizado por [58] analisou o impacto que a posição do isolamento térmico tinha nos consumos energéticos de uma habitação e, concluiu que durante a estação de aquecimento, as soluções construtivas com isolamento térmico colocado pelo lado interior da parede revelam menores perdas de calor através da envolvente opaca quando comparada com soluções de isolamento pelo exterior ou de paredes duplas. O isolamento térmico de paredes colocado pelo interior da fração manifesta ainda necessidades de aquecimento mais reduzidas.

No que concerne ao período de arrefecimento, destacou-se novamente a solução que utiliza isolamento térmico na face interior, mas desta vez exigindo maiores necessidades energéticas, uma vez que existe uma maior dificuldade para dissipar os ganhos solares e internos.

Apesar de a solução com isolamento pelo interior ser mais adequada para a estação de aquecimento e a menos apropriada para a época de arrefecimento, é a que apresenta melhores resultados em termos globais de acordo com [58]. Contudo essa diferença pode ser considerada não muito relevante, tal como explicado em [76].

Nos mesmos estudos [90] e [58], os autores também concluíram que, o efeito da inércia térmica nas necessidades energéticas é consideravelmente diminuto.

7.4.2. Impacto da melhoria da envolvente envidraçada

À semelhança do estudo realizado para o impacto da envolvente opaca, apresenta-se de seguida o impacto que a melhoria da envolvente envidraçada tem no caso de estudo nomeadamente, a alteração do coeficiente de transmissão térmica do envidraçado e o fator solar de forma independente, mantendo a envolvente opaca inalterada.

7.4.2.1. Impacto da melhoria do coeficiente de transmissão térmica

Analisando a Figura 7.10 e o impacto que a redução do coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados tem nos consumos energéticos, conclui-se que de forma geral é benéfica. Contudo, uma redução máxima de apenas 6% no consumo total de energia faz com que não seja tão vantajosa como a alteração do U na envolvente opaca.

Na situação de verão, a redução do coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados provoca um aumento ténue nas necessidades energéticas. Isto deve-se ao facto de uma caixilharia melhor trocar menos calor com o exterior. Portanto, se se está a limitar a quantidade de calor que o interior do edifício pode perder para o exterior e, se a mesma quantidade de radiação solar passa pelo envidraçado, porque não se alterou o fator solar, ocorre o sobreaquecimento do espaço interior.

Já na estação de aquecimento, onde o pretendido é reter o calor no interior da habitação, a redução do U_w é benéfica, pelas mesmas razões.

Estas variações apresentam uma pequena amplitude dada a reduzida área de envidraçados face à área de envolvente opaca. Enquanto a fração em estudo possui uma área de paredes de 442,75 m², apenas tem 26,13 m² de envidraçados, o que se traduz num rácio de 5.9%.

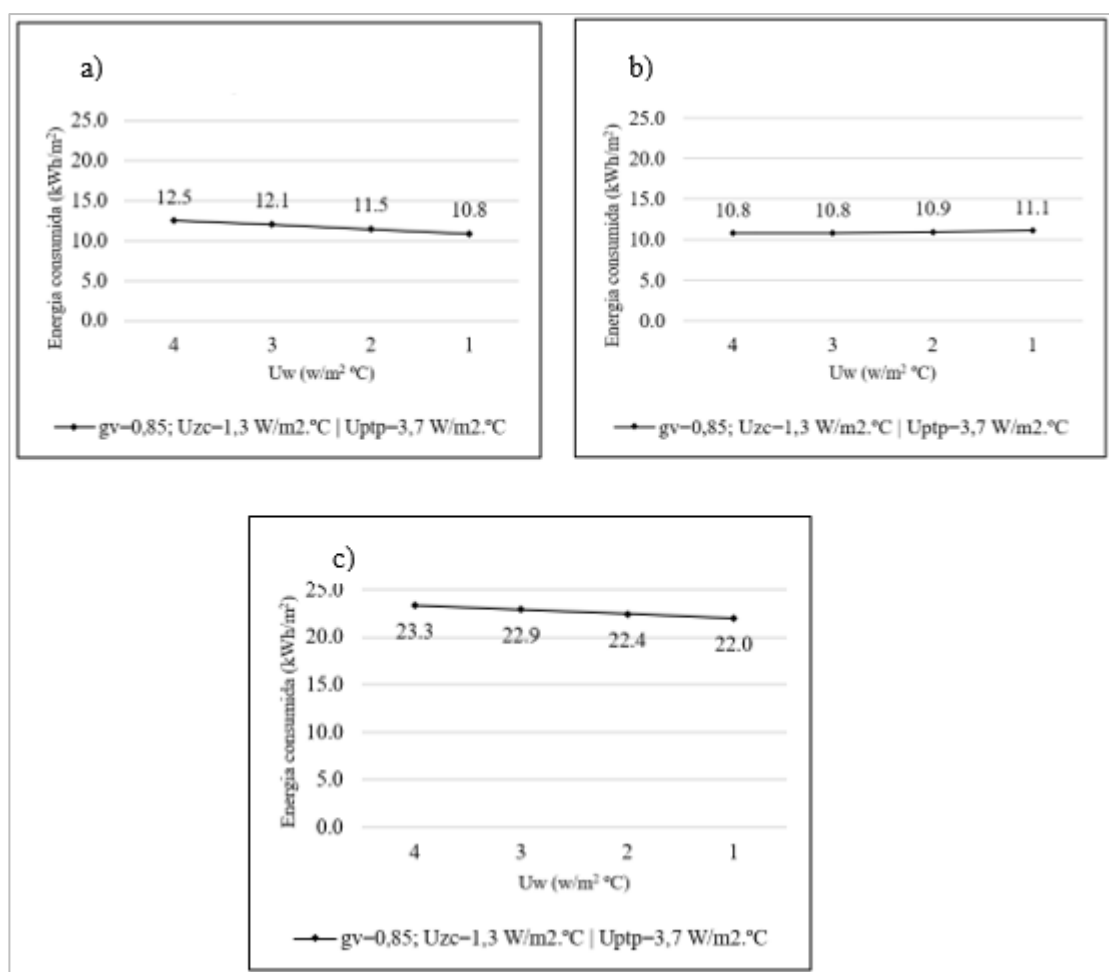


Figura 7.10 - Impacto da redução do coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado. a) Consumo de energia para aquecimento; b) Consumo de energia para arrefecimento; c) Consumo de energia total

Na Figura 7.11 comprova-se que a redução de U dos vãos envidraçados provoca uma redução da perda de calor por estes. Contudo, as perdas de calor pela envolvente opaca sofrem um ligeiro aumento. Isto é justificável pelo simples facto de que a solução da envolvente opaca, com um coeficiente de transmissão térmica mais elevado, torna-se o caminho preferencial para as trocas de calor, visto estarmos a melhorar as condições das caixilharias. Olhando ainda mais em pormenor, as perdas de calor pela envolvente opaca só começam a tornar-se superiores quando o valor de U_w desce para valores muito próximos ou inferiores do U_{zc} e U_{ptp} , como $U_w=2 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ e $U_w=1 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

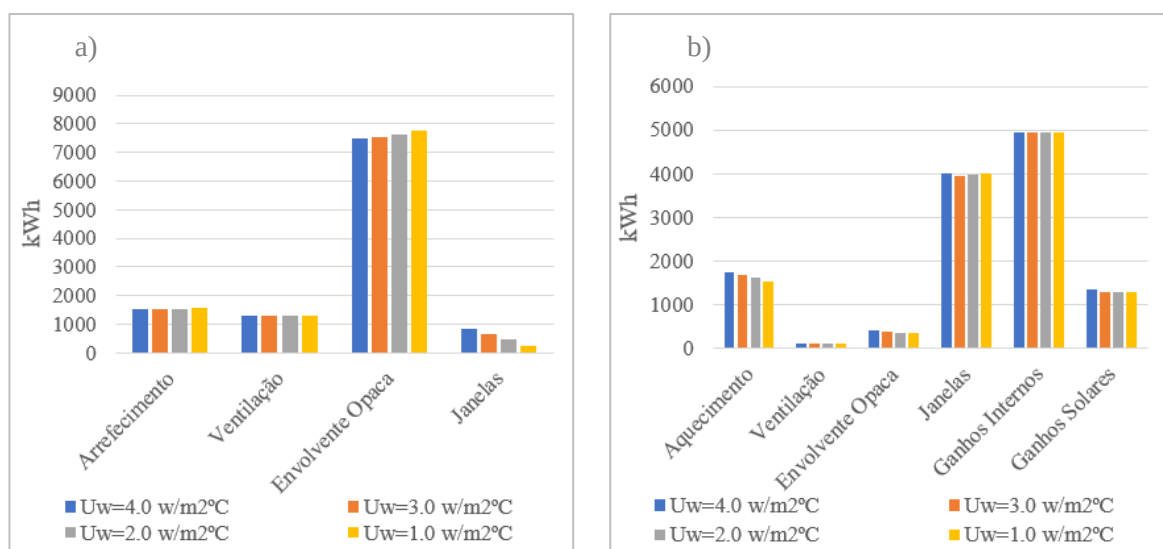


Figura 7.11 – a) Perdas de calor com a redução de U dos vãos envidraçados; b) Ganhos de calor com a redução de U dos vãos envidraçados

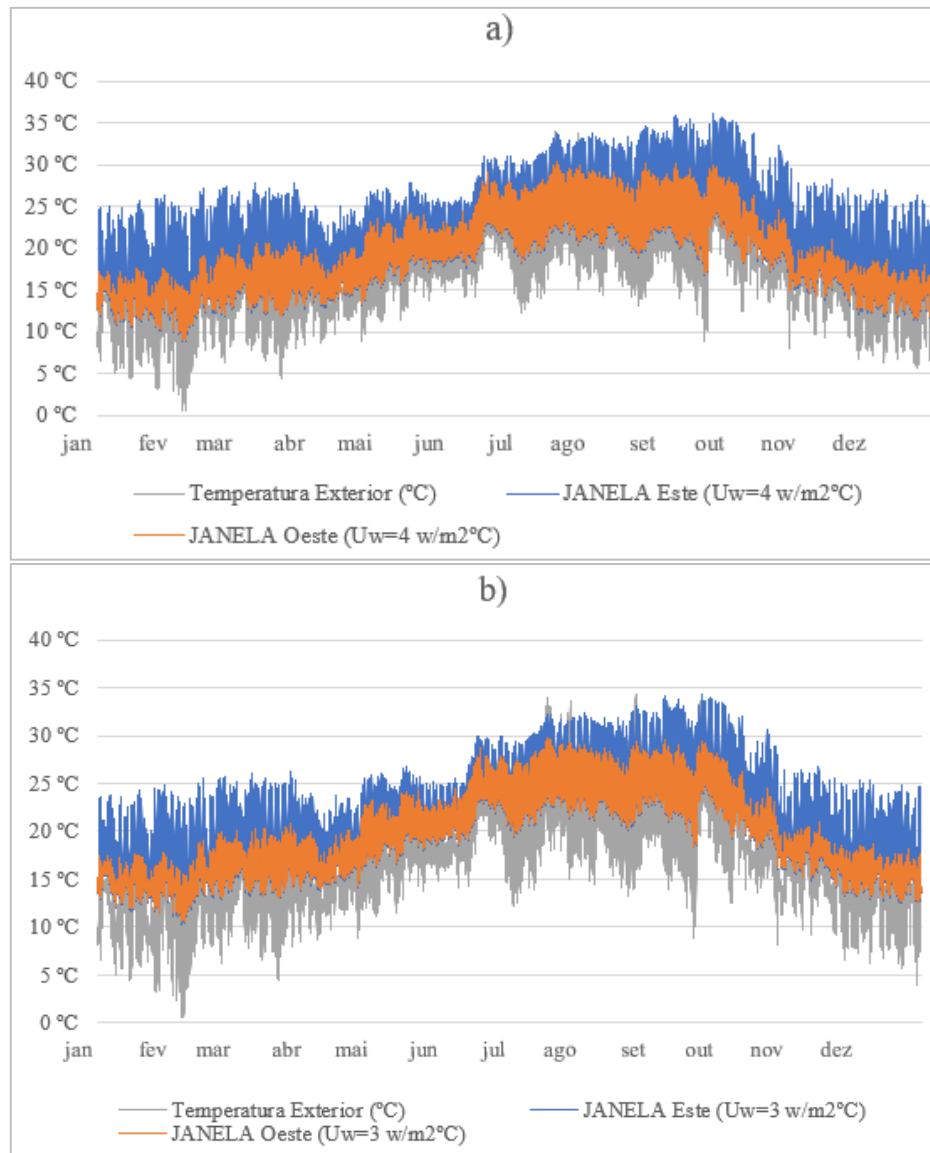
À semelhança do estudo que foi feito para a envolvente opaca, analisa-se agora as temperaturas superficiais interiores dos vãos envidraçados, com o objetivo de analisar o impacto que a redução do coeficiente de transmissão térmica provoca.

Tal como já demonstrado para a envolvente opaca, a redução de U faz com que a temperatura mínima aumente e a temperatura máxima diminua. Os vãos envidraçados não são exceção.

Com a diminuição do coeficiente de transmissão térmica, as temperaturas superficiais apresentam uma menor dispersão de valores, sendo mais previsíveis e constantes, como se pode observar na Figura 7.12. A título de exemplo e, fazendo uma comparação direta entre uma janela com valor de $U=4 \text{ w/m}^2\text{°C}$ e outra com $U=1 \text{ w/m}^2\text{°C}$, é possível chegar a diferenças de 6.5°C , o que representa um aumento de temperatura máxima de 22% nas janelas orientadas a este, conforme pode ser visto na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 - Temperaturas superficiais dos vãos envidraçados

	Janela Este		Janela Oeste	
	T _{min} (°C)	T _{máx} (°C)	T _{min} (°C)	T _{máx} (°C)
U _w =4 w/m ² °C	8.78	36.05	9.05	30.38
U _w =3 w/m ² °C	10.30	34.23	10.52	29.78
U _w =2 w/m ² °C	12.04	32.09	12.19	29.09
U _w =1 w/m ² °C	14.00	29.57	14.08	28.53



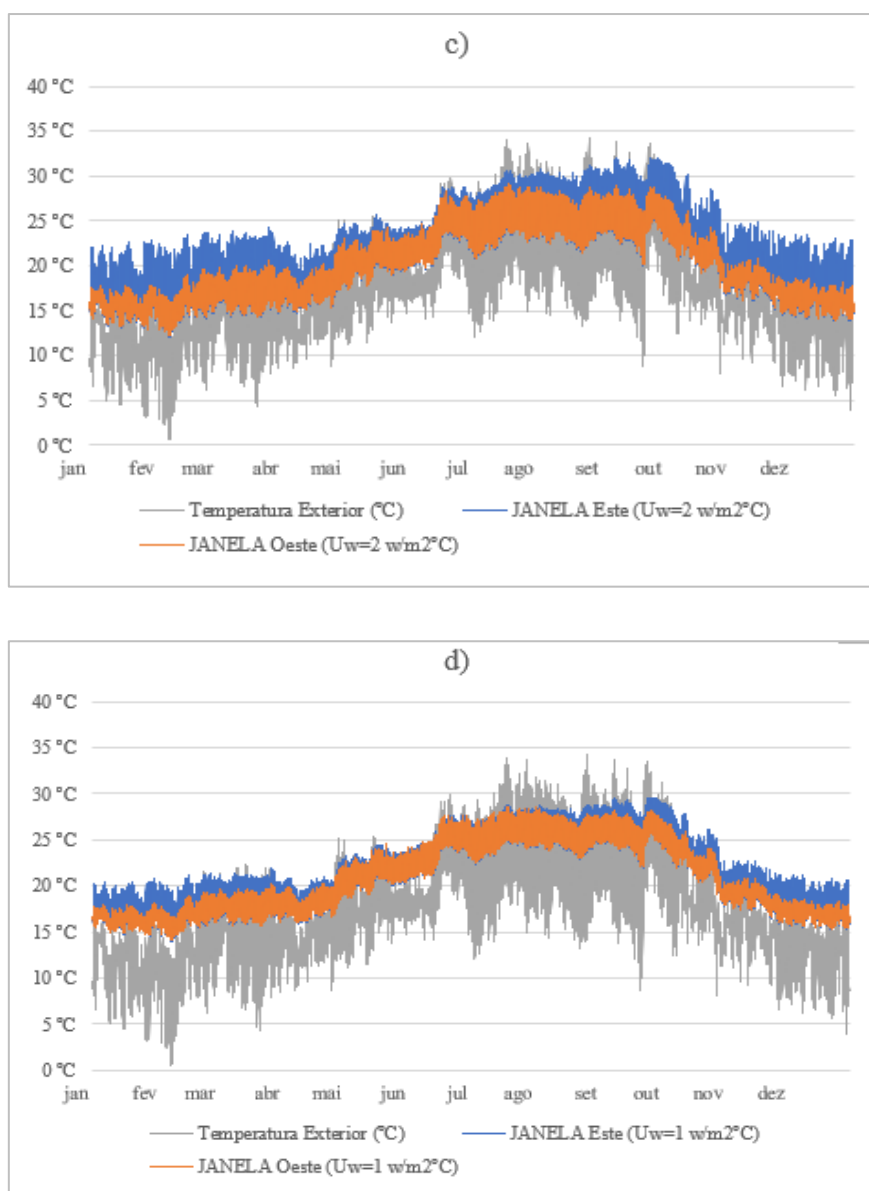


Figura 7.12. Temperaturas superficiais com a redução do coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados. a) $U_w = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$; b) $U_w = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$; c) $U_w = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$; d) $U_w = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$

7.4.2.2. Impacto da melhoria do fator solar

O fator solar traduz a quantidade de radiação solar incidente que passa pelo vidro. Ora, se entra menos radiação solar no interior do espaço no decorrer da estação de aquecimento, naturalmente haverá maior consumo de energia para o aquecer. Este aumento poderá chegar aos 30% e leva à simulação onde há maior consumo de energia total, 24kWh/m^2 , como se pode confirmar com a análise da Figura 7.13.

Pela mesma lógica, mas na situação oposta, durante o verão, em que se pretende minimizar a temperatura ambiente, a redução do fator solar torna-se benéfica.

Conclui-se então que, de forma geral, a redução do fator solar per si não traz benefícios em termos de consumos energéticos durante um ano completo. Note-se que foi considerada a ativação automática das proteções solares exteriores para incidências superiores a 300W/m^2 . Uma gestão mais eficiente e otimizada desta ativação durante o inverno poderá resultar numa melhoria global do comportamento energético do edifício.

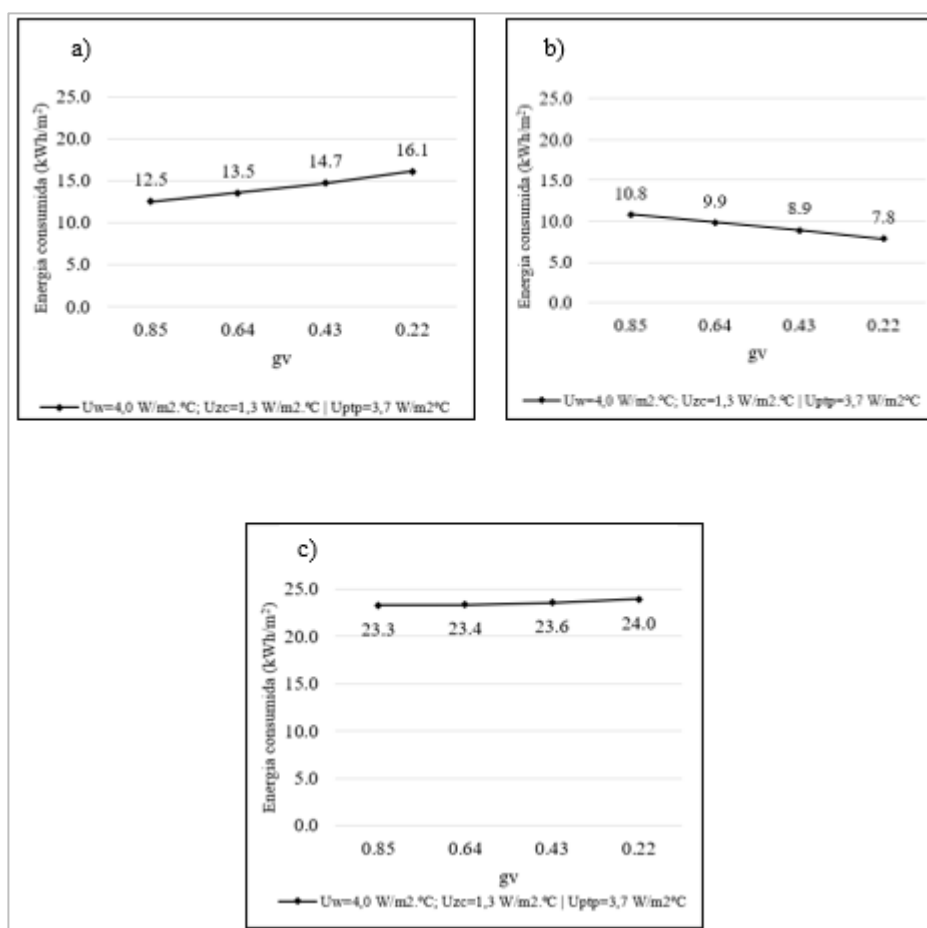


Figura 7.13. Impacto da redução do fator solar. a) Consumo de energia para aquecimento; b) Consumo de energia para arrefecimento; c) Consumo de energia total

Olhando mais pormenorizadamente para o efeito da redução do fator solar, através da análise da Figura

7.14, verifica-se que os ganhos solares reduzem substancialmente com a redução do fator solar, conforme expectável. Para além disso, os ganhos pelos vãos envidraçados e as perdas e ganhos pela envolvente opaca também diminuem. Ora, havendo uma temperatura mais baixa no interior causada pela escassa radiação solar que passa pelo vidro, existem menos trocas com o exterior pelo facto de ambas as temperaturas estarem mais próximas.

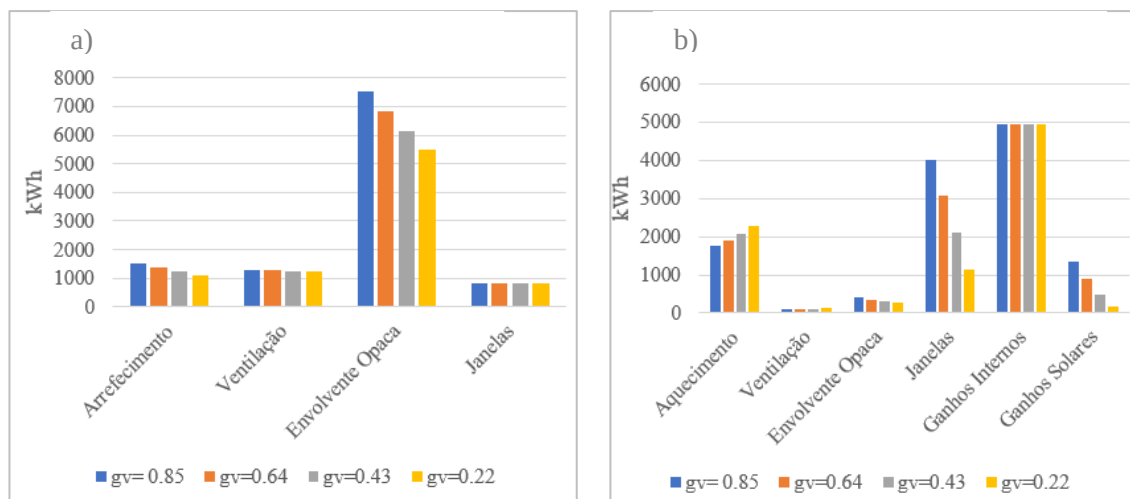


Figura 7.14- a) Perdas de calor com a redução do fator solar; b) Ganhos de calor com a redução do fator solar

A consequência da redução da quantidade de radiação solar que penetra pelas janelas e que entra no interior da habitação, é naturalmente a queda da temperatura interior. Todavia, esta diferença de temperaturas não é tão expressiva comparativamente com as outras alterações já abordadas, como se pode observar na Figura 7.15. Em termos absolutos, a maior diferença de temperatura interior é de 0.9°C, quando se compara um fator solar de 0.85 com 0.22.

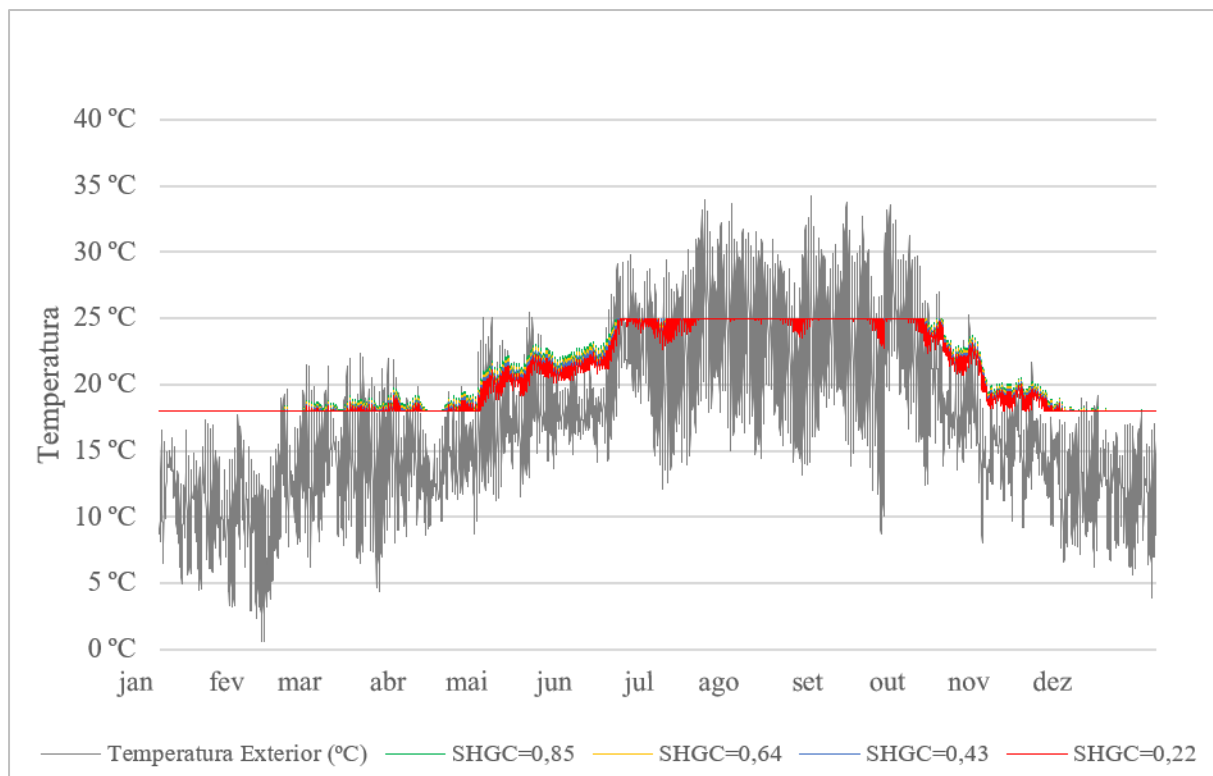


Figura 7.15 - Temperatura interior para diversos fatores solares

7.4.3. Estudo de sensibilidade

Após realizadas todas as 64 simulações e, retirados e trabalhados todos os valores dos outputs, construiu-se um gráfico que permitisse ter uma visão global das necessidades totais de energia de cada simulação, Figura 7.16.

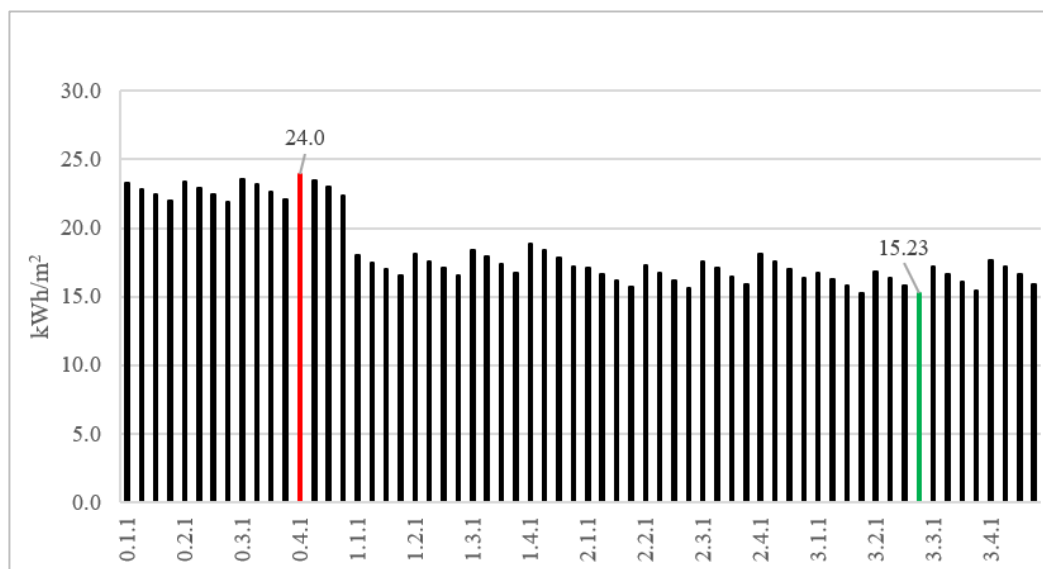


Figura 7.16 - Consumo de energia total das simulações

Entre cada grupo de simulações, por exemplo, entre a simulação 0.1.1 e 0.1.4, manteve-se constante o fator solar (0.85) e o coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca ($U_{ZC}=1.32 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $U_{PTP}=3.73 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$), diminuindo-se o coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado. De seguida, entre as simulações 0.2.1 e a 0.2.4, com o mesmo U da envolvente opaca e, um fator solar de 0.64, voltou-se a reduzir o coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado. A mesma lógica foi seguida até chegar às simulações 3.4.1 a 3.4.4, onde a envolvente opaca tinha valores de $U_{ZC}=0.27 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e $U_{PTP}=0.31 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, um fator solar de 0.22 e, onde se reduziu o U dos vãos envidraçados de $4 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ até $1 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$.

É visível uma clara tendência entre simulações, onde as necessidades diminuem gradualmente com a redução do coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados, para o mesmo fator solar e solução de envolvente opaca.

A análise da Figura 7.16 também permite constatar que, a maior diferença de consumos energéticos ocorre da simulação 0.4.4 para a 1.1.1, ou seja, quando se passa de uma solução construtiva com 0 cm de isolamento térmico para um envolvente opaca com 3 cm de lã mineral.

Foram ainda identificadas as simulações com as maiores e menores necessidades energéticas, sendo estas 24.0 kWh/m^2 e 15.2 kWh/m^2 , respetivamente. No primeiro caso (0.4.1) trata-se de uma simulação

com a envolvente opaca sem isolamento térmico, coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados de $4 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e fator solar de 0.22. A simulação 3.2.4 é definida com uma solução de envolvente opaca com 9 cm de isolamento térmico, um coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados de $1 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ e fator solar de 0.64.

Torna-se interessante dissecar o porquê de serem estas as soluções que provocam o maior e o menor consumo de energia ao longo do ano, Tabela 7.7, sendo esse exercício agora realizado.

Tabela 7.7. Comparativo entre simulação 0.4.1 e 3.2.4

	SIMULAÇÃO	
	0.4.1	3.2.4
$U_{zc} \text{ (W/m}^2\cdot^\circ\text{C)}$	1.32	0.27
$U_w \text{ (W/m}^2\cdot^\circ\text{C)}$	4	1
SHGC	0.22	0.64

No caso da simulação 0.4.1, com 24 kWh/m^2 de energia consumida, a envolvente exterior tem os maiores valores possíveis de coeficiente de transmissão térmica e, por isso, é onde ocorrem maiores trocas de calor com o exterior. Aliado a este fenómeno, é o caso onde os envidraçados possuem o menor fator solar utilizado. Portanto, numa situação onde a radiação solar que penetra no interior da fração é mínima, em conjunto com uma envolvente que permite as maiores trocas de calor, faz com que esta seja a solução que consuma mais energia para aquecer o espaço e, consequentemente a que mais dispêndio tem durante o ano, como se pode confirmar com a análise da Figura 7.17.

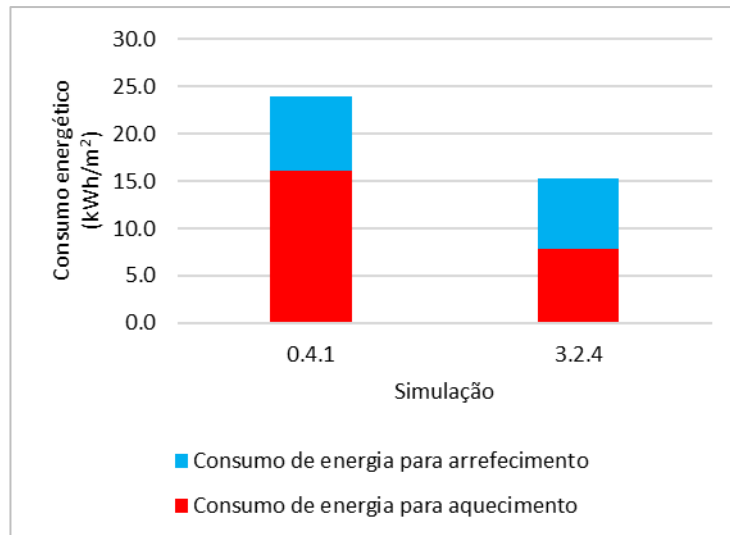


Figura 7.17 - Consumo energético da simulação 0.4.1 e 3.2.4

De facto, e como referido anteriormente, a percentagem de calor ganha pela fração devido à radiação solar que passa pelos vidros é bastante reduzida, rodando cerca de 2% de todos os ganhos. Já a maior parcela de ganhos de calor é derivada da ocupação do edifício, seguida do sistema de aquecimento e da envolvente opaca. Esta é responsável por 3% de todos os ganhos de calor, conforme Figura 7.18.

No que toca às perdas de calor, é através da envolvente opaca que se dá a maior transferência de energia, seguida das perdas por ventilação, por arrefecimento e pelos vãos envidraçados, com os valores de 63%, 14%, 13% e 10% respetivamente.

Relativamente à simulação 3.2.4, apresentada na Figura 7.17, aplica-se o raciocínio inverso. Ou seja, estando perante uma solução de envolvente exterior com os valores mais baixos de coeficiente de transmissão térmica utilizados neste estudo e, com um fator solar elevado faz com que as necessidades energéticas anuais sejam as mais baixas. Porém, e ao contrário da simulação 0.4.1, este não é o caso que necessita de menos energia de aquecimento ou arrefecimento. A presente situação apresenta valores médios e equilibrados tanto no verão como no inverno, não sacrificando uma das estações em detrimento da outra e, é por isso que é o caso que menos energia necessita.

Analisando agora os ganhos e as perdas de calor da simulação 3.2.4, através da Figura 7.18, é notório o aumento dos ganhos solares, devido ao aumento do fator solar. Consequentemente, e aliado à aplicação de isolamento térmico na envolvente opaca, tanto a energia despendida no aquecimento do espaço como os ganhos de calor pela envolvente opaca diminuiram.

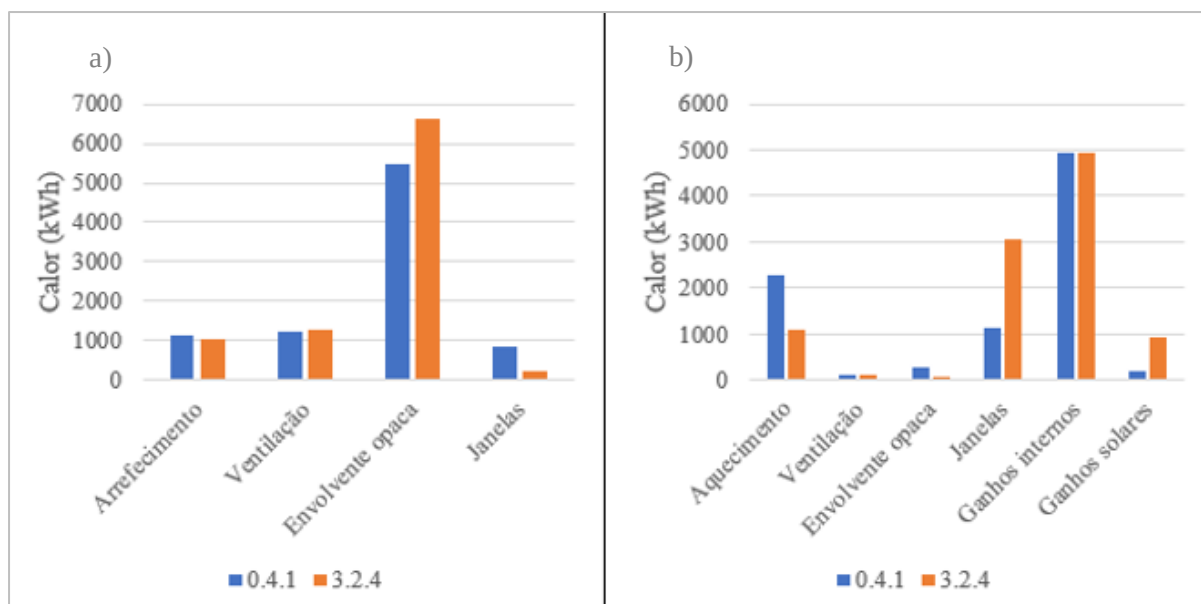
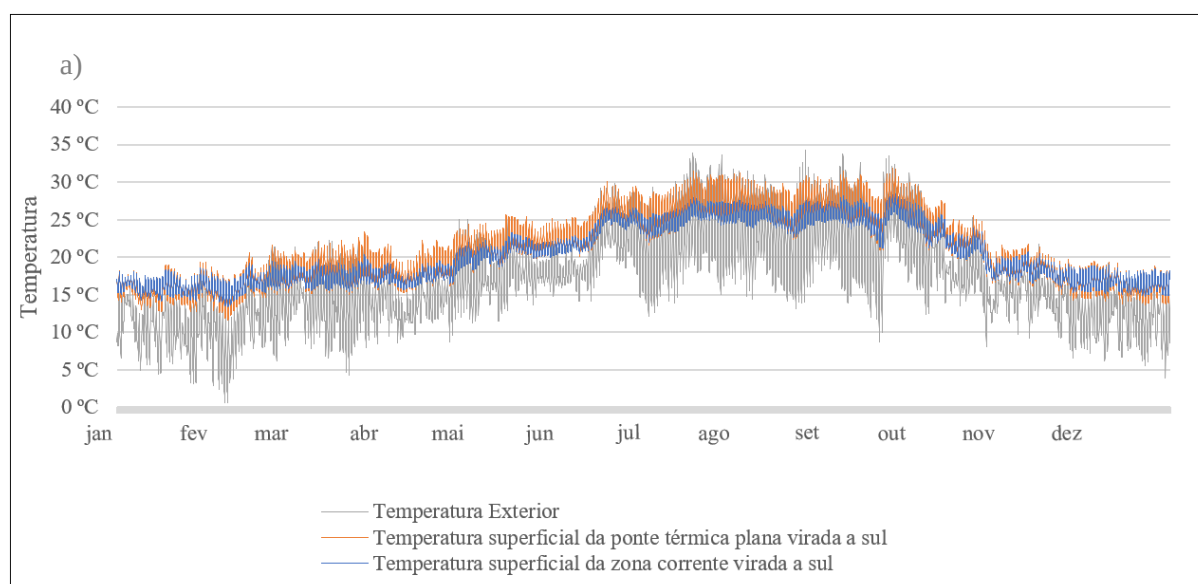


Figura 7.18 – a) Perdas de calor das simulações 0.4.1 e 3.2.4; b) Ganhos de calor das simulações 0.4.1 e 3.2.4

Conforme já comprovado, estas duas simulações têm comportamentos muito diferentes tanto a nível de necessidades energéticas, como na forma como ganham e perdem calor, apesar de estarem nas mesmas condições de clima exterior. Consequentemente estas apresentarão temperaturas superficiais também distintas. A Figura 7.19 mostra a evolução das temperaturas superficiais interiores da zona corrente e, da zona de ponte térmica plana, de uma parede da fachada sul do edifício para ambas as simulações em estudo.



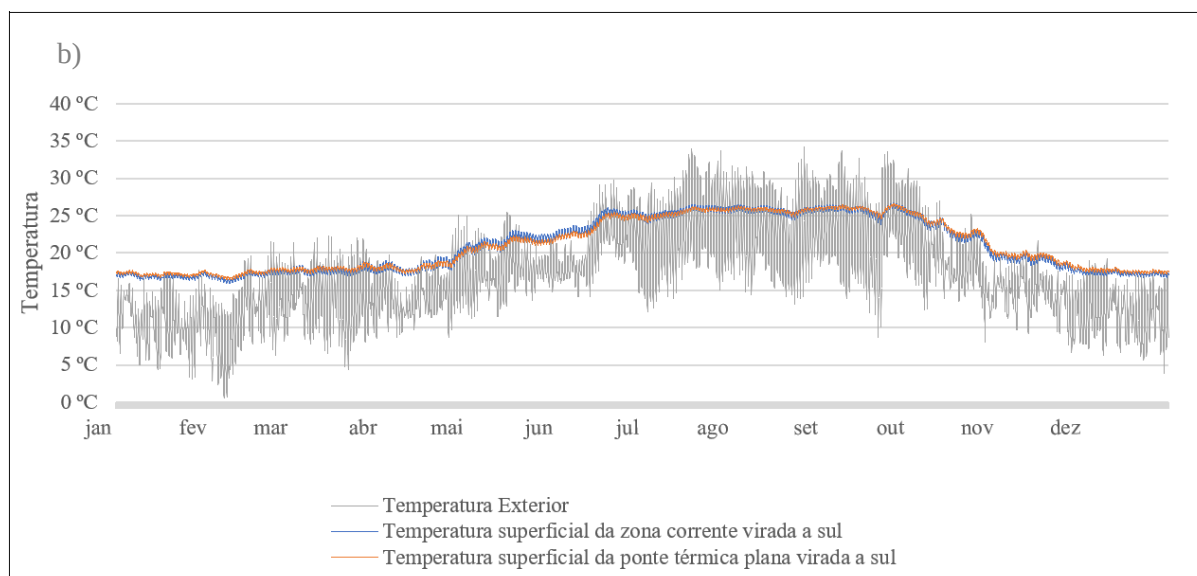


Figura 7.19 – a) Diferença de temperaturas superficiais internas para a simulação 0.4.1; b) Diferença de temperaturas superficiais internas para a simulação 3.2.4

A diferença mais evidente entre ambos os gráficos é a variação de temperaturas ao longo do ano. Ou seja, enquanto na simulação 0.4.1 onde não há isolamento térmico nas paredes as temperaturas superficiais oscilam bastante, na simulação 3.2.4, onde a solução de parede apresenta 9 cm de isolamento, as temperaturas superficiais mostram uma evolução mais controlada e previsível, comprovando os benefícios da redução do coeficiente de transmissão térmica.

Fazendo uma análise mais objetiva a solução sem isolamento térmico tem temperaturas superficiais mínimas mais baixas e temperaturas superficiais máximas mais altas, quando comparada com a solução com 9 cm de isolamento, conforme pode ser visto na Tabela 7.8. O mesmo se aplica às zonas de pontes térmicas, quando comparadas com a zona corrente da mesma envolvente opaca, com diferenças que podem alcançar os 3°C.

Tabela 7.8. Valores máximos e mínimos de temperaturas superficiais para a simulação 0.4.1 e 3.2.4

	Zona corrente virada a sul		Ponte térmica plana virada a sul	
	Tmin (°C)	Tmáx (°C)	Tmin (°C)	Tmáx (°C)
0.4.1	13,4	28,4	11,7	31,9
3.2.4	15,9	26,8	16,4	26,6

Comparando a temperatura superficial da zona de ponte térmica plana, com e sem isolamento, chega-se a ter uma diferença de 5.3°C de temperatura máxima e 4.7°C de temperatura mínima, o que justifica em parte a razão pela qual a implementação de isolamento térmico reduz significativamente o consumo

de energia na habitação.

Com o propósito de analisar o risco de condensações superficiais, determinou-se a temperatura de ponto de orvalho. Esta permite conhecer a temperatura para a qual o ar atinge a saturação [51]. Visto a capacidade de o ar absorver vapor de água não é ilimitada, chama-se de limite de saturação o valor a partir do qual o ar não pode absorver mais humidade e, expressa-se em g/m³. As pressões correspondentes ao limite de saturação são designadas por pressões de saturação $P_{v,sat}$ e podem ser calculadas a partir do valor de temperatura da seguinte forma [51]:

$$P_{v,sat} = 610,5e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}}, t < 0^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$P_{v,sat} = 610,5e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}}, t \geq 0^\circ\text{C} \quad (13)$$

O conceito de temperatura de ponto de orvalho traduz de forma simples a noção de humidade em termos de temperatura [51] e, pode ser calculado numericamente através de valores de temperatura (θ) e humidade relativa (φ) da seguinte forma:

$$\theta_s = \frac{237,3 \cdot (\ln \varphi + \frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta})}{17,269 - (\ln \varphi + \frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta})} \quad (14)$$

A título de exemplo, considere-se o caso da simulação 0.4.1, para quando a superfície interior da ponte térmica atinge a temperatura mínima. As condições de temperatura e humidade do ambiente interior e exterior nesse momento estão apresentadas na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 - Valores de temperatura e humidade relativa interiores e exteriores

Exterior		Interior	
Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)
4,5	62,9	18	20,9

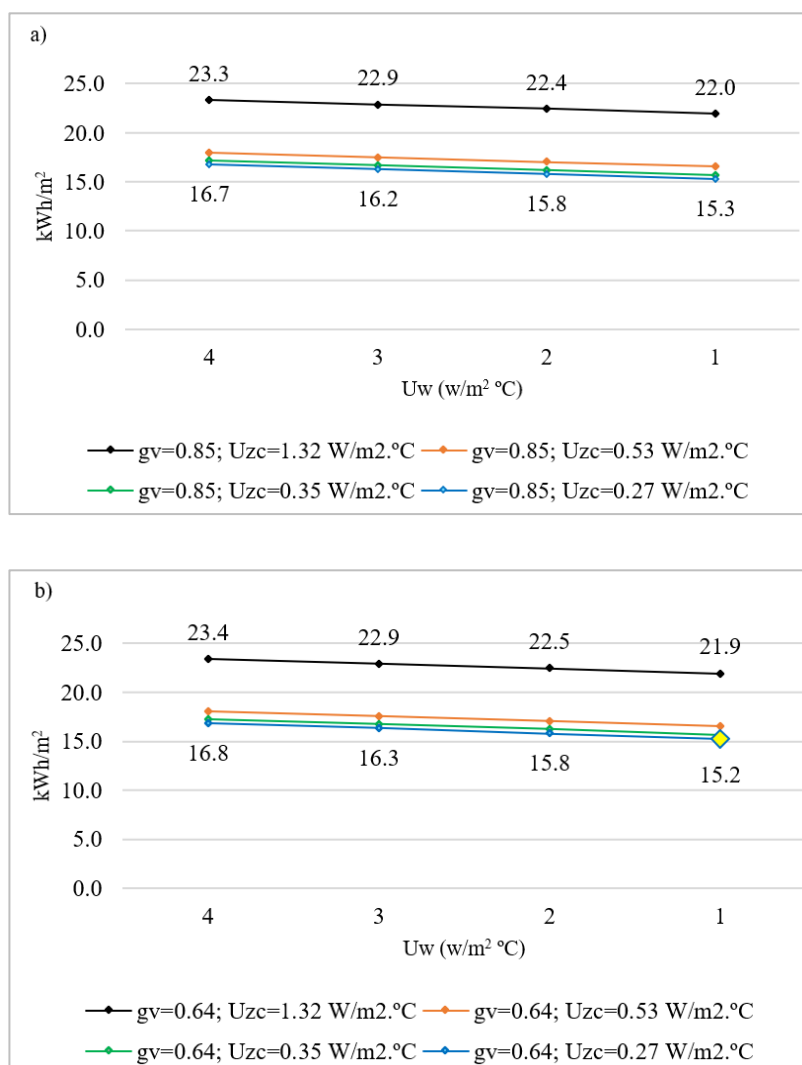
Aplicando a equação (14), conclui-se que a temperatura de ponto de orvalho é aproximadamente -7°C, pelo que não existe risco de condensações superficiais.

Para nenhuma envolvente de zona corrente e de ponte térmica plana destas duas simulações se verificou a situação da temperatura superficial ser inferior à temperatura do ponto de orvalho, pelo que não se

deram condensações superficiais nestas simulações.

7.4.4. Impacto da melhoria do coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca e envidraçada

Visto a alteração do fator solar, de forma isolada, se traduzir num aumento do consumo total de energia construiu-se a Figura 7.20 onde, em cada gráfico, se estabilizou o fator solar. Isto permite analisar o impacto em conjunto da redução do coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca e do vão envidraçado.



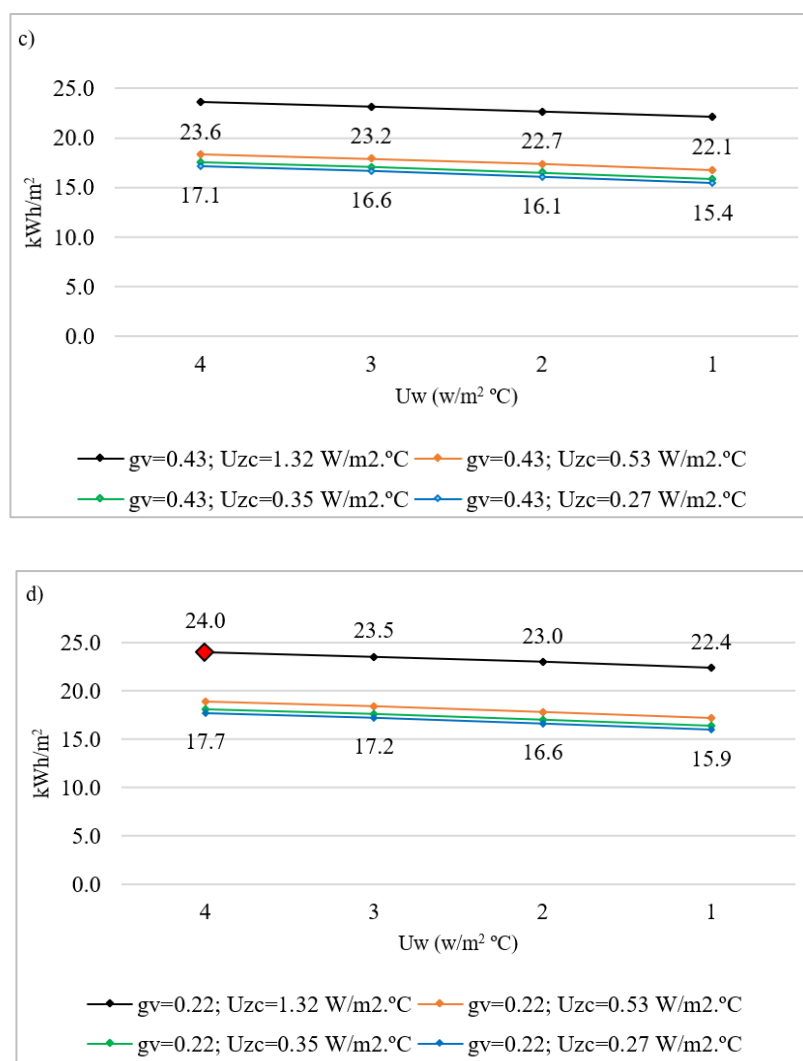


Figura 7.20 – Impacto no consumo de energia total face à redução do coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados e envolvente opaca em simultâneo. a) $g_v=0.85$ e U_{zc} variável; b) $g_v=0.64$ e U_{zc} variável; c) $g_v=0.43$ e U_{zc} variável; d) $g_v=0.22$ e U_{zc} variável;

Conforme já apurado, a redução do valor de U da envolvente opaca reduz as necessidades energéticas de verão, de inverno e, naturalmente ao longo do ano. A redução de U dos envidraçados também reduz as necessidades de aquecimento, mas provoca um ligeiro aumento das necessidades de arrefecimento. Porém, o balanço ao longo do ano continua a ser positivo, havendo uma redução da energia consumida.

Quando estas estratégias de reabilitação passiva são utilizadas em conjunto, torna-se necessária menos energia para climatizar a fração ao longo do ano, conforme visível na Figura 7.21. Apesar de um ligeiro aumento das necessidades de arrefecimento, a redução da energia necessária para aquecer o espaço é grande o suficiente que permite uma poupança energética. Por outras palavras, melhorar a envolvente

exterior do edifício (paredes e janelas), permite aumentar a temperatura no interior da habitação no inverno de tal forma que compensa o ligeiro aumento de temperatura no interior durante a estação de verão.

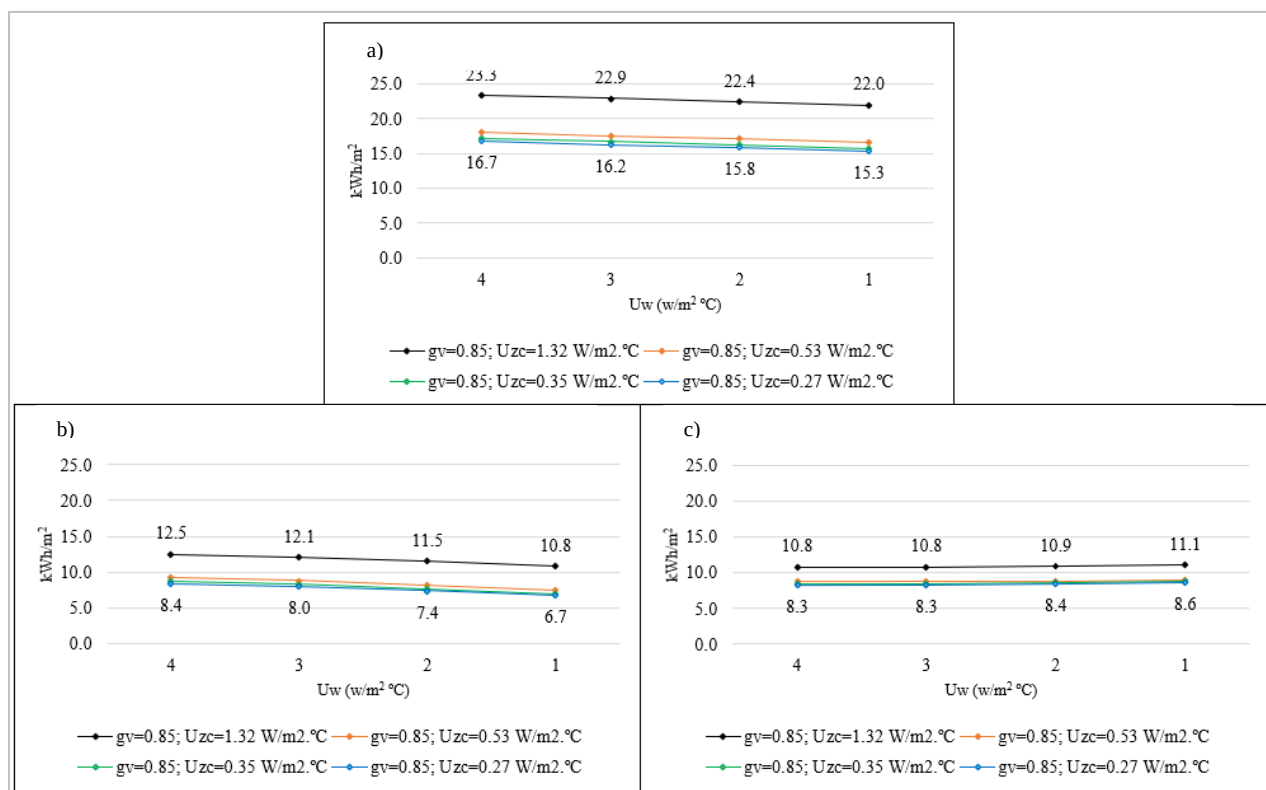


Figura 7.21 - Necessidades energéticas totais (a), de aquecimento (b) e de arrefecimento (c) para a redução do coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados e envolvente opaca

Analisando a Figura 7.20, é visível que o maior impacto em termos de redução de consumo energético é atingido quando se passa de uma solução construtiva sem isolamento térmico ($U_{zc}=1.32 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) para uma solução com três centímetros de lã mineral ($U_{zc}=0.53 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$), em todas as situações. Confirma-se também que a redução do fator solar, para a mesma envolvente exterior do edifício, traz maiores consumos energéticos.

A Figura 7.20d) permite constatar que, no caso onde se tem o menor fator solar, conjugado com os maiores coeficientes de transmissão térmica do envidraçado e envolvente opaca, é onde existem maiores necessidades de energia total. Ou seja, na situação onde se restringe ao máximo a entrada de radiação solar e onde se permitem as maiores trocas de calor através da envolvente exterior faz com que se consuma mais energia ao longo de um ano para manter a temperatura interior entre os 18°C e os 25°C .

Em contrapartida, a combinação do menor coeficiente de transmissão térmica de vãos envidraçados e

envolvente opaca, com um fator solar de 0.64 é o caso em que é necessária menos energia para climatizar a fração (15.23kWh/m^2). Paralelamente, a mesma situação só que com fator solar de 0.85 necessita de 15.27kWh/m^2 de energia para todo o ano, o que corresponde a um aumento do consumo energético de 0.2%. Esta situação releva ser mais benéfica por permitir a entrada de mais 21% de radiação solar e, consequentemente, por criar um ambiente mais saudável por um aumento residual de energia consumida. Assim, entende-se que uma solução ótima terá de ter um fator solar dos envidraçados alto e um coeficiente de transmissão térmica da envolvente exterior baixo.

Na Figura 7.22, é feita uma comparação direta entre as necessidades de energia da solução construtiva inicial e ambas as soluções referidas anteriormente, onde essas necessidades são as mínimas atingidas. Tal como mencionado, a redução do fator solar provoca um aumento das necessidades de aquecimento e uma redução das necessidades de arrefecimento, contudo, as necessidades ao longo do ano praticamente não se alteram.

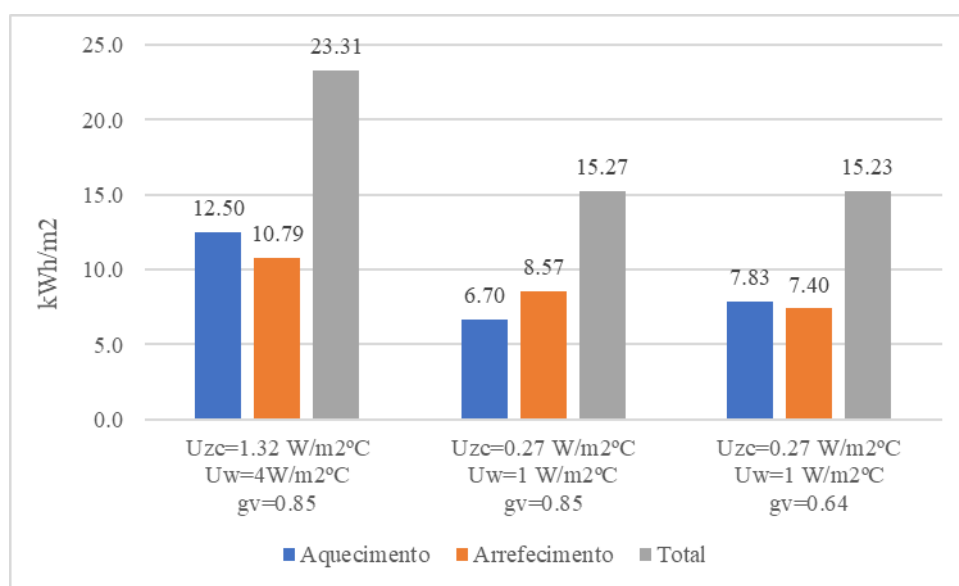


Figura 7.22. Comparação das necessidades energéticas entre a solução construtiva inicial e as soluções mais benéficas

7.4.5. Análise com base nos regulamentos nacionais

A fração autónoma em estudo apresentava, inicialmente, valores de coeficiente de transmissão térmica da envolvente bastante superiores aos estipulados na legislação em vigor [19]. Contudo, as soluções construtivas existentes retratam de forma bastante próxima a realidade do parque edificado português, conforme abordado em 3.2 e 4.4 e, como demonstrado na Figura 7.23.

ELEMENTO	COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA (W/m ² °C)		
	I1	MÉDIA NACIONAL	CASO DE ESTUDO
PAREDES	0,50	1,2	1,3
ENVIDRAÇADOS	2,8	3,6	4,0

Figura 7.23 – Valores de U máximo para a zona de inverno I1, U da média nacional e U da solução construtiva inicial do caso de estudo

Segundo a legislação em vigor as grandes renovações de edifícios devem reger-se pelo Decreto-Lei nº101-D/2020 [19] e respeitar os valores apresentados na Tabela 7.10.

Tabela 7.10 - Valores máximos de U e de fator solar a respeitar segundo a legislação em vigor

Situação de referência	
Umáx (W/m ² °C)	
Elementos verticais de zona corrente em contacto com o exterior	0,50
Elementos verticais de zona de ponte térmica plana em contacto com o exterior	0,90
Elementos da envolvente envidraçada	2,8

	$g_{tot,m\acute{a}x}$
Fator solar dos vãos envidraçados com dispositivos de proteção totalmente ativados	0,15

Das simulações realizadas a que mais se aproxima dos requisitos mínimos legais é aquela que possui 3 cm de lã mineral, com um U de zona corrente de 0.53 W/m²C e U da zona de ponte térmica de 0,70 W/m²C, combinada com um envidraçado de 3 W/m²C. As necessidades energéticas desta simulação estão apresentadas na Figura 7.24. Para comparação, também na Figura 7.24, estão expostos os valores da simulação inicial e da simulação que provou ter as menores necessidades energéticas ao longo do ano.

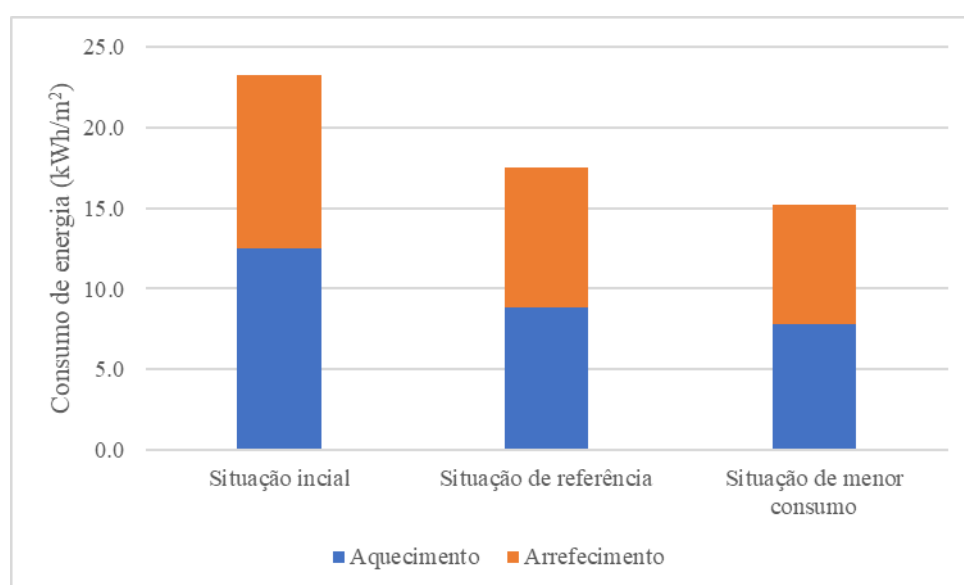


Figura 7.24 - Comparação das necessidades energéticas para a simulação inicial, a simulação que mais se aproxima dos requisitos legais e da simulação com menores necessidades

Analisando a simulação onde são utilizadas as soluções mais próximas dos valores máximos estipulados, ou seja, com coeficiente de transmissão térmica da zona corrente de 0.53 W/m²C, coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados de 3.0 W/m²C e fator solar de 0.85, obteve-se uma redução do consumo total de energia de 25%, face à situação inicial do caso de estudo, comprovando a eficiência que pequenas alterações na envolvente podem contribuir com grandes poupanças energéticas e monetárias.

Quando comparada a situação inicial com a situação de menor consumo, com coeficiente de transmissão térmica da zona corrente de 0.27 W/m²C, coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados de 1 W/m²C e fator solar de 0.64, alcançou-se uma redução de 35% do consumo energético. Conclui-se

assim que, espessuras reduzidas de isolamento térmico são bastante eficazes para a reabilitação energética de edifícios existentes.

Por fim, quando comparadas as simulações com os valores definidos na legislação e a de menores consumos, uma redução de 13% da energia consumida é alcançada. Não obstante, e como já mencionado anteriormente, a melhoria das características da envolvente nem sempre traz benefícios que valham o investimento necessário, pelo facto de se obter resultados igualmente satisfatórios com espessuras mais reduzidas de isolamento e envidraçados menos resistentes termicamente.

8. Conclusões e desenvolvimento futuros

8.1. Conclusão

A população portuguesa, devido aos baixos rendimentos e ao elevado preço da energia apresenta uma cultura de abstenção de uso de equipamentos que permitam regular a temperatura no interior das habitações, razão pela qual Portugal é dos países da União Europeia que menos energia utiliza para este fim. Aliado a este facto, Portugal é também dos países da EU que, em termos percentuais, apresenta mais pessoas a viver em habitações com infiltrações no telhado, humidade em paredes ou apodrecimento em janelas, pelo que a solução para o parque edificado passa por reabilitar, aplicando soluções construtivas que minimizem o consumo de energia associado à climatização dos edifícios.

Com o objetivo de avaliar o impacto que a reabilitação da envolvente exterior dos edifícios teria nas necessidades energéticas, desenvolveu-se a presente dissertação. Para tal, selecionou-se como caso de estudo uma fração autónoma de um edifício multifamiliar sito em Sabóia, Odemira. Este enquadra-se perfeitamente na realidade do parque edificado português pelo facto de ter sido construído antes de 1990 e, por isso, partilhar das mesmas patologias e soluções construtivas de cerca de 70% dos edifícios em Portugal, apresentando uma fraca envolvente térmica.

Deste modo, para desenvolver o estudo pretendido, o edifício foi modelado utilizando o sistema de coordenadas do Energyplus.

Através de uma campanha de monitorização, realizada previamente à elaboração deste trabalho, foi possível validar e calibrar o modelo com a realidade. Essa campanha incidiu sobre a recolha de valores de temperatura e humidade relativa.

Para a execução do estudo de sensibilidade foram realizadas simulações energéticas nominais, com base no manual SCE, onde foi estudado o impacto que a envolvente exterior tinha nos consumos energéticos da habitação. Um total de 64 casos foram avaliados, onde se consideraram 4 soluções construtivas de zona corrente com 0, 3, 6 e 9 cm de lã mineral, em conjunto com 16 soluções de vãos envidraçados, onde se alterou o seu coeficiente de transmissão térmica e o fator solar. Devido a condicionantes impostas pela propriedade horizontal, foi considerado que o isolamento térmico seria colocado pelo lado interior da fachada.

Valores de necessidades energéticas de verão, inverno e totais foram estimados, assim como temperaturas interiores e superficiais. Foram ainda calculados os ganhos e as perdas de calor para cada simulação.

Da análise realizada, conclui-se que é pela fachada que se dão as maiores perdas de calor e, pelos vãos envidraçados que se dão os maiores ganhos. O estudo de sensibilidade também permitiu aferir que é pela aplicação de isolamento térmico nas paredes que se consegue diminuir mais as necessidades energéticas ao longo do ano, quando comparando com a diminuição de U dos envidraçados ou o fator solar, isoladamente. O edifício existente não possui qualquer isolamento térmico pelo que é quando se aplica uma camada de 3 cm de lã mineral que ocorre o maior benefício. Os sucessivos incrementos de espessura de isolamento até 9 cm continuam a trazer vantagens, mas menos expressivas. Em termos de energia total, atingiu-se uma redução máxima da ordem dos 30% de energia consumida. É ainda expectável que, com espessuras superiores a 9 cm, aconteça um efeito inverso e as necessidades energéticas totais sofram um aumento, devido ao sobreaquecimento interior.

É ainda de salientar que, a redução do coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca traz benefícios tanto para a estação de aquecimento como para a de arrefecimento.

A aplicação de isolamento térmico também permitiu obter melhores resultados de temperaturas superficiais da envolvente opaca, ou seja, a aplicação de isolamento faz com que a temperatura mínima superficial interior seja mais alta e, a temperatura máxima seja mais baixa. Melhorias na ordem dos 20% e 6% foram obtidas, respetivamente.

Relativamente aos vãos envidraçados e, contrariamente à envolvente opaca, a redução do coeficiente de transmissão térmica só traz benefícios na estação de aquecimento. Ainda assim, o consumo de energia total ao longo do ano sofreu um decréscimo de cerca de 10%.

A redução de U dos envidraçados faz com que haja menos trocas de calor através destes elementos, mas, em contrapartida, as perdas de calor pela envolvente opaca tendem a aumentar.

À semelhança da envolvente opaca, as temperaturas superficiais dos envidraçados também sofrem melhorias consideráveis, aumentando a temperatura mínima e diminuindo a temperatura máxima.

Das três medidas abordadas neste trabalho, a alteração do fator solar foi a única que aumentou as necessidades energéticas totais, quando analisado isoladamente. A redução do fator solar fez com que entrasse menos radiação solar no interior do espaço e, conseqüentemente, provocou um aumento do consumo de energia na estação de aquecimento. Este aumento, na ordem dos 30%, levou à simulação onde há maior consumo de energia total, 24kWh/m². A redução do fator solar fez também com que se diminuísse as perdas de calor pela envolvente opaca. Por outro lado, é a ação que provoca menores necessidades de arrefecimento.

Por forma a atingir a solução construtiva que obtivesse as menores necessidades energéticas totais, foi necessário combinar os três fatores numa só simulação, provando que a envolvente exterior tem de ser vista como um todo. A solução que trouxe o menor consumo de energia total (15.2 kWh/m²) ao longo de um ano, foi a que contemplava 9 cm de isolamento térmico, um coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados de 1 W/m²°C e, um fator solar de 0.64. Ou seja, a situação onde ocorrem as menores trocas de calor com o exterior através das paredes e janelas e, onde 64% da radiação solar incidente passa pelos vidros.

Dentro dos cenários considerados, e na perspetiva de otimizar a redução do consumo energético, qualquer situação onde se aplique isolamento térmico torna-se bastante benéfica, sendo necessária apenas uma espessura de sensivelmente 3 cm de lã mineral para cumprir a legislação e reduzir o consumo de energia total em cerca de 20%, pelo que não são necessárias grandes espessuras de isolamento térmico para obter bons resultados. Relativamente aos vãos envidraçados, um U_w de 2 W/m²°C é suficiente para reduzir o consumo energético em cerca de 5%.

Por fim, ressalva-se que os resultados e conclusões obtidas nesta dissertação são aplicáveis ao clima estudado e às especificidades do caso de estudo, pelo que não devem ser extrapolados para outras realidades. As intervenções de reabilitação térmica devem ser alvo deste tipo de estudo paramétrico para se encontrar a solução mais adequada a cada caso.

8.2. Desenvolvimento futuros

O trabalho realizado ao longo desta dissertação não permitiu esclarecer vários aspetos e abriu azo a outras investigações que podem ser realizadas com o intuito de complementar este estudo. Por essa razão apresentam-se, de seguida, sugestões de trabalhos que poderiam ser desenvolvidos futuramente:

- Explorar outros programas ou plug-ins que permitam desenvolver o modelo de uma forma tri-dimensional, à semelhança do trabalho que foi desenvolvido no SketchUp e no OpenStudio, de forma a conseguir exportar o modelo sem erros para o EnergyPlus;
- Realizar, com base no perfil de utilização real desenvolvido, um estudo que permita analisar a forma como a ocupação do edifício influencia os ganhos internos e as trocas de calor através da envolvente;
- Reformular o modelo desenvolvido e determinar as necessidades energéticas da fração a partir de uma simulação dinâmica multizona, para posterior comparação com as necessidades energéticas obtidas nesta dissertação;
- Desenvolver outras campanhas de monitorização e respetivos estudos, semelhantes ao realizado na presente dissertação, para as outras frações autónomas como a do último piso, que está em contacto com a cobertura fortemente ventilada, ou a fração do piso semienterrado;
- Realizar uma análise crítica ao método de cálculo previsto na legislação, elencando o quão desfasado está das condições reais de funcionamento dos edifícios, determinados através da simulação dinâmica;
- Desenvolver uma análise técnico-financeira que permita determinar, com base nos resultados obtidos, qual a intervenção de reabilitação que trará o maior benefício em termos energéticos tendo em conta o investimento inicial;

Referências bibliográficas

- [1] Ministério das obras públicas, transportes e comunicações. Diário da República, Decreto-Lei n.º 40/90 | DR. Acedido: 15 de novembro de 2023. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/40-1990-334611>.
- [2] Endesa, Consumo responsável: benefícios para o meio ambiente. Acedido: 21 de novembro de 2021. Disponível em: <https://www.endesa.pt/particulares/news-endesa/sustentabilidade/consumo-responsavel-beneficios-meio-ambiente>.
- [3] APA, Acordo de Paris, Agência Portuguesa do Ambiente, Acedido: 19 de novembro de 2021. Disponível em: <https://apambiente.pt/clima/acordo-de-paris>.
- [4] U. N. Climate Change, «Nationally Determined Contributions (NDCs) | UNFCCC». Acedido: 15 de novembro de 2023. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs>.
- [5] U. N. Environment, COP26 ends with agreement but falls short on climate action. Acedido: 19 de novembro de 2021. Disponível em: <http://www.unep.org/news-and-stories/story/cop26-ends-agreement-falls-short-climate-action>.
- [6] U. N. Environment, 2021 Global Status Report for Buildings and Construction. Acedido: 18 de novembro de 2021. Disponível em: <http://www.unep.org/resources/report/2021-global-status-report-buildings-and-construction>.
- [7] Eurostat, Energy statistics - an overview, Acedido: 23 de novembro de 2021. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview.
- [8] Our World in Data, Global primary energy consumption by source. Acedido: 15 de novembro de 2023. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/global-energy-substitution>.
- [9] Eurostat, Population unable to keep home adequately warm by poverty status. Acedido: 25 de janeiro de 2022. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_07_60/default/table?lang=en.
- [10] Direção Geral de Energia e Geologia, Balanços Energéticos Nacionais. Acedido: 15 de novembro de 2023. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/balancos-energeticos/balancos-energeticos-nacionais/>
- [11] Eurostat, Energy consumption in households. Acedido: 18 de novembro de 2021. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households.
- [12] Climate Change Knowledge Portal, World Bank Climate Change Knowledge Portal. Acedido: 26 de novembro de 2021. Disponível em: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>
- [13] Ministério do equipamento, do planeamento e da administração do território, Diário da República, Decreto-Lei n.º 118/98, Lisboa.

- [14]Ministério das obras públicas, transportes e comunicações. Diário da República, Decreto-Lei n.º 79/2006 , Lisboa.
- [15]Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro de 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios, vol. 001, Lisboa.
- [16]Ministério da economia e da inovação. Diário da República, Decreto-Lei n.º 78/2006, Lisboa.
- [17]Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Diário da República, Decreto-Lei n.º 80/2006, Lisboa.
- [18]Ministério da Economia e do Emprego. Diário da República, Decreto-Lei n.º 118/2013, Lisboa.
- [19]Ambiente e Ação Climática e Infraestruturas e Habitação. Diário da República, Portaria n.º 138-I/2021, Lisboa.
- [20]A. Horta, J. P. Gouveia, L. Schmidt, J. C. Sousa, P. Palma, e S. Simões, Energy poverty in Portugal: Combining vulnerability mapping with household interviews, Energy Build., vol. 203, p. 109423, nov. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109423.
- [21]R. M. do Carmo, J. Sebastião, J. Azevedo, S. da C. Martins, e A. F. da Costa, Eds., Desigualdades sociais: Portugal e a Europa, Primeira edição em Coleção Desigualdades. Lisboa: Editora Mundos Sociais, 2018.
- [22]M. Pinheiro Duarte, Ambiente e Construção Sustentável». Instituto do Ambiente, 2006.
- [23]I. Nacional de Estatística, Retrato Territorial de Portugal, 2019.
- [24]I. Nacional de Estatística, Censos 2021 – Resultados Provisórios, 2011.
- [25]I. Nacional de Estatística, Censos 2011 - Resultados Definitivos, 2011.
- [26]I. Nacional de Estatística, Censos 2021 - Resultados Definitivos, 2021.
- [27]J. P. Gouveia e P. Palma, Harvesting big data from residential building energy performance certificates: retrofitting and climate change mitigation insights at a regional scale, Environ. Res. Lett., vol. 14, n.º 9, p. 095007, set. 2019, doi: 10.1088/1748-9326/ab3781.
- [28]A. Agência para a energia, 10 Soluções para eficiência energética. Soluções para paredes, Lisboa, 2016.
- [29]A. Agência para a energia, 10 Soluções para eficiência energética. Soluções para coberturas, Lisboa, 2016.
- [30]A. Agência para a energia, 10 Soluções para eficiência energética. Soluções para janelas, Lisboa, 2016.
- [31]A. Agência para a energia e D. Direção Geral de Energia e Geologia, Direção de Serviços de Planeamento Energético e Estatística, Energia em números - Edição 2021, Lisboa.
- [32]Presidência do Conselho de Ministros. D. da República, Decreto-Lei n.º 101-D/2020, Lisboa.
- [33] Koh, L., Marchand, R., Genovese, A., & Brennan, A., Fuel Poverty Perspectives from the Front Line, Energy Policy Review, Publisher XYZ, pp. 28., 2020, doi: 10.1234/5678.
- [34]J. F. S. Antunes, Pobreza Energética: Avaliação das Características do Parque Residencial e de

- Outros Indicadores Relativos ao Aquecimento de Habitações, Dissertação em Engenharia Civil, Faculdade de ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2020.
- [36] S. Bouzarovski e S. Petrova, A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary, *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 10, pp. 31–40, nov. 2015, doi: 10.1016/j.erss.2015.06.007.
- [37] Directorate-General for Energy, Energy poverty and vulnerable consumers in the energy sector across the EU, 2015.
- [38] EDP, Composição dos preços da eletricidade, EDP Comercial. Acedido: 29 de outubro de 2023. Disponível em: <https://www.edp.pt/composicao-precos-eletricidade/>.
- [39] INE, Remuneração bruta mensal média por trabalhador, Lisboa, 2021.
- [40] Eurostat, Database - Purchasing power parities - Eurostat, Acedido: 29 de outubro de 2023. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/purchasing-power-parities/database>.
- [41] European Commission, Energy Poverty Advisory Hub (EPAH), Acedido: 29 de outubro de 2023. Disponível em: https://energy-poverty.ec.europa.eu/index_en.
- [42] J. Ferrão e A. Delicado, *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*, publicação do Instituto de Ciências Sociais da Universidade de Lisboa p. 69, Lisboa, 2019.
- [43] Comissão Europeia, Comissão intensifica esforços para combater pobreza energética e reforçar proteção dos consumidores, 2023, Acedido: 29 de outubro de 2023. Disponível em: https://portugal.representation.ec.europa.eu/news/comissao-intensifica-esforcos-para-combater-pobreza-energetica-e-reforcar-protecao-dos-consumidores-2023-10-23_pt.
- [44] P. I. S.A, «Dicionário Priberam da Língua Portuguesa», Dicionário Priberam da Língua Portuguesa.
- [45] Instituto Nacional de Estatística, 2022, «Estatísticas da Construção e Habitação - 2022», Instituto Nacional de Estatística, I.P.
- [46] Assembleia da República, Diário da República, 1.ª série — N.º 206 — 23 de Outubro de 2009, Lisboa.
- [47] Assembleia da República, Diário da República, 1.ª série — N.º 69 — 8 de abril de 2014, Lisboa .
- [48] Presidência do Conselho de Ministros, D. da República, Decreto-Lei n.º 95/2019, Lisboa.
- [49] Instituto Nacional de Estatística, Censos Habitação 2021. Acedido: 28 de outubro de 2023. Disponível em: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=66323830&PUBLICACOESmodo=2.
- [50] N. N, 74th Euroconstruct Conference: European Construction Market Outlook Until 2015, 2012.
- [51] F. Henriques, *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*, Lisboa, 2011.
- [53] ISO. Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. ISO 7730. International Organization for Standardization, Geneva, 2005.
- [54] ASHRAE, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55. American Society of Heating, Ventilation and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2013.

- [55]I. Dias de Abreu, Correção de Pontes Térmicas em Intervenções de Reabilitação, Dissertação de mestrado, Faculdade de engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2003.
- [56]M. S. Guerreiro, Síndrome dos Edifícios Doentes. Estudo da qualidade do ar interior e despiste da eventual existência de SED entre a população do edifício “E” de um estabelecimento de ensino superior, Dissertação de mestrado, Instituto Politécnico de Lisboa, Lisboa, 2012.
- [57]P. Isolani, Manual do consumidor, Eficiência energética nos edifícios residenciais, DECO, Lisboa, 2008.
- [58]P. Nunes, Comportamento térmico de diferentes soluções de envolvente opaca vertical em edifícios, Dissertação de mestrado, Instituto superior técnico, Lisboa, 2014.
- [59]ADENE - AGÊNCIA PARA A ENERGIA, 10 Soluções de Eficiência Energética, Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, 2010.
- [60]A. Agência para a energia, Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios, TKS - Innovation Agency, 2021
- [61]IPQ, NP 1037 1, Ventilação produtos combustão aparelhos gás Ventilação natural, Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural, 2002.
- [62]H. F. E. Silva, Indoor climate management on cultural heritage buildings: Climate control strategies, cultural heritage management and hygrothermal rehabilitation, Tese de Doutoramento, Faculdade de ciências e tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2019.
- [63]CEN. Conservation of Cultural Property – Procedures and instruments for measuring temperatures of the air and the surface of objects. EN Standard 15758. European Committee for Standardisation, Brussels, 2010.
- [64]CEN. Conservation of Cultural Heritage – Procedures and instruments for measuring humidity in the air and moisture exchanges between air and cultural property. EN Standard 16242. European Committee for Standardisation, Brussels, 2012.
- [65]] EN. Conservation of cultural heritage – procedures and instruments for measuring humidity in the air and moisture exchanges between air and cultural property. European Committee for Standardisation (CEN), 2012, EN16242.
- [66] D. Camuffo, Microclimate for Cultural Heritage: Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments, 2nd edition, Elsevier, New York, 2013.
- [67]CEN, Conservation of Cultural Property – Specifications for Temperature and Relative Humidity to Limit Climate-Induced Mechanical Damage in Organic Hygroscopic Materials, EN Standard 15757. European Committee for Standardization, Brussels, 2010.
- [68]N. S. M. Morais, Avaliação e melhoria do desempenho térmico na reabilitação de uma habitação familiar, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2017.
- [69]A. D. F. Antunes, Avaliação da influência dos vãos envidraçados no desempenho termo-energético dos edifícios em reabilitações, Dissertação de mestrado, Universidade do Minho, Minho, 2018.
- [70]K. S. A. Gomes, Validação da modelação de um edifício de habitação com o programa EnergyPlus por comparação com medições “In Situ”, Dissertação de mestrado, Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [71]CIBSE, Environmental design. CIBSE Guide A, Chartered Institution of Building Services

- Engineers, London, 2006.
- [72]ISO. Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria. ISO 7730, International Organization for Standardization, Geneva, 2005.
- [73]U.S. Department of Energy, EnergyPlus Version 9.6.0 Documentation. Engineering Reference, 23 Setembro 2021.
- [74]ASHRAE, ASHRAE POCKET GUIDE for Air Conditioning, Heating, Ventilation, Refrigeration SI 9th Edition, Atlanta, 2017.
- [75]H. E. Huerto-Cardenas et al., Validation of dynamic hygrothermal simulation models for historical buildings: State of the art, research challenges and recommendations, *Build. Environ.*, vol. 180, p. 107081, jul. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107081.
- [76]M. Posani, R. Veiga, e V. Freitas, Post-Insulating Traditional Massive Walls in Southern Europe: A moderate thermal resistance can be more effective than you think, 2023, doi: 10.2139/ssrn.4453122.
- [77]Oberkampf, W., & Roy, C., *Verification and Validation in Scientific Computing*. Cambridge University Press, 2010, doi: 10.1017/CBO9780511760396.
- [78]ASHRAE Guideline 14:2002. Measurement of Energy and Demand Savings. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2002.
- [79]R. Caro e J. Sendra, Evaluation of indoor environment and energy performance of dwellings in heritage buildings. The case of hot summers in historic cities in Mediterranean Europe, *Sustain. Cities Soc.*, vol. 52, 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101798.
- [80]R. Perneti, A. Prada, e P. Baggio, On the influence of several parameters in energy model calibration: the case of a historical building, 2013.
- [81]V. Castaldo, A. L. Pisello, G. Pignatta, e F. Cotana, Integrated numerical-experimental methodology for thermal-energy analysis and optimization of heritage museum buildings, *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, vol. 37, 2015, doi: 10.1177/0143624415609910.
- [82]A. C. da S. Cortez, Estratégias construtivas pasivas para a conceção de edifícios residenciais não dependentes de sistemas ativos de arrefecimento, Dissertação de mestrado, Minho, Universidade do Minho, 2016.
- [83]S. M. E. Rodrigues, Análise de metodologias para determinação da classe energética de edifícios de habitação no âmbito do Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE), Dissertação de mestrado, Lisboa, Universidade de Lisboa, 2020.
- [84]J. H. M. Pessoa, Análise da influência das pontes térmicas nos edifícios residenciais, Dissertação de mestrado, Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2011.
- [85]R. F. Raposo, Validação de modelos de cálculo por comparação com medições “In Situ” - Propriedades dos materiais, Dissertação de mestrado, Porto, Universidade do Porto, 2010.
- [86]R. Kramer, J. van Schijndel, e H. Schellen, Dynamic setpoint calculation including collection and comfort requirements: Energy impact for museums in Southern Europe, *Energy Procedia*, vol. 133, pp. 195–206, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.384.
- [87] C. Ferreira, Inércia higroscópica em museus instalados em edifícios antigos, Tese de

Doutoramento, Porto, Faculdade Engenharia da Universidade do Porto, 2015.

- [88] S. A. Magalhães e V. Freitas, A complementary approach for energy efficiency and comfort evaluation of renovated dwellings in Southern Europe, 1th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway, Energy Procedia, vol. 132, pp. 909–914, out. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.717.
- [89] V. Rajčić, A. Skender, e D. Damjanović, An innovative methodology of assessing the climate change impact on cultural heritage. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(1), 21–35, 2018, <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1354094>].
- [90] J. Ferreira, Análise de Sensibilidade de Factores de Desempenho Térmico de Edifícios, Dissertação, Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2012
- [91] U. N. Environment, 2021 Global Status Report for Buildings and Construction, UNEP - UN Environment Programme. Acedido: 15 de novembro de 2023. Disponível em: <http://www.unep.org/resources/report/2021-global-status-report-buildings-and-construction>



2023

CRISTIANO SANTOS

SIMULAÇÃO DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO
TÉRMICA EM CLIMA TEMPERADO