



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Raquel Monteiro Ferreira Jorge

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UMA
FRAÇÃO RESIDENCIAL, EM REGIME SAZONAL E
DINÂMICO**

**Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de
Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor
Doutor Nuno Albino Vieira Simões e apresentada ao Departamento de
Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de
Coimbra.**

setembro de 2022

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

Raquel Monteiro Ferreira Jorge

Avaliação do desempenho energético de uma fração residencial, em regime sazonal e dinâmico

**Evaluation of the energy performance of a residential fraction under seasonal
and dynamic conditions**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente,
orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e pela Doutora Catarina Lopes Serra

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

setembro de 2022



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões pelo apoio, paciência e dedicação na execução e correção deste trabalho. Ao Luís Abreu pela simpatia e disponibilidade.

Aos meus pais por me darem a oportunidade de estudar na Universidade de Coimbra. Por me motivarem e nunca me deixarem desistir. Obrigada pela paciência e compreensão.

À minha família por me ensinar a rir nos momentos mais difíceis e pelo apoio incondicional.

A todos os integrantes da “carrossa de ambiente”. Amigos que levo comigo para a vida e que tornaram esta jornada ainda mais especial. Guardo, com saudade, as nossas conversas, brincadeiras e peripécias!

Aos restantes amigos que Coimbra me deu. Agradeço por terem feito parte desta caminhada, cheia de altos e baixos, e de momentos que deixam saudade!

E por fim, ao Bruno pelo apoio constante e paciência.

O presente trabalho teve o suporte do Programa EU LIFE, através do projeto com a referência LIFE17 ENV/ES/000329, “Recycled and natural materials and products to develop Nearly Zero Energy Buildings with low carbon footprint”.

RESUMO

Com o objetivo de melhorar o desempenho energético do parque edificado e reduzir a emissão dos gases efeito de estufa, os requisitos legais têm aumentado o seu nível de exigência. Em 2017, a norma ISO 52016-1:2017 introduziu uma nova metodologia para avaliar o desempenho energético dos edifícios, substituindo o método simplificado utilizado na norma ISO 13790:2008. Em Portugal, para avaliar o desempenho energético de edifícios residenciais, é utilizado uma metodologia de cálculo sazonal. Contudo, conforme se aumenta o grau de sofisticação das políticas europeias, é esperada uma mudança no método de cálculo, que deve evoluir para cálculo mensal ou para simulação dinâmica horária, restringindo assim a possibilidade do método sazonal.

Neste contexto, na presente dissertação, um dos objetivos principais é avaliar o impacto da alteração de metodologia de cálculo na avaliação do desempenho energético de edifícios residenciais. Para esse efeito, optou-se por se estudar o desempenho energético de uma fração real, destinada à habitação, pertencente a um edifício multifamiliar, aplicando a legislação atualmente em vigor em Portugal, através do método sazonal, e em regime dinâmico, através do acoplamento dos softwares SketchUp e EnergyPlus. Para avaliar o desempenho da fração nos dois regimes, foram estudados diferentes cenários, onde se alteraram a espessura e posição de isolamento térmico, na envolvente opaca exterior. Para avaliar a concordância entre métodos, e a precisão das políticas atualmente em vigor, foram comparadas as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento, obtidas através das diferentes metodologias de cálculo, nos diferentes cenários estudados.

Palavras-chave: EnergyPlus; Desempenho Energético; Regime Sazonal; Regime Dinâmico

ABSTRACT

With target of improve the energy performance on buildings and reduce the emissions of greenhouse gases, legal requirements have increased their level of demand. In 2017, ISO 52016-1:2017 introduced a new methodology to evaluate the energy performance in buildings, replacing the simplified method used on ISO13790:2008. In Portugal, to assess the energy performance of residential buildings, a seasonal calculation methodology is used. However, as the degree of sophistication of European policies increases, a change in the calculation method is expected, which must evolve to monthly calculation or to hourly dynamic simulation, thus restricting the possibility of the seasonal method.

In this context, in this dissertation, one of the main objectives is to evaluate the impact of changing the calculation methodology in the evaluation of the energy performance of residential buildings. For this purpose, it was decided to study the energy performance of a real fraction, for housing, belonging to a multifamily building, applying the legislation currently in force in Portugal, through the seasonal method, and in a dynamic regime, through the coupling of SketchUp and EnergyPlus software. To evaluate the performance of the fraction in the two regimes, different scenarios were studied, where the thickness and position of thermal insulation were changed, in the outer opaque envelope. To assess the agreement between methods, and the accuracy of the policies currently in force, the energy needs for heating and cooling, obtained through the different calculation methodologies, in the different scenarios studied were compared

Keywords: EnergyPlus; Energy Performance; Seasonal Regime; Dynamic Regime

ÍNDICE

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Índice.....	iv
Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tabelas.....	x
Abreviaturas.....	xi
Simbologia.....	xii
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Motivação.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Estrutura da Dissertação.....	4
2 Estado da arte.....	6
2.1 Normalização.....	6
2.2 Ferramentas para o cálculo dinâmico.....	10
2.2.1 SketchUp.....	10
2.2.2 EnergyPlus.....	11
3 Caso de Estudo.....	13
3.1 Método de cálculo em regime sazonal de edifícios.....	16
3.1.1 Parâmetros da classe energética e do balanço energético.....	19
3.2 Métodos de cálculo em regime dinâmico de edifícios.....	21
3.2.1 Construção do modelo da fração em estudo.....	21
3.3 Cenários estudados.....	25
4 Apresentação e Discussão de Resultados.....	29
4.1 Avaliação do desempenho energético da fração através da metodologia sazonal.....	29
4.2 Avaliação do desempenho energético da fração através de uma Metodologia Dinâmica Horária.....	33

4.2.1	<i>Necessidades totais de aquecimento e arrefecimento ($kWh\ m^{-2}$)</i>	35
4.2.2	<i>Temperatura superficial interior ($^{\circ}C$)</i>	46
4.2.2.1	Avaliação do impacto da colocação de isolamento.....	50
4.2.2.2	Avaliação da posição de isolamento térmico na EOE.....	52
4.2.3	<i>Transferência convectiva de calor na superfície interior ($W\ m^{-2}\ ^{\circ}C^{-1}$)</i>	53
4.2.3.1	Avaliação do impacto da colocação de isolamento.....	56
4.2.3.2	Avaliação da posição do isolamento térmico na EOE	58
4.2.4	<i>Taxa de perda de calor na superfície interior (W)</i>	60
4.2.4.1	Avaliação do impacto da colocação de isolamento.....	62
4.2.4.2	Avaliação da posição do isolamento térmico na EOE	65
4.3	Comparação entre as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento obtidas na metodologia sazonal e dinâmica.....	66
5	Considerações finais.....	71
5.1	Conclusões	71
5.2	Trabalhos futuros	72
6	Referências Bibliográficas	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Representação esquemática dos módulos de cálculo integrados no software EnergyPlus. (Crawley et al., 2001).....	12
Figura 3.1- Fração autónoma estudada, destacando a fachada orientada a SO.	13
Figura 3.2- Modelo elaborado no Software SketchUp representativo da fração em estudo	14
Figura 3.3- Registo de temperaturas para aproximadamente 14 dias numa divisão da fração em estudo.....	15
Figura 3.4-Registo da humidade relativa para aproximadamente 14 dias numa divisão da fração em estudo.....	15
Figura 3.5- Modelo construído no SkecthUp da fração em estudo (fachada SO)	22
Figura 3.6- Modelo construído no SkecthUp da fração em estudo (fachada NE).....	22
Figura 3.7- Diferentes zonas térmicas presentes na fração em estudo. A vermelho, a zona térmica característica do espaço não útil (marquise) e a verde, a zona térmica para os espaços úteis.....	22
Figura 3.8- Condições de fronteira para a fachada SO, cobertura e parede que separa a fração dos espaços de circulação comuns.....	23
Figura 3.9- Condições de fronteira pra a fachada NE, pavimento e parede adjacente á fração vizinha	23
Figura 3.10- Condições de fronteira para as paredes que separam duas zonas térmica térmicas diferentes	23
Figura 3.11- Elemento construtivo representativo do apartamento adjacente para que, durante a simulação, o sombreamento presente na fachada NE seja tido em consideração.	25
Figura 3.12- Representação dos diferentes casos estudados, em função da posição de isolamento térmico, a azul, na envolvente opaca exterior da fração.....	27
Figura 4.1- Necessidades nominais de energia útil para aquecimento na fração, obtidas através da metodologia sazonal, quando se varia espessura e posição do isolamento.....	31
Figura 4.2- Transferência de calor por transmissão através da envolvente na estação de aquecimento, $Q_{tr,i}$ (kWh), quando se varia espessura e localização do isolamento.....	32
Figura 4.3- Coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos da envolvente em contacto com o exterior, H_{ext} ($W\ ^\circ C^{-1}$), quando se varia espessura e localização do isolamento.....	32
Figura 4.4- Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento na fração, obtidas através da metodologia sazonal, quando se varia espessura e posição do isolamento.....	33
Figura 4.5-Necessidades energéticas para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para os diferentes meses do ano	35

Figura 4.6- Necessidades energéticas para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico	36
Figura 4.7- Necessidades energéticas mensais para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, em função das diferentes posições de 2 cm isolamento térmico.....	38
Figura 4.8- Necessidades energéticas mensais para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, em função das diferentes posições de 10 cm isolamento térmico....	38
Figura 4.9- Necessidades energéticas para aquecimento diárias, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para o mês de janeiro, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico na envolvente exterior	39
Figura 4.10- Necessidades energéticas horárias para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para o dia mais frio de janeiro, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico.....	40
Figura 4.11- Necessidades energéticas horárias para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para o dia 7 de janeiro, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico	40
Figura 4.12- Necessidades energéticas para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para o dia mais frio de janeiro, em função das diferentes posições de isolamento térmico	41
Figura 4.13- Necessidades energéticas para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para o dia 7 de janeiro, em função das diferentes posições de isolamento térmico.....	41
Figura 4.14- Necessidades energéticas para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para os diferentes meses do ano	42
Figura 4.15- Necessidades energéticas para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para junho, julho, agosto e setembro, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico.	43
Figura 4.16- Necessidades energéticas mensais para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para junho, julho, agosto e setembro, em função das diferentes posições de 2 cm isolamento térmico	44
Figura 4.17- Necessidades energéticas para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, no mês de julho, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico	45
Figura 4.18- Necessidades energéticas para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, no mês de agosto, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico	45
Figura 4.19- Necessidades energéticas horárias para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, que registou as maiores necessidades para arrefecimento, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico.....	46

Figura 4.20- Necessidades energéticas horárias para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, no dia mais quente do ano, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico	46
Figura 4.21- Temperaturas média diárias das faces internas das paredes e coberturas, ao longo do ano.	47
Figura 4.22- Temperatura média horária no mês de janeiro.....	48
Figura 4.23- Temperatura média horária no mês de março.....	48
Figura 4.24- Temperatura média horária, no mês de agosto	49
Figura 4.25- Temperatura média diária, no mês de outubro.....	49
Figura 4.26- Comparação da temperatura média diária, no mês de janeiro, para uma espessura de isolamento igual a 2cm e 12 cm.....	51
Figura 4.27- Comparação da temperatura média diária, no mês de agosto, para uma espessura de isolamento igual a 2cm e 12 cm.....	51
Figura 4.28- Temperatura média diária registada na parede orientada a SO, no mês de outubro, para as diferentes espessuras de isolamento térmico	51
Figura 4.29- Coeficiente médio diário de transferência de calor convectiva no interior da face das paredes e coberturas, durante para ano.....	53
Figura 4.30- Coeficiente médio horário de transferência de calor convectiva no interior da face das paredes e coberturas, em janeiro	54
Figura 4.31- Coeficiente médio horário de transferência de calor convectiva no interior da face das paredes e coberturas, em março	54
Figura 4.32- Coeficiente médio horário de transferência de calor convectiva no interior da face das paredes e coberturas, em agosto.....	55
Figura 4.33- Coeficiente médio diário de transferência de calor convectiva no interior da face das paredes e coberturas, em outubro.....	56
Figura 4.34- Taxa média horária de perda de calor na superfície interior das paredes exteriores e coberturas, durante o mês de janeiro	61
Figura 4.35- Taxa média horária de perda de calor na superfície interior das paredes exteriores e coberturas, durante o mês de agosto	61
Figura 4.36- Taxa média diária de perda de calor na superfície interior das paredes exteriores e coberturas, durante o mês de outubro.....	62
Figura 4.37- Taxa média diária de perda de calor na superfície interior da parede orientada a NE, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico.....	63
Figura 4.38- Necessidades energéticas para aquecimento, obtidas em regime sazonal e regime dinâmico, em função das diferentes espessuras e posições de isolamento térmico.....	68
Figura 4.39- Necessidades energéticas para arrefecimento, obtidas em regime sazonal e regime dinâmico, em função das diferentes espessuras e posições de isolamento térmico.....	68
Figura 4.40- Necessidades energéticas para aquecimento, obtidas em regime dinâmico, em função das diferentes posições e espessuras de isolamento térmico	69

Figura 4.41- Necessidades energéticas para arrefecimento, obtidas em regime dinâmico, em função das diferentes posições e espessuras de isolamento térmico 69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1- Valores, por defeito e calculados, para o coeficiente de transmissão térmica utilizados para caracterizar as soluções construtivas que separam o ar exterior e ENU.	17
Tabela 3.2- Parâmetros para caracterizar a envolvente envidraçada presente na fração, obtidos através dos valores tabelados presentes no catálogo ITE50 e no Despacho n.º 6476-H/2021(Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021) (Santos & Matias, 2006).....	17
Tabela 3.3- Identificação das pontes térmicas lineares existentes na fração para a análise sazonal e seu respetivo comprimento de desenvolvimento, $B(m)$, e valor do coeficiente de transmissão térmica linear, $\Psi (W m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$ (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021).....	18
Tabela 3.4- -Propriedades e respetiva espessura dos material que constituem as soluções construtivas da fração em estudo (Santos & Matias, 2006)	23
Tabela 3.5- Soluções construtivas dos diferentes elementos de construção que constituem a fração em estudo.....	24
Tabela 3.6-Diferentes valores para o coeficiente de transmissão térmica $U (W m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1})$ em função da espessura do material isolante, em XPS	26
Tabela 3.7-Valores para o coeficiente de transmissão térmica linear $\Psi (W m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$, para a análise em regime sazonal, obtidos a partir de valores tabelados presentes do Despacho n.º 6476-H/2021 (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021)	27
Tabela 4.1- Necessidades nominais anuais de energia primária (N_{tc}), e de referência (N_t) e classe energética para a fração em estudo, utilizando $U (W m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1})$ por defeito e calculados através do EnergyPlus.....	29
Tabela 4.2- Temperaturas médias exteriores dos meses e dias onde o comportamento das grandezas foi estudado.....	34
Tabela 4.3- Conclusões retiradas pela análise do desenvolvimento, por hora, do coeficiente de transferência de calor por convecção no interior da face, nos dias críticos, em função da espessura de isolamento térmico	57
Tabela 4.4-Conclusões retiradas pela análise do desenvolvimento, por hora, do coeficiente de transferência de calor por convecção no interior da face, nos dias críticos, em função da posição de isolamento térmico na EOE.....	59
Tabela 4.5- Conclusões retiradas pela análise do desenvolvimento da taxa horária de perda calor por condução de superfície no interior da face, nos dias críticos, em função da espessura de isolamento térmico	64
Tabela 4.6- Conclusões retiradas pela análise do desenvolvimento da taxa horária de perda calor por condução de superfície no interior da face, nos dias críticos, em função da posição de isolamento térmico na EOE.....	65

ABREVIATURAS

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

AQS – Águas quentes sanitárias

DEE – Desempenho Energético de Edifícios

EE – Eficiência energética dos edifícios

ENU – Espaço não útil

EOE – Envolvente Opaca Exterior

EPBD – Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios

GEE – Gases Efeito de Estufa

HAB – Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

IPMA – Instituto Português do Mar e Atmosfera

NE – Nordeste

NO – Noroeste

nZEB – *Near Zero Energy Buildings*; Edifício com Necessidades Energéticas quase nulas

PTL – Pontes Térmicas Lineares

REH – Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios para Habitação

SCE – Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

SE – Sudeste

SO – Sudoeste

UE – União Europeia

XPS – Poliestireno Extrudido

SIMBOLOGIA

A_p – Área interior útil de pavimento (m^2)

B – Desenvolvimento linear da ponte térmica linear (m)

b_{tr} – Coeficiente de redução de perdas

F_g – Fração envidraçada

$g_{L, T}$ – Fator solar global

g_{L, T_p} – Fator solar do vão envidraçado na estação de aquecimento

$g_{L, vi}$ – Fator solar da área transparente para uma incidência da radiação perpendicular ao vão envidraçado

GD – Número de graus-dias na estação de aquecimento, na base de 18 °C ($^{\circ}\text{C}$)

H_{adj} – Coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos da envolvente em contacto com edifícios adjacentes ($\text{W }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

H_{ecs} – Coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos em contacto com o solo ($\text{W }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

H_{enu} – Coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos da envolvente em contacto com espaços interiores não úteis ($\text{W }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

H_{ext} – Coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos da envolvente em contacto com o exterior ($\text{W }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

$H_{tr,i}$ – Coeficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento ($\text{W }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

N_{IC} – Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento ($\text{kWh m}^{-2} \text{ano}^{-1}$)

N_t – Necessidades nominais anuais de energia primária de referência ($\text{kWh}_{EP} \text{m}^{-2} \text{ano}^{-1}$)

N_{tc} – Necessidades nominais anuais de energia primária ($\text{kWh}_{EP} \text{m}^{-2} \text{ano}^{-1}$)

N_{VC} – Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento ($\text{kWh m}^{-2} \text{ano}^{-1}$)

$Q_{g,v}$ – Ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento (kWh ano^{-1})

$Q_{gu,i}$ – Ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento (kWh ano^{-1})

$Q_{tr,i}$ – Transferência de calor por transmissão através da envolvente do edifício na estação de aquecimento (kWh ano^{-1})

$Q_{ve,i}$ – Transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento (kWh ano^{-1})

R_{Nt} – Rácio de classe energética em edifícios de habitação

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C W}^{-1}$)

R_{si} – Resistência térmica superficial interior ($\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C W}^{-1}$)

U – Coeficiente de transmissão térmica ($\text{W m}^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

U_{wdn} – Coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado médio dia-noite ($\text{W m}^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

η_v – Fator de utilização de ganhos térmicos na estação de arrefecimento

λ – Condutibilidade térmica ($\text{W m}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

ψ – Coeficiente de transmissão térmica linear ($\text{W m}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Da construção à demolição, o setor dos edifícios é responsável por cerca de 40% do consumo total de energia da União Europeia (UE) e por 36% das emissões de gases efeito de estufa (GEE), uma vez que, aproximadamente, 75% do parque imobiliário existente, apresenta baixo desempenho energético. Particularmente, o setor residencial, é responsável por cerca de dois terços do consumo de energia final do parque edificado europeu. (Palma et al., 2022)

Desta forma, para se promover o aumento da eficiência energética dos edifícios (EE), reduzir o consumo de energia e as emissões de GEE, várias políticas têm sido implementadas. Em 2002, surgiu a Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios (EPBD), sendo esta o principal instrumento legislativo ao nível da União Europeia, onde são definidos os padrões de desempenho energético em edifícios. (Zakula et al., 2019) A par das políticas implementadas, foram publicadas normas europeias onde são definidas as metodologias de cálculo para avaliar o desempenho energético dos edifícios. Por sua vez, estas normas são adaptadas às diferentes realidades construtivas existentes nos diferentes estados-membros.

Nos dias de hoje, a EPBD já sofreu duas atualizações, o que se motivou a revisão de um largo conjunto de normas e, a nível nacional, o lançamento de vários Decretos-Lei, Portarias e Despachos. Recentemente, a reformulação da EPBD introduziu a definição de “edifício com necessidades energéticas quase nulas”, onde é exigido que todos os novos edifícios apresentem um consumo de energia quase nulo (nZEB).(Michalak, 2014) A par deste conceito, existem metas de melhoria da EE até 2030 e o grande objetivo de se alcançar a neutralidade carbónica em 2050.(Palma et al., 2022) Desta forma, destaca-se a importância do desenvolvimento de estratégias que potencializem o alto desempenho construtivo do parque imobiliário, como forma de reduzir o consumo energético do setor dos edifícios.

Em Portugal, para se caracterizar o desempenho térmico dos edifícios ainda é utilizada a norma ISO 13790:2008. Esta propõe três diferentes tipos de métodos de cálculo para avaliar as necessidades anuais de energia para aquecimento e arrefecimento: o método sazonal ou método de cálculo mensal, o método dinâmico horário e o método baseado na simulação dinâmica (Michalak, 2014). No caso de Portugal, é utilizada uma metodologia de cálculo baseada na sazonalidade, ou seja, calculam-se as necessidades energéticas de aquecimento (vulgarmente designadas necessidades de Inverno) e arrefecimento (vulgarmente designadas necessidades de Verão). Esta, com base na norma ISO 13790:2008, encontrava-se descrita no Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios para Habitação (REH), aprovado pelo

Decreto-lei nº118/2013. Atualmente, depois da mais recente revisão e conseqüente transposição da EPBD, este decreto já não se encontra em vigor. Assim sendo, a metodologia sazonal está exposta no Manual do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (Despacho n.º 6476-H/2021), na sequência da publicação do Decreto-Lei n.º 101 -D/2020.

O método sazonal analisa as necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento, admitindo que, cada edifício e/ou fração autónoma são uma única zona, com as mesmas condições de referência, e que os fenómenos de transferência de calor envolvidos, ocorrem em regime permanente. Nos edifícios destinados a habitação, os balanços de energia, ou seja, o balanço entre ganhos e perdas térmicas, são determinados em condições nominais, considerando uma temperatura interior de 18°C na estação de aquecimento e de 25°C na estação de arrefecimento. (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021)

Contudo, é esperada uma mudança no que diz respeito à avaliação do desempenho energético de edifícios pois, com a renovação da EPBD, foi apresentada a EN ISO 52016-1:2017, que substitui a EN ISO 13790:2008, introduzindo uma nova metodologia para calcular as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento, baseada na simulação dinâmica, através do cálculo mensal e do cálculo horário, determinando assim, a remoção do método sazonal. (Summa et al., 2021)

A ISO 52016-1:2017 é aplicada em edifícios em fase de projeto, a novos edifícios e a edifícios existentes na sua fase de utilização (ISO 52016-1:2017, n.d.). Esta, fornece uma metodologia de cálculo para calcular as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento, as temperaturas internas e as cargas de calor sensível e latente (van Dijk, 2019). Os cálculos são realizados por zona térmica e as zonas térmicas podem ser consideradas termicamente acopladas ou não. A norma em vigor especifica metodologias de cálculo para a avaliação:

- Das necessidades de energia (sensível) para aquecimento e arrefecimento, através de uma metodologia de cálculo horária ou mensal;
- Das necessidades de energia latente para (des)umidificação através de uma metodologia de cálculo horária ou mensal;
- Das temperaturas internas, através de uma metodologia horária;
- Da carga sensível de aquecimento e arrefecimento, através de uma metodologia horária;
- Da humidade e da carga de calor latente para (des)umidificação, através de uma metodologia horária;
- Das condições do ar de insuflação para promover a humidificação e desumidificação necessárias; (ISO 52016-1:2017, n.d.)

A ISO 52016-1:2017 apresenta dois procedimentos de cálculo para avaliar o desempenho energético dos edifícios: o cálculo mensal e o cálculo horário.

Comparativamente à norma anterior, o método do cálculo mensal presente na norma ISO 52016-1:2017, não foi fundamentalmente alterado. Ele considera fatores de correção e correlação, geralmente pré-calculados através de simulações, para contabilizar, de forma estatística, o equilíbrio térmico em intervalos de tempo mensal. Contudo, o método mensal apresenta o defeito de contabilizar as necessidades mensais de aquecimento e arrefecimento de forma separada, sem interação.

O método de cálculo horário é um método dinâmico completo, no qual, cada elemento construtivo é modelado separadamente. Comparativamente à norma anterior, esta ostenta ser a principal diferença pois, na ISO 13790:2008 o modelo apresentava-se simples e agregado, ou seja, todos os elementos construtivos estavam agregados numa única zona térmica. Na ISO 52016-1:2017, o método de cálculo horário avalia, através de variações horárias e diárias, as interações dinâmicas, (clima, operações, elementos...), que influenciam as necessidades para aquecimento e arrefecimento. O método horário apresenta ser muito adequado para a validação dos fatores de correção e correlação utilizados no método mensal. (van Dijk, 2019)

Desta forma, como se prevê que a curto prazo, a nível nacional se tenha que desistir da utilização do método sazonal (estações) para avaliar o desempenho energético dos edifícios. Terá que se optar entre aplicar o método de cálculo mensal ou o método dinâmico nos edifícios residenciais, devendo-se discutir a adoção do método mais detalhado, ou seja, de simulação dinâmica.

1.2 Motivação

Conforme as políticas energéticas aplicadas aos edifícios se tornam mais exigentes, surge a necessidade de se aplicar métodos de cálculos mais sofisticado para avaliar o desempenho energético dos edifícios destinados à habitação. Embora o método sazonal ainda se mantenha em Portugal, com o aparecimento da EN ISO 52016-1:2017 e a constante procura pela eficiência energética, espera-se que a avaliação em regime sazonal entre em desuso e que seja substituída pela metodologia dinâmica, tendo por base o cálculo dinâmico horário. A par deste regime, surgem modelos dotados de um elevado grau de sofisticação que, embora permitam uma avaliação mais detalhada do desempenho de um edifício, aumentam a complexidade e a probabilidade de erro associado.

Desta forma, seguindo como motivação a necessidade de se implementar a nova norma, a presente dissertação visa estudar qual o impacto de se introduzir uma metodologia dinâmica na avaliação do desempenho energético de edifícios residenciais, comparando-a com a metodologia sazonal atualmente em uso, e apurar quais as principais diferenças, vantagens e

desvantagens. Uma vez que o desempenho energético de um edifício e o seu nível de conforto dependem das suas componentes passivas, para comparar os dois regimes, estudaram-se diferentes cenários onde se alteraram a espessura e posição de isolamento térmico na envolvente opaca em contacto com o exterior. O propósito foi compreender o impacto de diferentes níveis de isolamento da envolvente nos dois métodos.

1.3 Objetivos

A presente dissertação tem como principal objetivo estudar o impacto de se aplicar o método dinâmico em relação ao método sazonal. Para tal, aplicaram-se as duas metodologias para avaliar o desempenho energético de uma fração existente. Consequentemente, para se perceber o impacto de uma medida de melhoria passiva, alterou-se a envolvente opaca em contacto com o exterior, colocando-se diferentes níveis de isolamento térmico. Assim, estudou-se qual o impacto de se colocar isolamento na envolvente e de se alterar a sua espessura e posição, em regime dinâmico horário e sazonal. Em termos comparativos, analisaram-se as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento na fração, obtidas nos diferentes regimes, com o objetivo de:

- Avaliar a precisão dos resultados obtidos através metodologia sazonal, atualmente em vigor, comparativamente aos determinados através de uma simulação dinâmica horária.
- Estudar diferentes cenários em que se altera a espessura e posição de isolamento térmico na envolvente exterior.

Como objetivo secundário, estudaram-se várias grandezas relacionadas com a metodologia dinâmica, para avaliar o desempenho energético da fração, nomeadamente:

- A evolução da temperatura superficial da envolvente opaca;
- A evolução do fluxo de calor ao longo do tempo por convecção e condução;
- Necessidades de aquecimento e arrefecimento.

Essas grandezas foram analisadas em função das diferentes posições e espessuras de isolamento térmico na envolvente opaca exterior e em função da orientação. Também se procedeu ao estudo para vários intervalos temporais (mensal, diária e horária).

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos. O primeiro capítulo é referente à “Introdução”. É apresentado um enquadramento ao tema, onde se discute as normas de cálculo para averiguar o desempenho energético dos edifícios em vigor na UE. São também apresentados os objetivos principais e motivação desta dissertação.

No segundo capítulo, “Estado de Arte”, foi apresentada, de forma sumária, as principais considerações das Normas ISO 13790:2008 e ISO 52016-1:2017 no que diz respeito à Avaliação Energética de Edifícios de Habitação com recurso à simulação dinâmica. Também são descritas as ferramentas de cálculo dinâmico utilizadas.

No terceiro capítulo, “Caso de Estudo”, é apresentada a fração existente que foi alvo de uma avaliação energética em regime sazonal e em regime dinâmico. Também é discutida a forma como os dados são introduzidos em ambos os regimes e os diferentes cenários estudados.

No quarto capítulo, “Apresentação e Discussão de Resultados”, são expostos os resultados obtidos em ambos os regimes, nomeadamente, as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento. Posteriormente, através destas variáveis, estabeleceu-se uma comparação entre regimes. Neste capítulo, também são apresentados os resultados obtidos pela análise de grandezas relacionadas com a simulação dinâmica, para averiguar, de forma mais detalhada, o desempenho da fração.

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

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Normalização

Na presente secção discute-se principalmente as considerações das Normas ISO 13790:2008 e ISO 52016-1:2017 no que diz respeito à Avaliação Energética de Edifícios de Habitação com recurso à Simulação Dinâmica.

A norma ISO 52016-1:2017 surgiu em 2017 com o intuito de substituir a norma ISO 13790:2008, destacando-se na descrição a metodologia para a avaliação do desempenho energético dos edifícios, baseada na simulação dinâmica. Conforme as políticas se foram tornando mais sofisticadas, verificou-se um aumento da necessidade de simulações energéticas para avaliar o desempenho energético de edifícios, o que levou ao desenvolvimento de vários softwares computacionais para se alcançar esse fim. No meio académico, entre as ferramentas de simulação mais elaboradas, destacam-se o *TRNSYS*, *EnergyPlus* e *Modelica*. Estes softwares permitem uma análise muito detalhada de sistemas construtivos complexos. Embora as ferramentas de simulação ofereçam inúmeras vantagens, como a alta precisão, existem desvantagens como a complexidade na utilização, o que exige ao usuário um alto nível de conhecimento e a introdução de vários parâmetros de entrada. (Zakula et al., 2019) Associado a um maior detalhe surge a desvantagem de ser mais consumidor de tempo.

A norma ISO 13790:2008, para a avaliação do desempenho energético dos edifícios, fundamenta-se, principalmente, no cálculo das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento dos espaços (Zakula et al., 2019). Esta norma permite a aplicação de um método simplificado, admitindo um comportamento quase estacionário (Tadeu et al., 2011). A norma ISO 52016-1:2017 considera a aplicação de métodos de cálculo que permitem a avaliação das necessidades de energia sensível para aquecimento e arrefecimento, das necessidades de energia latente para desumidificação, das cargas sensíveis de aquecimento e arrefecimento de projeto, das cargas latentes de projeto e das temperaturas internas (Zakula et al., 2019). Na sua matriz, a norma contém procedimentos de cálculo de base horário e mensal. Contudo, é recomendado a utilização do cálculo horário, uma vez que este método será mais adequado para a análise de variações horárias e diárias nos dados meteorológicos e operações necessárias no edifício, como o ajuste de temperaturas. O método de cálculo presente nesta norma mais recente permite o cálculo das temperaturas do ar interior de edifícios e das temperaturas médias operativas e radiantes, ou seja, sem impor um *set-point* de aquecimento e arrefecimento. Em comparação, a ISO 13790:2008 não enquadrava esta possibilidade. Outra diferença considerável entre as normas é a abordagem utilizada para avaliar o desempenho. A ISO 52016-1:2017 assume que, cada elemento construtivo, (paredes, janelas, piso...), é modelado com uma série de nós e que

cada nó apresenta uma equação de balanço de energia. Isto confere inúmeras vantagens, como por exemplo, a capacidade térmica pode ser especificada para cada elemento de construção, em vez de se agrupar vários elementos de construção para aferir a capacidade térmica geral de um edifício ou de uma zona de construção. Contudo, esta abordagem cria um sistema de equações relativamente grande para cada zona devido ao número de nós, o que o torna um método exigente computacionalmente. Esta norma também permite o zonamento térmico, caracterizado de acordo com as características de cada espaço presente no edifício, como o tipo de uso (perfis de ocupação e de utilização de equipamentos), os ganhos internos... (Zakula et al., 2019).

Formalmente, a norma ISO 13790:2008 já não devia estar a ser utilizada como base aos métodos aplicados pelos diferentes estados-membro, particularmente o método sazonal. Contudo, inúmeros trabalhos foram publicados para avaliar a precisão do seu método de cálculo, comparando-o com uma abordagem dinâmica. Compreender quais eram as maiores discrepâncias existentes é importante até para se compreender o impacto que o método pode ter no apuramento das necessidades energéticas dos edifícios residências e consequentemente nos procedimentos de certificação energética.

Assim sendo, Ballarini et al. (Ballarini et al., 2018) aplicaram o método quase-estacionário simplificado presente na ISO 13790:2008 a dois edifícios de baixo consumo, localizados em três regiões na Itália, com climas distintos e, com o intuito de avaliar a sua precisão, compararam os resultados com um modelo de simulação dinâmica, recorrendo ao EnergyPlus. Deste estudo concluíram que o método quase estacionário subestimou as necessidades energéticas para arrefecimento e sobrestimou as necessidades energéticas para aquecimento. (Ballarini et al., 2018). Um estudo semelhante foi realizado por Evangelisti et al. (Evangelisti et al., 2014), contudo, obtiveram-se conclusões opostas. Os autores analisaram três edifícios localizados no centro de Itália, um edifício antigo, uma casa e um apartamento. Os cálculos para o estado quase estacionário foram comparados com simulações dinâmicas no TRNSYS e verificou-se uma sobrestimação e subestimação nas necessidades de arrefecimento e aquecimento, respetivamente (Evangelisti et al., 2014). Siren e Hasan (Sirén & Hasan, 2007) compararam o método mensal presente na norma ISO 13790:2008 com o método dinâmico horário, através do software *IDA Indoor Climate and Energy 3.0* (IDAICE), para avaliar o impacto do zonamento dos edifícios no cálculo das necessidades energéticas para arrefecimento, numa das zonas do clima finlandês. A orientação, o tipo de construção e o nível de zoneamento tiveram impacto nas diferenças entre os resultados de ambos métodos de análise. Por exemplo, na zona orientada a sul, observaram-se diferenças menos significativas que na zona orientada a norte. Esta revelou diferenças até 75% (Sirén & Hasan, 2007).

Como forma de resumo da literatura existente, Zakula et al. (Zakula et al., 2019) apresentou quais as principais razões para as discrepâncias existentes entre os métodos de cálculo,

concluídas nos trabalhos publicados sobre o tema, entre elas: (1) utilização de diferentes modelos de cálculo - enquanto que a ISO 13790:2008 permite a utilização de equações algébricas simplificadas, os programas de simulação utilizam equações de balanço de energia mais detalhadas; (2) diferenças no cálculo dos coeficientes de transferência de calor; (3) a estimativa simplificada permitida na ISO 13790:2008 para contabilizar os ganhos solares pode resultar em desvios consideráveis no desempenho energético dos edifícios, principalmente nos meses intermédios em que a temperatura exterior se aproxima da temperatura interior; (4) na ISO 13790:2008 é utilizada uma temperatura de referência de ar fixa para todo o período de cálculo, enquanto que o aquecimento e/ou arrefecimento intermitente é tratado como contínuo com uma temperatura de referência ajustada; (5) os dados meteorológicos são tratados de forma diferente, por exemplo, os valores médios mensais utilizados na ISO 13790:2008 não detetam os efeitos das variações climáticas ao longo do tempo; (6) o zonamento pode afetar os resultados, principalmente quando se lida com situações climáticas externas; (7) na ISO 13790:2008 existe menor robustez estocástica para os ganhos internos em relação à simulação dinâmica (Zakula et al., 2019). Desta forma, era evidente a necessidade de uma abordagem de cálculo que permitisse uma avaliação mais precisa no desempenho energético do edifício. A nova norma propõe um método que, à partida, se considera ser mais robusto.

Os métodos de cálculo da norma ISO 52016-1:2017 são baseados em equações de balanço de energia, para cada zona térmica e para cada elemento construtivo, para cada incremento de tempo. O balanço de energia para cada zona tem em consideração a transferência de calor das diferentes componentes do edifício, a troca de calor por ventilação, as trocas de calor devido à existência de pontes térmicas, a fração convectiva dos ganhos de calor internos e dos ganhos solares e a fração convectiva das cargas de aquecimento e arrefecimento dos sistemas técnicos. Para o cálculo das necessidades básicas de energia assume-se que a capacidade do sistema é absoluta e que a extração de calor é puramente convectiva. (Zakula et al., 2019)

O equilíbrio térmico de cada elemento de construção, (pisos, paredes, janelas...), é avaliado devido à existência de nós. Os elementos construtivos opacos são discretizados em cinco nós, dois nós representativos da superfície externa e interna e três nós são inseridos dentro do elemento de construção (Zakula et al., 2019). A partir da posição do nó dentro do elemento opaco, existem três balanços de energia diferentes. O balanço para o nó voltado para o interior considera as trocas de calor por convecção com o ar interior, as trocas de calor por condução, a transferência de calor por radiação entre superfícies que separam diferentes zonas, as contribuições solares transmitidas através das superfícies envidraçadas e as contribuições devidas às cargas do sistema de aquecimento e arrefecimento. Os balanços de energia para os nós inseridos dentro do elemento opaco consideram as trocas térmicas por condução com os nós adjacentes e quaisquer capacidades térmicas associadas. O balanço de energia do nó voltado para o exterior tem em conta as trocas de calor por convecção com o ar exterior, as trocas de

calor por radiação com o céu e as contribuições solares, que variam de acordo com o coeficiente de absorção solar, a radiação solar direta e difusa e a presença de sombreamento devido a obstáculos de obstrução solar. O tamanho do sistema de equações depende do número de zonas térmicas e dos diferentes elementos de construção (Summa et al., 2022). No caso da existência de múltiplas zonas termicamente semelhantes, a norma permite o acoplamento térmico para reduzir o nível de complexidade no cálculo. (Zakula et al., 2019)

Para reduzir a ambiguidade e garantir o cumprimento dos requisitos, o método horário EN ISO 52016-1:2017 prevê simplificações e diferentes pressupostos relativamente a diferentes aspetos da avaliação do desempenho energético dos edifícios. De facto, cada Estado-Membro pode substituir as opções padrão presentes na norma, no contexto dos seus regulamentos de construção. (Luca et al., 2022)

Relativamente aos artigos de literatura sobre o novo padrão, a análise do efeito das simplificações do modelo na precisão do método de cálculo, tem sido um tema crescente, na qual o método presente na ISO 52016-1:2017 é comparado com modelos detalhados de simulação numérica. (Luca *et al.*, 2022)

Para avaliar a precisão da nova norma ISO 52016-1:2017 no cálculo do desempenho energético de edifícios, Zakula et al. (Zakula et al., 2019) comparam os resultados obtidos entre o procedimento de cálculo horário de acordo com norma e o método horário detalhado aplicado no TRNSYS, para dez edifícios com referências croatas. Dessa comparação, conclui-se a existência de diferenças relevantes no modelo que descreve a transferência de calor através dos envidraçados, devido às simplificações existentes no cálculo padrão. A Norma assume valores constantes para a resistência térmica e para a transmitância de energia solar. Já a simulação dinâmica utiliza uma metodologia relativamente complexa para calcular as duas propriedades em função das condições de fronteira da janela, assumindo variações horárias. Registou-se uma discrepância até 40%, que foi reduzida quando se utilizou os valores de variação horária calculados pelo TRNSYS como entradas para a metodologia padrão. Outra diferença assinalada entre os métodos foi nas necessidades anuais de energia. Em média, para aquecimento registou-se uma diferença de 11% e, para arrefecimento, de 8%. O cálculo da transferência de calor através de elementos opacos revelou um certo nível de discrepância entre os métodos; no entanto, as diferenças foram menos acentuadas comparativamente à análise realizada para os vãos envidraçados. (Zakula et al., 2019)

Luca et al. (Luca et al., 2022) aplicaram o método horário ISO 52016-1:2017 a uma habitação unifamiliar de dois andares, para duas cidades italianas, com diferentes zonas climáticas, (Milão e Palermo), e compararam os resultados com os resultados obtidos para o método dinâmico detalhado, recorrendo ao software EnergyPlus. O método padrão tende a sobrestimar as

necessidades de energia para aquecimento, em relação ao modelo detalhado; e a subestimar as necessidades de energia para arrefecimento, conforme já tinha sido referido por outros autores. De facto, para ambas as cidades, observou-se esta tendência onde, nos meses de inverno relatou-se uma discrepância nas necessidades energéticas, principalmente, em Palermo. Para as necessidades de energia para arrefecimento, evidenciou-se uma subestimação geral para Milão, e uma boa concordância de resultados entre o método padrão e o método detalhado para Palermo. Como justificação para esses desvios, os autores teceram as seguintes considerações: (1) uma das principais causas para as diferenças entre os resultados foi a utilização de valores constantes para o coeficiente de transferência de calor de superfície. (2) As discrepâncias observadas entre o método simplificado e o método detalhado também foram influenciadas pelas diferentes estimativas dos ganhos solares de calor. Estas estimativas dependem não só do balanço efetuado nas janelas, mas também da capacidade térmica do edifício e os fenómenos associados de acumulação e libertação de calor. (Luca et al., 2022)

Com este particular enfoque na possibilidade de simulação dinâmica de edifícios residenciais, na secção seguinte descrevem-se as ferramentas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

2.2 Ferramentas para o cálculo dinâmico

A necessidade de atualização da legislação referente à avaliação do desempenho energético de edifícios de habitação, surge muitas vezes devido à necessidade de reformulação das metodologias de cálculo, conforme se enunciou nas secções anteriores da dissertação. Espera-se que a metodologia sazonal seja substituída a curto prazo por uma metodologia que tenha por base o cálculo horário. Assim, com o objetivo de estudar as diferenças de resultados entre as metodologias sazonal e de cálculo horário, selecionou-se o EnergyPlus para levar a cabo o cálculo dinâmico horário. Para a modelação geométrica dos edifícios pode ser efetuada recorrendo ao SketchUp, o qual também é descrito sumariamente abaixo.

2.2.1 SketchUp

O SketchUp é um programa utilizado para a criação de modelos 3D, originalmente desenvolvido pela *At Last Software*. Atualmente, é desenvolvido pela *Trimble* que disponibiliza a versão gratuita, (SketchUp Make) e a versão profissional, (SketchUp Pro). Esta ferramenta caracteriza-se pela sua facilidade de utilização, que confere ao utilizador a criação de modelos de forma intuitiva. Embora o SketchUp tenha sido inicialmente produzido para elaboração e planeamento de projetos arquitetónicos, a sua versatilidade torna-o útil para diversos campos, nomeadamente, na análise do desempenho energético de edifícios. Nesta temática, foram criados diversos plug-ins que permitem importar dados e exportar o modelo desenhado para diversos programas de cálculo. Desta fora, atualmente, é muito utilizado nas simulações termo energéticas. (Schreyer & Hoque, 2009)

Como acontece num programa CAD, o SketchUp permite que o usuário manipule e edite designs 3D, permitindo ao utilizador medir distâncias e adicionar dimensão e texturas. O programa também apresenta a capacidade de realizar estudos sobre o sombreamento, para um projeto, quando se caracteriza a latitude, longitude data e hora. (Ellis et al., 2008). Para se desenhar a envolvente e todas as componentes da fração foi utilizada, nesta dissertação, a versão gratuita do software, o SketchUp Make 2017.

Realizar a simulação energética da fração, a partir da criação de um modelo 3D, é possível devido ao plug-in OpenStudio SketchUp, uma extensão de ferramentas do SketchUp 3D. Este plug-in é um editor de geometria que permite ao usuário criar uma geometria de construção, adicionar zonas térmicas, superfícies de transferência de calor, como paredes, janelas e portas, e outros objetos de dados de entrada necessários. O modelo SketchUp pode então, ser salvo como um arquivo de entrada EnergyPlus (.IDF). (Ellis et al., 2008)

2.2.2 EnergyPlus

O software EnergyPlus é um programa de análise energética e de simulação de carga térmica, baseado nos programas BLAST e DOE-2. Através da introdução de todos os parâmetros de um edifício, como a sua composição física, os seus sistemas técnicos, etc, o EnergyPlus calcula as cargas térmicas (através de um mecanismo de equilíbrio térmico), de aquecimento e arrefecimento necessárias para manter os pontos de ajuste de controlo térmico, as condições de um sistema AVAC, o consumo de energia primária de equipamentos, e outras componentes necessárias para que a simulação se adapte a um edifício real. (Ashton, 2016)

O EnergyPlus apresenta três componentes básicos: um controlador de simulação, um módulo de simulação do balanço do calor e massa e um módulo de simulação de sistemas de construção. O controlador de simulação é o nível do programa mais externo e controla as interações entre todos os loops da simulação e o período de simulação selecionado pelo utilizador, seja dia, mês, estação do ano, etc. (Crawley et al., 2001)

O módulo de simulação baseado num balanço de calor e massa é o método de cálculo presente no EnergyPlus. Os modelos de balanço de calor supõem que o ar, presente em cada zona térmica, pode apresentar uma temperatura uniforme. O software também supõe que, de acordo com os modelos de equilíbrio térmico, as superfícies presentes numa divisão, como paredes, janelas, cobertura e pavimento apresentam: (1) temperaturas de superfícies uniformes; (2) superfícies radiantes difusas; e que (3) a condução de calor é unidimensional.

A figura seguinte representa a estrutura do EnergyPlus que controla os modelos de equilíbrio térmico das superfícies construtivas e dos sistemas de ventilação e ar novo e atua como uma

interface entre equilíbrio térmico e o módulo de simulação de sistemas de construção. (Crawley et al., 2001)

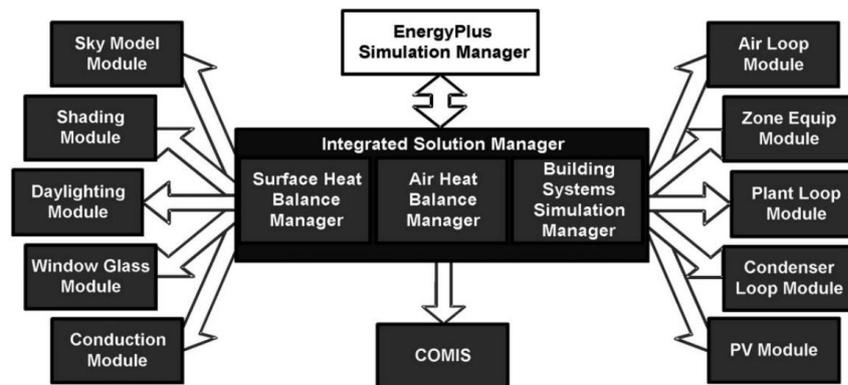


Figura 2.1- Representação esquemática dos módulos de cálculo integrados no software EnergyPlus. (Crawley et al., 2001)

O módulo de equilíbrio térmico das superfícies (*Surface Heat Balance Manager*) realiza uma simulação do equilíbrio térmico da superfície interna e externa; da relação entre os balanços de calor e as condições de fronteira; e dos efeitos de condução, de convecção, de radiação e de transferência de massa. O módulo do balanço de massa do ar (*Air Heat Balance Manager*) lida com os vários fluxos de massa existentes, como o ar proveniente da ventilação, da exaustão, e de infiltrações. Este módulo tem em conta a massa térmica de ar de cada zona e avalia os ganhos diretos de calor por convecção. O módulo de simulação de sistemas de construção (*Building Systems Simulation Manager*) controla a comunicação entre os mecanismos de equilíbrio térmico e os sistemas AVAC, sistemas elétricos, equipamentos, etc. (Crawley et al., 2001)

Através deste software é possível realizar simulações bastante realistas, tendo em contas vários fatores como, a temperatura exterior do local onde se insere o edifício, a radiação e ângulos de incidência solar, entre outros. Para que a simulação seja coerente com a realidade, é necessário caracterizar os materiais e a geometria do edifício, as zonas térmicas existentes com exigências de conforto e respetiva utilização. Assim, após se inserir o período de simulação, (horário, diário, mensal...), é possível estudar to desempenho energético global de um edifício (Ballarini et al., 2018).

3 CASO DE ESTUDO

A fração que foi alvo de estudo pertence a um edifício multifamiliar situado em Coimbra, Portugal, a que corresponde a zona climática de verão V2 e Inverno I1. É uma fração de tipologia T4, de área útil de 71,57 m² e pé direito médio de 2,50 m. A fração está localizada no último andar. O edifício onde a fração se insere é constituído por rés-do-chão e dez andares, com uma elevação de 60,00 m do nível médio das águas do mar, e foi construído em meados dos anos 70. A Figura 3.1 representa o edifício onde a fração se insere, destacando o mesmo e a fachada que ostenta uma orientação a Sudoeste.



Figura 3.1- Fração autónoma estudada, destacando a fachada orientada a SO.

Na Figura 3.2, é possível observar a planta da fração em estudo, elaborada no Software SketchUp, com as respetivas divisões. É de notar, a presença de uma marquise, admitida como sendo um espaço não útil. Segundo o Decreto-Lei n.º 101-D/2020, um espaço interior não útil define-se por integrar um espaço sem ocupação humana permanente e sem consumo de energia associado ao aquecimento e arrefecimento do espaço para conforto térmico. (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2020)



Figura 3.2- Modelo elaborado no Software SketchUp representativo da fração em estudo

O apartamento apresenta três orientações distintas: Nordeste, Sudoeste e Noroeste. Na fachada orientada a Nordeste estão presentes três quartos. Cada quarto contém um vão envidraçado. Uma percentagem da área desta fachada está em contacto com o apartamento adjacente. Na fachada orientada a Sudoeste existe um quarto, as duas instalações sanitárias e a marquise, cada divisão, ostenta área envidraçada. Já a fachada orientada a Noroeste não apresenta área envidraçada. É de notar, que a fachada orientada a Sudeste está em contacto com o Hall de entrada, pelo que, é admitida como sendo uma parede interior em contacto com um espaço não útil, onde vão existir perdas e ganhos térmicos não desejados.

Como o edifício está localizado no interior da cidade, tem de se avaliar o grau de sombreamento nas fachadas da fração. A fachada orientada a NE é dotada de um maior grau de sombreamento devido ao apartamento adjacente à fração em estudo, perpendicular à fachada.

A envolvente da fração analisada é constituída por cinco tipos distintos de elementos construtivos: paredes de envolvente interior e exterior, cobertura exterior, pavimento interior que separa diferentes frações e vãos envidraçados.

Como o edifício onde se localiza o apartamento foi construído entre os anos 70 e 80, existe falta de informação quanto à solução construtiva dos elementos opacos da fração em estudo. Contudo, através de um levantamento, sabe-se que as paredes exteriores e a parede em contacto com os espaços de circulação comuns apresentam uma espessura de 24 cm. Ambas são de alvenaria de tijolo, com reboco tradicional na face exterior e reboco tradicional e/ou cerâmica no interior da face. A parede interior em contacto com a marquise apresenta uma espessura de 21 cm de alvenaria e reboco tradicional em ambas as faces.

Na fração em estudo existem três tipos de janelas exteriores, distribuídas respetivamente pelos quartos, instalações sanitárias e marquise. Na parede que separa a cozinha da marquise, também existe uma janela interior. Todos os vãos são de vidro simples incolor e caixilharia de alumínio sem corte térmico, com abertura de correr e abertura basculante, para as janelas dos quartos/cozinha e espaços sanitários, respetivamente. A janela da marquise é composta por uma parte de correr e a restante parte é fixa. O vão envidraçado apresenta uma área total de 4,56 m². Nos quartos, a área total do vão é de 1,63 m² e existe proteção exterior em persianas plásticas de cor clara e proteção interior com cortinas transparentes. Nos espaços sanitários, a área envidraçada é de 0,50 m² e a janela interior apresenta uma área de 1,30 m².

A habitação em estudo não apresenta nenhum equipamento mecânico de ventilação, sendo apenas provida por ventilação natural. Na cozinha estão presentes grelhas de admissão de ar e nos espaços sanitários existem condutas de exaustão e de admissão. No apartamento, existe apenas um sistema técnico, um esquentador a gás natural que tem como função aquecer águas sanitárias.

Para avaliar o comportamento termohigométrico (Coelho, 2015) de uma divisão da fração em estudo, foi utilizado um data logger com o objetivo de monitorizar a temperatura (Figura 3.3) e a humidade relativa (Figura 3.4). As medições foram feitas em intervalos de tempo de 5 minutos, durante, aproximadamente, duas semanas, durante o período de inverno, ou seja, na estação de aquecimento. O aparelho foi colocado numa divisão com a parede exterior orientada a NE.

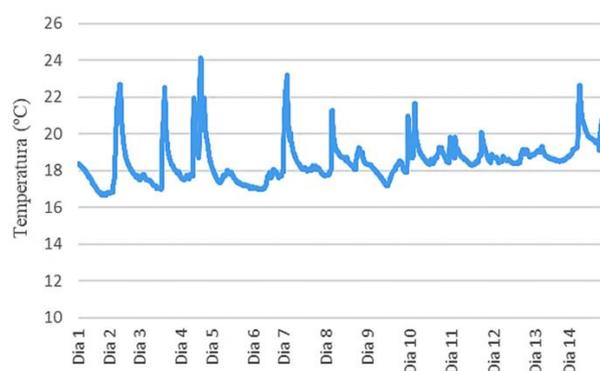


Figura 3.3- Registo de temperaturas para aproximadamente 14 dias numa divisão da fração em estudo

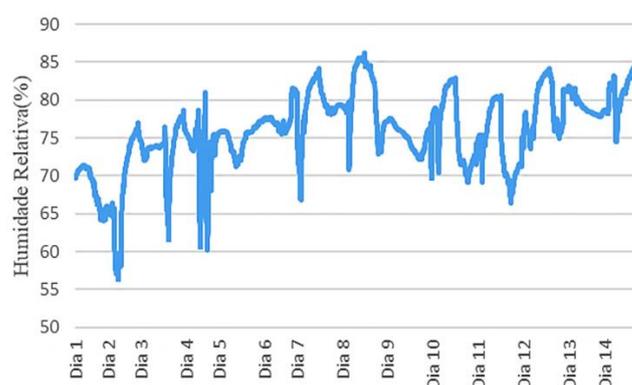


Figura 3.4- Registo da humidade relativa para aproximadamente 14 dias numa divisão da fração em estudo

No gráfico da temperatura observa-se que a divisão onde o aparelho foi colocado consegue-se assegurar uma temperatura de conforto, embora se tenham registado variações consideráveis (entre sensivelmente os 17°C e os 24° C). É importante refletir sobre o facto de esta ter sido utilizado nalguns períodos um termoventilador, que justifica as referidas variações. Como seria

e esperar, ambos os gráficos se desenvolvem de forma oposta, ou seja, para uma temperatura mais elevada, regista-se uma humidade relativa mais reduzida e vice-versa. Realça-se que a divisão escolhida para realizar as medições apresenta patologias associadas à condensação superficial, o que nos permite concluir que é frequente atingirem-se temperaturas superficiais do ar inferior ao ponto de orvalho. Entende-se por ponto de orvalho, a temperatura de uma massa de ar quando atinge a saturação.(Coelho, 2015)

3.1 Método de cálculo em regime sazonal de edifícios

Para realizar o estudo energético da fração em regime sazonal, que se encontra atualmente em vigor, foi utilizada uma folha de cálculo aplicação do HAB, intitulada “Avaliação do comportamento térmico e do desempenho energético, de acordo com o Decreto-Lei 101-D/2020”, disponível gratuitamente na plataforma para a eficiência energética de edifícios, P3E, desenvolvida pelo Itecons. Esta, incorpora, na sua matriz, todas as regras e metodologias de cálculo, presentes na atual legislação. Deste modo, calcula inúmeros parâmetros necessários para realizar a avaliação do desempenho energético da fração em estudo. Também faz a verificação automática do cumprimento dos requisitos mínimos e valores máximos admissíveis previstos no referido Decreto-Lei, comparando a fração com o edifício de referência, possibilitando assim, a determinação automática da classe energética.

Desta forma, foi necessário preencher a folha de cálculo com as características construtivas da fração em estudo. Na análise sazonal, o clima é definido em função da localização do edifício e respetiva cota.

O Despacho n.º 6476-H/2021, que aprova o Manual do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), determina toda a metodologia de cálculo para efeitos da avaliação do desempenho energético, contém, na sua estrutura, possibilidades de simplificação na fase de apuramento dos parâmetros necessários para realizar o estudo energético. Assim, para realizar o estudo energético da fração, numa primeira fase, como existe falta de informação quanto à solução construtiva dos elementos opacos, utilizaram-se valores por defeito. Através da espessura das soluções construtivas, averiguou-se um valor para o coeficiente de transmissão térmica, U ($W m^{-2} °C^{-1}$). Para as paredes interiores em contacto com espaços não úteis, o valor do coeficiente teve de ser adaptado do valor predefinido para as paredes exteriores, admitido que a resistência térmica superficial exterior é igual à interior, ou seja, $R_{si}=R_{se}=0,13$ ($m^2 °C W^{-1}$). Contudo, para realizar a análise comparativa entre o método sazonal e o dinâmico, é necessário limitar ao máximo as discrepâncias entre as variáveis a usar. Assim, após uma análise utilizando valores por defeito, com as características definidas para a análise em regime dinâmico, realizou-se, novamente, uma avaliação em regime sazonal, com um novo

valor calculado para o coeficiente de transmissão térmica, em consenso com as soluções construtivas utilizadas na simulação dinâmica.

Na Tabela 3.1, estão definidos os valores para o coeficiente, para os diferentes elementos construtivos opacos. Neste caso, para a análise em regime sazonal, o campo associado ao pavimento não foi necessário preencher pois, como está em contacto com outra fração que se considera igualmente aquecida, admite-se que não existem ganhos nem perdas térmicas.

Tabela 3.1- Valores, por defeito e calculados, para o coeficiente de transmissão térmica utilizados para caracterizar as soluções construtivas que separam o ar exterior e ENU.

Elemento Construtivo		U ($\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$)	
		Valores por Defeito	Valores calculados no Energyplus
Paredes Exteriores		1,30	1,42
Cobertura Exterior	Ascendente:	2,60	2,26
	Descendente:	2,20	1,95
Paredes Interiores em contacto com ENU		0,60	1,26

Para caracterizar os vãos envidraçados presentes na fração utilizou-se o catálogo ITE50 e o Despacho n.º 6476-H/2021, para se proceder ao levantamento dos seguintes parâmetros: (1) coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite (U_{wdn}); (2) fator solar do vidro aplicado no vão envidraçado para uma incidência solar normal à superfície ($g_{\text{L,vi}}$); (3) fator solar global ($g_{\text{L,T}}$); (4) fator solar do vão envidraçado na estação de aquecimento ($g_{\text{L,Tp}}$); (5) fração envidraçada (F_{g}). A janela da marquise, para a análise em regime sazonal, não foi contabilizada por estar presente numa divisão considerada como não útil. Na Tabela 3.2, estão definidos os parâmetros utilizados para caracterizar a envolvente envidraçada em regime sazonal. Estes foram obtidos através de valores tabelados presentes catálogo ITE50 e no Despacho n.º 6476-H/2021.

Tabela 3.2- Parâmetros para caracterizar a envolvente envidraçada presente na fração, obtidos através dos valores tabelados presentes no catálogo ITE50 e no Despacho n.º 6476-H/2021 (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021) (Santos & Matias, 2006)

Elemento Construtivo	U_{wdn} ($\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$)	$g_{\text{L, vi}}$	$g_{\text{L, T}}$	$g_{\text{L, Tp}}$	F_{g}
Janela dos quartos	4,10	0,85	0,07	0,85	0,70
Janela das instalações sanitárias	6,20	0,85	0,85	0,85	0,70
Janela Interior	6,50	-	-	-	-

A identificação das pontes térmicas lineares (PTL) não pode ser ignorada, uma vez que influenciam, de forma significativa, as necessidades térmicas da fração. Estas estão

relacionadas com o fluxo de calor associado a elementos construtivos com diferentes geometrias ou propriedades térmicas. Geralmente estão interligados com a ocorrência de condensações superficiais e aparecimento de patologias. (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021)

Na análise sazonal, para a determinação do coeficiente de transmissão térmica linear, Ψ ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$) foram adotadas as simplificações previstas no Despacho n.º 6476-H/2021, identificando o tipo de ligação e o respetivo comprimento do seu desenvolvimento, B (m). Na Tabela 3.3, estão identificados os parâmetros para identificar as pontes térmicas lineares exteriores e interiores. As PTL interiores estão relacionadas com as paredes interiores em contacto com um ENU, sendo que só foram identificadas para a parede que separa a cozinha da marquise, devido ao elevado valor do coeficiente de redução de perdas (btr). Quando este coeficiente assume um valor superior a 0,7, é necessário proceder à quantificação das pontes térmicas lineares interiores.

Tabela 3.3- Identificação das pontes térmicas lineares existentes na fração para a análise sazonal e seu respetivo comprimento de desenvolvimento, B (m), e valor do coeficiente de transmissão térmica linear, Ψ ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$) (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021)

	Tipo de Ligação	Ψ ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$)	B (m)
Pontes térmicas lineares exteriores	Fachada com pavimento de nível intermédio	0,70	25,24
	Fachada com cobertura	0,70	25,24
	Fachada com caixilharia	0,30	29,98
	Zona de caixa de estores	0,30	6,20
	Duas paredes verticais em ângulo saliente	0,30	5,00
Pontes térmicas lineares Interiores	Fachada com pavimento de nível intermédio	0,70	3,35
	Fachada com caixilharia	0,30	10,30
	Duas paredes verticais em ângulo saliente	0,50	5,00

Como a fração é só dotada de ventilação natural, é necessário estudar de que forma é que a fração autónoma beneficia da ventilação natural, e por isso foi necessário definir os seguintes parâmetros:

- Velocidade do vento: 3,6 m/s (valor por defeito);
- Altura do prédio: 30m (estimativa);
- Altura da fração autónoma: 25 m;
- Obstáculos que condicionem a ventilação: prédio vizinho, a uma distância aproximada de 20 m e altura de 30 m.

3.1.1 Parâmetros da classe energética e do balanço energético

Para realizar o estudo energético da fração em regime sazonal é necessário analisar indicadores energéticos. Cada indicador é essencial para o estudo do balanço energético global da fração, influenciado pelos diversos elementos construtivos passivos e elementos ativos. Conforme foi indicado acima, a realização do estudo em regime sazonal, vai ao encontro da legislação atualmente em vigor em Portugal.

Para avaliar o desempenho energético da fração é necessário comparar os valores reais, obtidos através das características reais da fração, com os valores de referência, conseguidos através de parâmetros de referência de uma fração fictícia, geometricamente idêntica, mas com uma envolvente de referência (estabelecida no Decreto-Lei (DL)). No âmbito do DL 101-D/2020, o Despacho nº 6476-H/2021 estabelece as regras para a determinação da classe energética para edifícios de habitação, propondo uma escala energética composta por 8 classes. A classe energética (R_{Nt}) é aferida através do quociente entre o valor das necessidades nominais de energia primária (N_{ic}) e o valor limite regulamentar para as necessidades nominais anuais de energia primária (N_t). A metodologia para determinar as necessidades nominais de energia primária resulta de um balanço de energia de várias parcelas, sendo do somatório das necessidades de aquecimento (N_{ic}), de arrefecimento (N_{vc}), e de águas quentes sanitárias (AQS), com o consumo de ventiladores, se aplicável. A este somatório, é retirado o eventual contributo de fontes renováveis. As necessidades de aquecimento, arrefecimento ou AQS são afetadas pela eficiência do equipamento que as suprime, sendo posteriormente afetadas por um fator de conversão. É de notar que, no apartamento em estudo, as parcelas correspondentes à utilização de ventiladores e energias renováveis, não entraram na contabilização das necessidades nominais de energia primária, devido à inexistência destes. (ADENE, 2020)

As necessidades nominais de energia útil para aquecimento (N_{ic}), em regime sazonal, são determinadas através dos princípios metodológicos estabelecidos na Norma EN ISO 13790:2008. Estas, traduzem a quantidade de energia necessária para manter a habitação a 18°C, durante toda a estação de aquecimento e, resultam da contabilização da transferência de calor pela envolvente ($Q_{tr,i}$), e por ventilação ($Q_{ve,i}$), e dos ganhos de calor úteis ($Q_{gu,i}$), relacionados com os ganhos solares pelos vãos envidraçados e ganhos devido às cargas internas do edifício, (equação 4-1).

$$N_{IC} = \frac{Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - Q_{gu,i}}{A_p} \text{ (kWh m}^{-2} \text{ ano}^{-1}\text{)} \quad (4-1)$$

Para estudar a influência da envolvente opaca e das PTL, o parâmetro $Q_{tr,i}$ assume uma grande relevância uma vez que ele traduz a quantidade de energia útil perdida pela envolvente, função

da diferença de temperatura entre o exterior e o interior e dos parâmetros térmicos da envolvente. Este parâmetro resulta do produto entre o número de graus-dia (GD) e do coeficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento ($H_{tr,i}$), (equação 4-2).

$$Q_{tr,i} = 0,024 \times GD \times H_{tr,i} \text{ (kWh)} \quad (4-2)$$

O parâmetro $H_{tr,i}$ traduz a potência transferida pela envolvente e resulta do somatório entre a transferência de calor através dos vários componentes da envolvente opaca do edifício: pela envolvente em contacto com o exterior (H_{ext}), pela envolvente em contacto com ENU (H_{enu}), pela envolvente em contacto com edifícios adjacentes (H_{adj}), e pela envolvente em contacto com o solo (H_{ecs}), (equação 4-3).

$$H_{tr,i} = H_{ext} + H_{enu} + H_{adj} + H_{ecs} \text{ (W } ^\circ\text{C}^{-1}\text{)} \quad (4-3)$$

Para avaliar o impacto das PTL e a eficiência da solução construtiva na transferência de calor através da envolvente opaca em contacto com o exterior, o parâmetro H_{ext} assume uma grande importância pois considera todos os elementos que constituem a envolvente exterior, ou seja, paredes, coberturas, pavimentos, vãos e pontes térmicas. Este determina-se através dos parâmetros que caracterizam essas perdas, nomeadamente o coeficiente de transmissão térmica, (U_i), a área da envolvente, (A_i), e o coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica, (ψ_i), e o seu respetivo desenvolvimento linear, (B_i), (equação 4-4).

$$H_{ext} = \sum_i [U_i \cdot A_i] + \sum_i [\psi_i \cdot B_i] \text{ (W } ^\circ\text{C}^{-1}\text{)} \quad (4-4)$$

As necessidades nominais de energia útil para arrefecimento N_{vc} , em regime sazonal, seguem a metodologia presente na Norma EN ISO 13790:2008 e, são definidas como sendo a quantidade de energia necessária para que, durante toda a estação de arrefecimento, a temperatura de uma habitação se mantenha constante, a 25°C, durante 24 horas. Estas necessidades são determinadas através da contabilização da transferência de calor pela envolvente, da transferência de calor por ventilação e dos ganhos térmicos, traduzidos através de fontes internas e pelos envidraçados. A equação (4-5), traduz a metodologia de cálculo para determinar o valor das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento, onde η_v representa o fator de utilização de ganhos térmicos na estação de arrefecimento e $Q_{g,v}$, os ganhos térmicos úteis brutos na estação de arrefecimento. (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021)

$$N_{vc} = \frac{(1 - \eta_v) \times Q_{g,v}}{A_p} \text{ (kWh m}^{-2} \text{ ano}^{-1}\text{)} \quad (4-5)$$

3.2 Métodos de cálculo em regime dinâmico de edifícios

Para avaliar o desempenho energético da fração em regime dinâmico é necessária uma descrição mais pormenorizada, uma vez que o regime dinâmico obriga, nalguns aspetos, a um maior grau de detalhe.

Para descrever a fração no EnergyPlus, é necessário preencher os parâmetros de simulação, como o clima onde esta se insere, o período de estudo, que normalmente é o ano inteiro, a envolvente, as soluções construtivas, as diferentes zonas térmicas, as condições de fronteira dos diferentes elementos construtivos e o sombreamento existente. Pormenores como os equipamentos elétricos, iluminação e tipo de ocupação também podem ser inseridos para uma maior aproximação à realidade.

3.2.1 Construção do modelo da fração em estudo

Na análise dinâmica, o clima é definido através de um ficheiro climático, obtido no website do EnergyPlus. O arquivo meteorológico do EnergyPlus contém os dados meteorológicos horários, necessários para realizar a simulação. Além dos dados meteorológicos usuais, como a temperatura e a radiação solar, o ficheiro incorpora outras informações relativas à localização, como as condições de projeto, a temperatura do solo, períodos climáticos típicos e extremos (Ashton, 2016). Os ficheiros climáticos para diferentes cidades de Portugal resultam de um conjunto de dados estatísticos baseados na interpolação espacial de dados climáticos publicados pelo Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA) entre 1951 e 1981, combinados com os dados do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI). Assim, foi possível inserir no EnergyPlus o ficheiro climático relativo a Coimbra. (EnergyPlus, n.d.)

Inicialmente, procedeu-se à construção do modelo da fração no SketchUp, através do plug-in OpenStudio SketchUp. Desta forma, todos os elementos constitutivos criados no SketchUp e todas as características da fração previamente definidas, são exportadas posteriormente para o EnergyPlus. A extensão permite desenhar um modelo bastante simplificado, representativo da envolvente opaca e envidraçada da fração (Figura 3.5 e Figura 3.6).

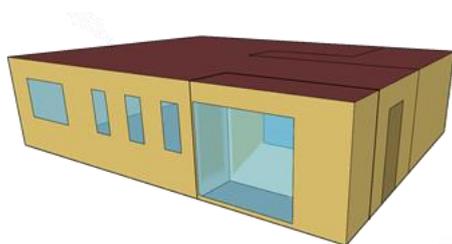


Figura 3.5- Modelo construído no SkecthUp da fração em estudo (fachada SO)

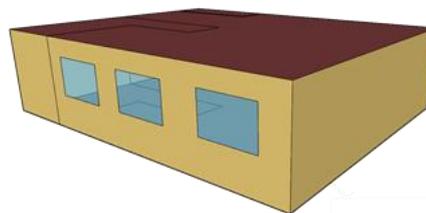


Figura 3.6- Modelo construído no SkecthUp da fração em estudo (fachada NE)

As zonas térmicas e as condições de fronteira dos vários elementos construtivos também foram caracterizadas no SketchUp. Como a fração apresenta uma marquise, assinalada como sendo um espaço não útil, admitiu-se a existência de duas zonas térmicas. Como se observa na Figura 3.7, o espaço da marquise apresenta uma zona térmica (representada a cor vermelha), diferenciada do resto da fração (cor verde), os espaços úteis. Posteriormente, as diferentes zonas foram caracterizadas no EnergyPlus.

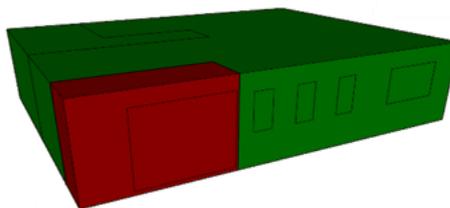


Figura 3.7- Diferentes zonas térmicas presentes na fração em estudo. A vermelho, a zona térmica característica do espaço não útil (marquise) e a verde, a zona térmica para os espaços úteis.

Relativamente às condições de fronteira, foi necessário identificar quais os elementos da envolvente apresentam uma condição em que o clima afeta as trocas energéticas. Quando esta situação não se observa, está-se perante uma condição de fronteira adiabática. Assim sendo, como se observa nas seguintes figuras, (Figura 3.8 a Figura 3.10), as paredes exteriores e cobertura foram classificadas como tendo uma situação de fronteira com o exterior, representadas com a cor azul. A cor magenta representa as superfícies que apresentam uma condição de fronteira adiabática. Na fração em estudo, o pavimento que separa duas frações que se consideram igualmente aquecidas e a parede adjacente ao apartamento vizinho, foram admitidos como sendo adiabáticos. A parede em contacto com os espaços de circulação comuns também foi considerada como uma condição de fronteira adiabática devido ao valor coeficiente de redução de perdas (btr) ser menor que 0,7. Contudo, as paredes em contacto com o espaço não útil não podem ser negligenciadas, pois separam duas zonas térmicas diferentes. Desta forma, foram caracterizadas com uma condição de superfície (de cor verde), pois contribuem para trocas térmicas.

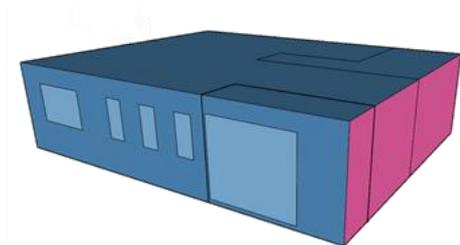


Figura 3.8- Condições de fronteira para a fachada SO, cobertura e parede que separa a fração dos espaços de circulação comuns

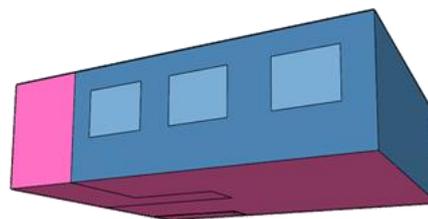


Figura 3.9- Condições de fronteira pra a fachada NE, pavimento e parede adjacente á fração vizinha

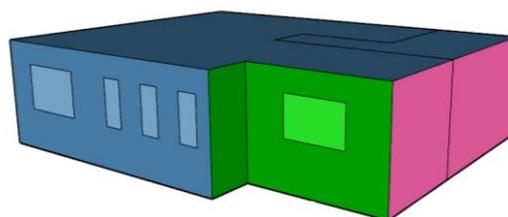


Figura 3.10- Condições de fronteira para as paredes que separam duas zonas térmica térmicas diferentes

Para caracterizar as soluções construtivas da envolvente da fração assumiu-se os padrões construtivos observados nos anos 70 para a cobertura e pavimento de separação das frações e, para a parede exterior e para a parede que separa espaços não úteis de úteis, assumiram-se soluções construtivas em função da espessura das mesmas. Também se recorreu ao catálogo ITE50 do LNEC (Santos & Matias, 2006) que integra na sua constituição soluções construtivas pré-definidas e tabelas para caracterizar as propriedades dos materiais dos elementos construtivos. As características dos vãos envidraçados são facilmente observadas e foram caracterizados pelo mesmo catálogo.

No EnergyPlus, os diferentes materiais presentes nas soluções construtivas e as suas propriedades, como a condutibilidade térmica, [λ ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)], e a espessura [e (m)], são inseridos no campo *Materials*. As propriedades e os diferentes materiais podem ser observados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4- -Propriedades e respetiva espessura dos material que constituem as soluções construtivas da fração em estudo (Santos & Matias, 2006)

Material Construtivo	Espessura [e (m)]	Condutibilidade Térmica, [λ ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)]	Resistência Térmica, R_t ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C W}^{-1}$)
Reboco Interior de Gesso	0,02	0,57	-
Reboco Tradicional	0,01	1,30	-

Tijolo 19	0,19	-	0,52
Tijolo 22	0,22	-	0,52
Laje de Betão	0,20	2,30	-
Argamassa de Regularização	0,03 e 0,025	1,3	-
Lajetas	0,03	1,35	-
Membrana de Impermeabilização	0,025	0,23	-
Revestimento cerâmico	0,005	0,065	-

De seguida, com os materiais inseridos, as soluções construtivas são criadas no campo *Constructions*. Os materiais são inseridos camada a camada até se criar a solução construtiva. As diferentes soluções construtivas observadas na fração e inseridas no EnergyPlus são observáveis na Tabela 3.5.

Tabela 3.5- Soluções construtivas dos diferentes elementos de construção que constituem a fração em estudo

Elemento construtivo	Detalhe do elemento construtivo	U ($\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$)
Parede exterior	Reboco Tradicional + Tijolo 22 + Reboco Interior Tradicional	1,42
Parede interior	Reboco Tradicional + Tijolo 19 + Reboco Interior Tradicional	1,26
Pavimento interior	Reboco Interior de Gesso + Laje de Betão + Argamassa de Regularização + Revestimento Cerâmico	Envolvente adiabática
Cobertura exterior	Lajetas + Argamassa de Regularização + Membrana de Impermeabilização + Laje de Betão + Reboco Interior de Gesso	Ascendente: 2,26 Descendente: 1,95

As características dos vãos envidraçados são inseridas no campo *Window Material Simple Glazing System*. Trata-se de um vão constituído por um vidro simples incolor em caixilharia de alumínio e janela de correr, com um $U_w = 6,5$ ($\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$). Posteriormente, as janelas exteriores são caracterizadas quanto à presença de elementos de sombreamento, (persianas exteriores de cor branca), no campo *Window Property: Shading Control*.

Para a fração se aproximar o mais possível da realidade é importante ter em consideração a envolvente e a orientação desta, por causa da simulação dos sombreamentos. No campo

Building são inseridas características como o local onde se encontra a fração (neste caso, no interior de uma cidade) e a orientação do eixo norte em relação à orientação da fração. Ao preencher este sub-campo, é definida a orientação real da fração. O eixo norte encontra-se a 328°. Relativamente ao sombreamento existente que resulta na obstrução da luz solar, teve-se em conta que a fachada NE é fortemente sombreada pelo apartamento adjacente. Para inserir esta particularidade no EnergyPlus, no campo *Shading Buiding Detailed* cria-se um elemento que simbolize o apartamento adjacente através da inserção das coordenadas relativas dos vértices do mesmo. Quando se importa o ficheiro .IDF para o SketchUp, é possível observar o elemento que foi criado (conforme se ilustra na Figura 3.11), e se está de acordo com a realidade.

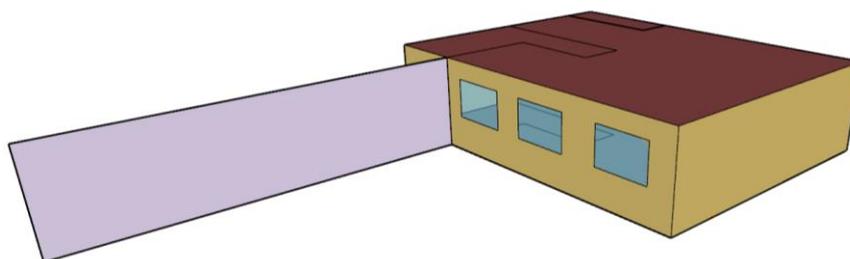


Figura 3.11- Elemento construtivo representativo do apartamento adjacente para que, durante a simulação, o sombreamento presente na fachada NE seja tido em consideração.

Para definir as zonas térmicas, a zona térmica dos espaços úteis, ou seja, os espaços onde o conforto térmico é um fator relevante, foi caracterizada quanto à presença de equipamentos elétricos, luzes e tipo de ocupação. A renovação do ar que surge devido às janelas existentes também foi tida em conta para esta zona e a ventilação proveniente da exaustão.

3.3 Cenários estudados

Além de se realizar o estudo com base no cálculo sazonal e no cálculo dinâmico horário para uma situação de referência, ou seja, quando a fração apresenta características que a aproximam da realidade, estudou-se, como medida de melhoria, de que forma é que a presença de isolamento influencia o desempenho energético da fração e outras grandezas relacionadas, no cálculo sazonal e dinâmico.

Assim, às soluções construtivas anteriormente definidas para as paredes exteriores e para a cobertura exterior, acrescentou-se material isolante. Optou-se por Poliestireno Extrudido, XPS, com uma condutibilidade térmica, λ , igual a $0,037 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Para estudar o impacto da espessura de XPS na envolvente exterior, realizou-se um incremento de 2 em 2 cm até se alcançar uma espessura de 12 cm. Na Tabela 3.6, é possível observar o valor do coeficiente de

transmissão térmica, U ($\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$), para a parede exterior e cobertura exterior, para as diferentes espessuras de material isolante

Tabela 3.6-Diferentes valores para o coeficiente de transmissão térmica U ($\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$) em função da espessura do material isolante, em XPS

Espessura (m)	Coeficiente de Transmissão Térmica U ($\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$)		
	Parede Exterior	Cobertura Exterior	
		Fluxo de calor ascendente	Fluxo de calor descendente
0,02	0,803	1,018	0,950
0,04	0,560	0,656	0,628
0,06	0,430	0,485	0,469
0,08	0,349	0,384	0,374
0,10	0,293	0,318	0,311
0,12	0,253	0,271	0,266

Os valores destes coeficientes são particularmente importantes para a análise em regime sazonal, uma vez que, este parâmetro é usado diretamente no cálculo, sendo assim possível avaliar-se o impacto do reforço do isolamento no balanço energético. Já na análise dinâmica horária, no programa de simulação, as características do material isolante são inseridas no campo *materials*, e é criada uma nova solução construtiva, no campo *Constructions*, que contenha a presença de isolamento. Para estudar o impacto da sua espessura, basta alterá-la nas propriedades do material. Esses dados são depois utilizados no modelo de transferência de calor dinâmico.

A posição do isolamento nas soluções construtivas em contacto com o exterior também foi tida em consideração, e o seu impacto foi estudado em regime sazonal e dinâmico. Assim, analisaram-se quatro cenários diferentes:

- Caso 1: Cobertura com isolamento sob a laje e parede isolada pelo interior;
- Caso 2: Cobertura com isolamento sobre a laje e parede isolada pelo exterior;
- Caso 3: Cobertura com isolamento sobre a laje e parede isolada pelo interior;
- Caso 4: Cobertura com isolamento sob a laje e parede isolada pelo exterior.

Para ilustrar cada caso de estudo, na Figura 3.12 é esquematizada, de forma muito simplificada, a posição do isolamento térmico, (a azul), na envolvente exterior da fração.

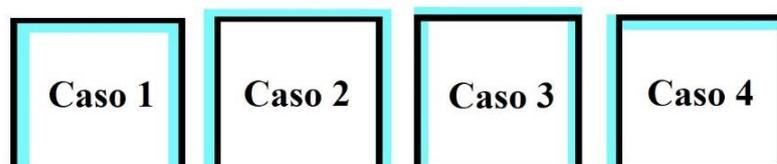


Figura 3.12- Representação dos diferentes casos estudados, em função da posição de isolamento térmico, a azul, na envolvente opaca exterior da fração.

Em regime Sazonal, para se estudar a influência da posição do isolamento na envolvente exterior, foi necessário assumir que a presença de isolamento e a sua localização influenciam diretamente o valor do coeficiente de transmissão térmica linear, Ψ ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) associada às PTL. Assim, o valor para este coeficiente foi alterado para os diferentes casos, de acordo com a Tabela 3.7, recorrendo-se a valores tabelados presentes no Despacho nº 6476-H/2021. Em regime dinâmico, como a metodologia para avaliar o efeito das pontes térmicas na envolvente revela ser muito complexa, o seu efeito foi negligenciado. Assim, apenas se alterou a sua localização na *layer* onde se insere, no campo *Constructions*, para as diferentes soluções construtivas.

Tabela 3.7-Valores para o coeficiente de transmissão térmica linear Ψ ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), para a análise em regime sazonal, obtidos a partir de valores tabelados presentes do Despacho nº 6476-H/2021 (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021)

Tipo de ligação	Coeficiente de transmissão térmica linear Ψ ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Fachada com pavimento de nível intermédio	0,60	0,15	0,60	0,15
Fachada com cobertura	0,10	0,80	1,00	0,70
Fachada com caixilharia	0,25	0,25	0,25	0,25
Zona de caixa de estores	0,30	0,30	0,30	0,30
Duas paredes verticais em ângulo saliente	0,10	0,40	0,10	0,40

Assim, no cálculo que segue uma metodologia sazonal, para a situação de referência e para os diferentes casos com soluções construtivas isoladas, analisaram-se as seguintes grandezas:

- Necessidades nominais de energia útil de aquecimento, N_{ic} ($\text{kWh m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$)
- Necessidades nominais de energia útil de arrefecimento, N_{vc} ($\text{kWh m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$)
- $Q_{tr,i}$ (KWh), a transferência de calor por transmissão, que traduz a quantidade de energia útil perdida pela envolvente opaca e envidraçada
- H_{ext} ($\text{W }^\circ\text{C}^{-1}$), que traduz a transferência de calor através dos elementos da envolvente em contacto com o exterior

Para avaliar o desempenho energético da fração em estudo na simulação dinâmica, para a situação de referência e para as diferentes situações que consideram a presença de isolamento térmico, o EnergyPlus fornece diversos outputs para analisar a transferência de energia entre ambientes. Selecionaram-se os seguintes quatro outputs para se estudar, com maior detalhe, a transferência de energia entre o interior e exterior da construção:

- *Zone Ideal Loads Zone Total Heating Energy and Cooling Energy (Joules)* – Descreve, em regime dinâmico, as necessidades totais de aquecimento e arrefecimento. Posteriormente, o valor devolvido pelo programa foi convertido para quilowatt-hora (kWh) por metro quadrado (m^2) de área útil para ser possível estabelecer uma comparação entre as necessidades energéticas obtidas em regime sazonal.
- *Surface Inside Face Temperature ($^{\circ}C$)* – Corresponde à temperatura da face interna de uma superfície. (Software, n.d.)
- *Surface Inside Face Convection Heat Transfer Coefficient ($W.m^{-2} ^{\circ}C^{-1}$)* – Corresponde ao coeficiente que descreve a transferência convectiva de calor da superfície no interior da face. Esta variável estabelece o valor global da transferência de energia entre a parede e o ambiente interior. (Software, n.d.)
- *Surface Inside Face Conduction Heat Loss Rate (W)* – Descreve a taxa de perda calor por condução diretamente no interior da face de uma superfície opaca. Um valor positivo significa que a condução ocorre no interior da face interna em direção à face interior. Um valor negativo significa que a condução é da face interna para o núcleo da superfície. Esta variável interliga os diferentes ambientes através de trocas de energia nas soluções construtivas, sendo a média das taxas entre a face interna e externa de uma superfície. (Software, n.d.)

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Avaliação do desempenho energético da fração através da metodologia sazonal

Neste subcapítulo é apresentada uma discussão relativa às grandezas estudadas para avaliar o desempenho energético da fração em estudo, de acordo com a legislação atualmente em vigor em Portugal, que utiliza um método sazonal. Como foi referido anteriormente, foi utilizada uma folha de cálculo que incorpora todas as regras e metodologias de cálculo, presentes na atual legislação. Entre elas, a metodologia para a determinação da classe energética para edifícios de habitação, (R_{Nt}), definida no Despacho nº 6476-H/2021, determinada pelo rácio das necessidades nominais anuais de energia primária, [N_{tc} (kWh m⁻².ano⁻¹)], e o valor limite regulamentar para as necessidades nominais anuais de energia primária [N_t (kWh m⁻².ano⁻¹)]. A classe energética da fração é então definida de acordo com uma escala de classificação energética, composta por 8 classes, de A+ a F (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2021). Assim, na Tabela 4.1, é apresentada a classe energética da fração em estudo, utilizando os valores de U (W m⁻² °C⁻¹) por defeito e os calculados no EnergyPlus (diferentes devido aos parâmetros utilizados pelo software). Para ambas, a classe energética é Classe E, o que indica o fraco desempenho energético da fração. Esta classe justifica-se pela fraca envolvente, opaca e envidraçada, e pelo facto de se localizar no último andar de um edifício. A cobertura encontra-se em contacto com o ar exterior, o que implica uma maior percentagem de ganhos e perdas de calor, em comparação com uma fração intermédia. O fraco desempenho também é devido aos equipamentos de baixa eficiência.

Tabela 4.1- Necessidades nominais anuais de energia primária (N_{tc}), e de referência (N_t) e classe energética para a fração em estudo, utilizando U (W m⁻² °C⁻¹) por defeito e calculados através do EnergyPlus

	Valores para U (W m ⁻² °C ⁻¹) por defeito	Valores para U (W m ⁻² °C ⁻¹)do Energyplus
N_{tc} (kWh/m ² .ano)	426,70	418,02
N_t (kWh/m ² .ano)	176,59	176,59
R_{Nt}	2,42	2,37
Classe Energética	E	

Ao aumentar a espessura de isolamento térmico nas soluções construtivas da envolvente opaca, melhor é o desempenho energético da fração e, por sua vez, menor é o rácio entre as necessidades anuais de energia primária e o valor de referência, o que implica uma melhoria da classe energética. No estudo realizado para a fração, a classe energética C foi a melhor que se atingiu ao colocar-se isolamento térmico. Como o foco do trabalho estava na envolvente opaca,

registre-se que não se alteraram os vãos envidraçados, não se ficando a conhecer o impacto desta medida de melhoria.

A colocação de maiores espessuras de isolamento térmico permite reduzir as necessidades nominais de energia para aquecimento. A Figura 4.1 representa as necessidades para aquecimento na fração, obtidas através da metodologia sazonal, quando a envolvente exterior não possui isolamento térmico, (utilizando valores de U ($W m^{-2} °C^{-1}$) por defeito e do EnergyPlus), e quando se coloca e altera a espessura de isolamento térmico, em função das várias posições estudadas. É importante relembrar que, quando se alterou a espessura e posição de isolamento térmico, teve de se avaliar o impacto nas pontes térmicas lineares. Desta forma, da análise das necessidades para aquecimento obtidas em regime sazonal, para os diferentes cenários, estabeleceram-se as seguintes conclusões:

- Para todas as grandezas que foram alvo de uma avaliação mais detalhada, na situação de referência, quando se utilizaram valores de U ($W m^{-2} °C^{-1}$) por defeito, os valores foram mais elevados, em comparação com os valores calculados pelo EnergyPlus. Quando se utilizou valores por defeito, as necessidades para a fração foram superiores em $3,16 kWh m^{-2}ano^{-1}$.
- Para todas as espessuras de isolamento, as necessidades para aquecimento foram inferiores quando a parede se encontrava isolada pelo interior e na cobertura o isolamento estava sob a laje, (caso 1), e superiores quando a cobertura apresentava o isolamento sobre a laje e parede isolada pelo interior (caso 3).
- Para o caso 1, a partir dos 10 cm, as necessidades para aquecimento foram inferiores às necessidades para aquecimento de referência regulamentares. No caso 3, tal nunca se verifica. Para os casos 2 e 4, as necessidades foram inferiores às necessidades de referência regulamentares a partir de uma espessura de 12 cm de isolamento.
- A diferença das necessidades para aquecimento registadas entre o caso 3 e o caso 1 diferiram, em média, para todas as diferentes espessuras, $9,50 kWh m^{-2} ano^{-1}$. A diferença entre estes dois casos é a localização do material isolante na cobertura.
- Mantendo o isolamento sob a laje de cobertura - casos 1 e 4, as necessidades diferem, em média, $2,20 kWh m^{-2} ano^{-1}$. Estes casos distinguem-se pela forma como a parede exterior é isolada.
- Quando o isolamento se encontra sobre a laje - casos 2 e 3, as necessidades para aquecimento diferem, em média, $6,20 kWh m^{-2} ano^{-1}$. Como a diferença entre casos é superior, conclui-se que, quando a cobertura apresenta o isolamento sobre a laje, a posição de isolamento nas paredes apresenta um maior impacto no valor das necessidades, do que quando se localiza sob a laje.

- Em relação à fração real, colocar isolamento térmico nas soluções reduziu as necessidades para aquecimento em 44%, 42%, 37% e 43%, para os casos 1 a 4, respetivamente.

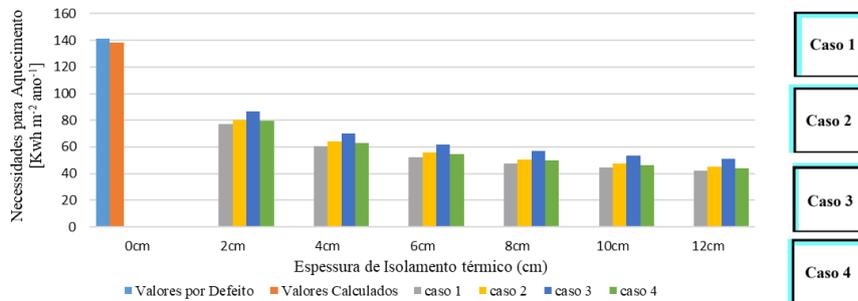


Figura 4.1- Necessidades nominais de energia útil para aquecimento na fração, obtidas através da metodologia sazonal, quando se varia espessura e posição do isolamento

Como explicado no subcapítulo 3.1.1, as necessidades para aquecimento são influenciadas por inúmeros parâmetros, nomeadamente, pela transferência de calor por transmissão através da envolvente do edifício na estação de aquecimento, $Q_{tr,i}$ (KWh). Este, traduz a quantidade de energia útil perdida pela envolvente opaca e envidraçada. Por sua vez, este parâmetro é influenciado pelo coeficiente global de transferência de calor por transmissão, $H_{tr,i}$ ($W\ ^\circ C^{-1}$), que depende do coeficiente H_{ext} ($W\ ^\circ C^{-1}$), que contabiliza a transferência de calor através dos elementos da envolvente em contacto com o exterior, envidraçada e opaca. A Figura 4.2 e a Figura 4.3 representam, respetivamente, o $Q_{tr,i}$ (KWh) e o H_{ext} ($W\ ^\circ C^{-1}$), registados para os vários níveis de isolamento. Da análise destes parâmetros, estabeleceu-se algumas conclusões:

- Como seria de esperar, o desenvolvimento destas grandezas é semelhante ao desenvolvimento das necessidades para aquecimento, uma vez que estão diretamente dependentes. Estas diminuem com o aumento da espessura de isolamento térmico e são superiores quando o isolamento se encontra no envelope de acordo com o caso 3 e inferiores de acordo com o caso 1.
- Colocar isolamento térmico na envolvente de acordo com o caso 1 ao caso 4, respetivamente, diminuiu a transferência de calor por transmissão, $Q_{tr,i}$ (KWh), em 41%, em 39%, em 34% e em 40%, em relação aos valores registados para a situação de referência, utilizando valores de U ($W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$) calculados. Isto acontece, pois, quando se coloca isolamento térmico, existe uma redução no parâmetro que contabiliza a transferência de calor através dos elementos da envolvente exterior, o H_{ext} ($W\ ^\circ C^{-1}$), (Figura 4.3). A transferência de calor pela envolvente em contacto com o exterior, depende diretamente do valor de U ($W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$). Assim, conforme se aumenta a espessura de isolamento, o coeficiente U ($W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$), diminui, assim como o valor de H_{ext} ($W\ ^\circ C^{-1}$).
- Na fração com as características próximas do real, a cobertura é responsável por 48% da transferência de calor pela envolvente em contacto com o exterior, ou seja, representa quase

metade do valor total de H_{ext} ($W\ ^\circ C^{-1}$). As paredes exteriores representam 29%, os envidraçados 8% e, cerca de 16% da perda de calor deve-se à existência de pontes térmicas. Através destas proporções, em relação ao valor total da transferência de calor, reconhece-se a importância de investir em obras de reabilitação na cobertura, uma vez que esta é responsável pela existência de elevadas perdas. A existência de pontes térmicas também não pode ser negligenciada. Além de estarem associadas à presença de patologias, também representam uma percentagem significativa nas perdas térmicas.

- Ao se colocar isolamento térmico nas soluções construtivas, casos 1 a 4, o valor de H_{ext} ($W\ ^\circ C^{-1}$) reduziu-se, respetivamente, 46%, 43%, 38% e 44%, em relação ao valor registado na situação de referência.
- A transferência de calor através destes elementos depende da espessura de isolamento, com impacto no U ($W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$). E, além disso, a posição do isolamento nas soluções, tem impacto no coeficiente de transmissão térmica linear, Ψ ($W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$). De facto, para uma mesma espessura, o valor de H_{ext} ($W\ ^\circ C^{-1}$) apenas difere devido à parcela relacionada com as PTL.
- Assim, concluiu-se que o caso 3 apresenta sempre valores mais elevados devido ao coeficiente de transmissão térmica linear, Ψ ($W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$) ser sempre mais elevado em relação ao coeficiente registado para os outros casos, relacionado com posições distintas. Por exemplo, para o caso 3, para uma espessura de 2 cm, a existência de ponte térmicas representa 26% do valor de H_{ext} ($W\ ^\circ C^{-1}$), enquanto que, caso 1 apenas representa 16%. Contudo, para todos as diferentes posições, conforme se aumenta a espessura de isolamento nas paredes exteriores e cobertura, a perda de calor através destes elementos diminui.

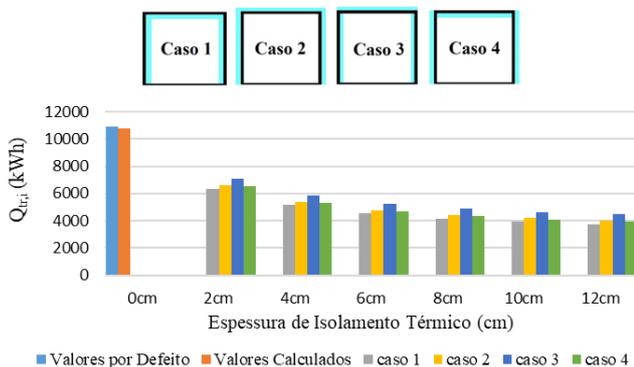


Figura 4.2- Transferência de calor por transmissão através da envolvente na estação de aquecimento, $Q_{tr,i}$ (kWh), quando se varia espessura e localização do isolamento

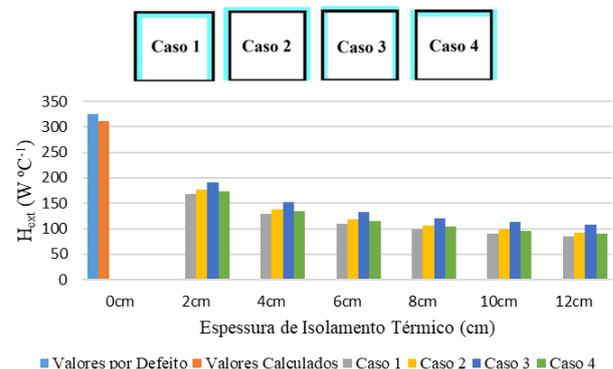


Figura 4.3- Coeficiente de transferência de calor por transmissão através de elementos da envolvente em contacto com o exterior, H_{ext} ($W\ ^\circ C^{-1}$), quando se varia espessura e localização do isolamento

A Figura 4.4 representa as necessidades nominais de energia útil para arrefecimento na fração, obtidas através da metodologia sazonal, quando esta apresenta soluções construtivas em

contacto com o exterior, isentas de isolamento térmico (utilizando valores de U ($W m^{-2} °C^{-1}$) por defeito e calculados no EnergyPlus), e quando se coloca e altera espessura e posição do isolamento. Dos resultados obtidos, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- Em comparação com as necessidades para aquecimento, embora as necessidades para arrefecimento também diminuam com o aumento da espessura, a colocação de maiores níveis de isolamento térmico tem um impacto menos significativo. A posição do isolamento tem respostas opostas às descritas anteriormente (estação de aquecimento). De facto, as necessidades para arrefecimento são inferiores quando o isolamento se encontra sobre a laje, (caso 2 e caso 3) e superiores quando se encontra sob a laje (caso 1 e caso 3).
- Quando se utilizou valores por defeito, as necessidades para a fração foram superiores em $0,94 kWh m^{-2} ano^{-1}$.
- Colocar isolamento reduziu as necessidades em 17% para o caso 1, em 21% para o caso 2, em 27% para o caso 3 e em 19% para o caso 4, em relação à solução de referência (sem isolamento). Para uma espessura de 12 cm de isolamento, as necessidades reduziram em 37%, em 41%, em 47%, e em 39%, para os casos 1 a 4, respetivamente. Em relação ao valor regulamentar, este já era respeitado a partir de uma espessura de 2 cm de isolamento, para todas as posições de isolamento nas soluções construtivas, exceto para o caso 1. Para o caso 1, o limite não é ultrapassado a partir de uma espessura de 4 cm de material isolante.

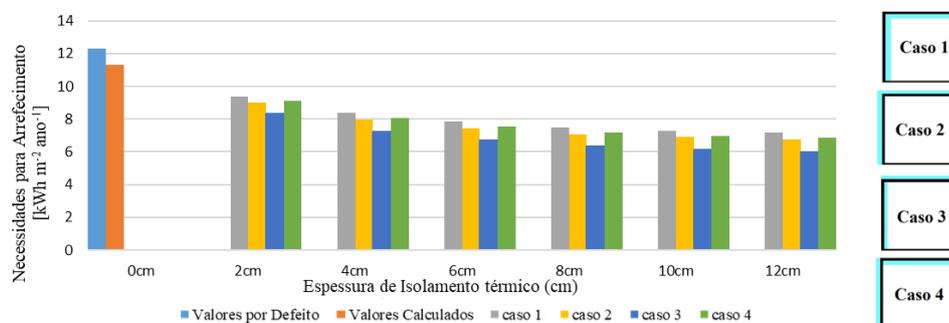


Figura 4.4- Necessidades nominais de energia útil para arrefecimento na fração, obtidas através da metodologia sazonal, quando se varia espessura e posição do isolamento

4.2 Avaliação do desempenho energético da fração através de uma Metodologia Dinâmica Horária

Com o objetivo de avaliar o impacto da simulação dinâmica, determinaram-se as necessidades de aquecimento e arrefecimento, e compararam-se com as necessidades obtidas com o método sazonal. Os resultados do método dinâmico encontram-se na subsecção 4.2.1. A discussão da comparação destes resultados encontra-se na seção 4.3

Relativamente à simulação dinâmica, optou-se ainda por analisar um conjunto de grandezas para os diferentes elementos da envolvente opaca exterior da fração em estudo, com intuito de responder a questões, tais como: (1) Como se desenvolvem as grandezas nos meses que, em média, registaram as temperaturas exteriores mínimas e máximas do ano; (2) Como se desenvolvem as grandezas nos dias que, em média, foram considerados o mais quente e o mais frio do ano; (3) Nos dias e meses críticos do ano, qual o impacto da orientação da envolvente nos valores registados; e, (4) Qual o impacto da colocação e alteração da espessura e posição do isolamento no desenvolvimento das grandezas. As grandezas estudadas foram apresentadas na secção 3.3.

Desta forma, para avaliar o desempenho energético da fração e perceber de que forma as grandezas se devolvem, a partir do ficheiro climático para a cidade de Coimbra (.EPW), averiguou-se quais os meses que apresentam uma temperatura média mensal mais elevada e menor. Através de médias diárias de temperatura, também se apurou qual o dia mais frio e mais quente do ano. Assim, seguindo esta abordagem, concluiu-se que:

- O mês que registou uma temperatura média exterior inferior foi o mês de janeiro.
- O mês de agosto registou a temperatura média mais elevada. Neste mês, também se inseriu o dia mais quente do ano, (10 de agosto).
- Embora o mês de janeiro tenha sido o mês mais frio, o dia que registou a temperatura média inferior foi o dia 1 de março. Assim, o desenvolvimento das variáveis em março também foi avaliado.

Para ter como referência dias e meses intermédios, escolheu-se o mês de outubro, para ser representativo da estação intermédia. Assim, a Tabela 4.2 expõe as temperaturas médias exteriores dos meses onde as grandezas foram estudadas, bem como, dos dias mais frios e quentes de cada mês.

Tabela 4.2- Temperaturas médias exteriores dos meses e dias onde o comportamento das grandezas foi estudado

Mês	Temperatura média exterior (°C)		
	Mês	Dia mais frio	Dia mais quente
janeiro	9,59 °C	5,40 °C	13,87 °C
março	12,72 °C	Dia mais frio do ano: 3,78 °C	19,43 °C
agosto	21,27 °C	16,38 °C	Dia mais quente do ano: 29,27 °C
outubro	16,90 °C	21,31 °C	12,91 °C

4.2.1 Necessidades totais de aquecimento e arrefecimento ($kWh\ m^{-2}$)

Neste subcapítulo é apresentada uma discussão de resultados relativamente às necessidades energéticas (*Zone Ideal Loads - Total Heating Energy and Cooling Energy*) para aquecimento e arrefecimento para a fração com características próximas do real e em função das diferentes espessuras de isolamento, obtidas através da simulação dinâmica horária. Os resultados são apresentados em kWh em função da área da zona térmica considerada como útil. Desta forma, além se avaliar o desenvolvimento das necessidades energéticas para a fração em regime dinâmico, também se estudou o impacto de se aplicar um método dinâmico para averiguar de que forma é que as necessidades variam com a alteração da envolvente opaca exterior, nomeadamente, pela aplicação de isolamento térmico.

Para avaliar de que forma é que as necessidades para aquecimento variavam em cada mês, realizou-se o somatório dos resultados adquiridos na simulação dinâmica horária, obtendo assim, as necessidades para aquecimento mensais. Deste modo, foi possível averiguar de forma mais direta, quais os meses que carecem de maiores necessidades para aquecimento. Desta forma, a Figura 4.5 demonstra de que forma é que as necessidades energéticas para aquecimento, registadas para o espaço útil da fração em estudo, variam para os diferentes meses do ano. Como seria de esperar, nos meses que registaram as temperaturas médias exteriores inferiores, as necessidades para aquecimento, por metro quadrado de área útil, foram superiores, nomeadamente, no mês de janeiro e dezembro. A partir de abril, as necessidades para aquecimento diminuíram significativamente, sendo que, do mês de maio a setembro registaram-se necessidades de aquecimento nulas.

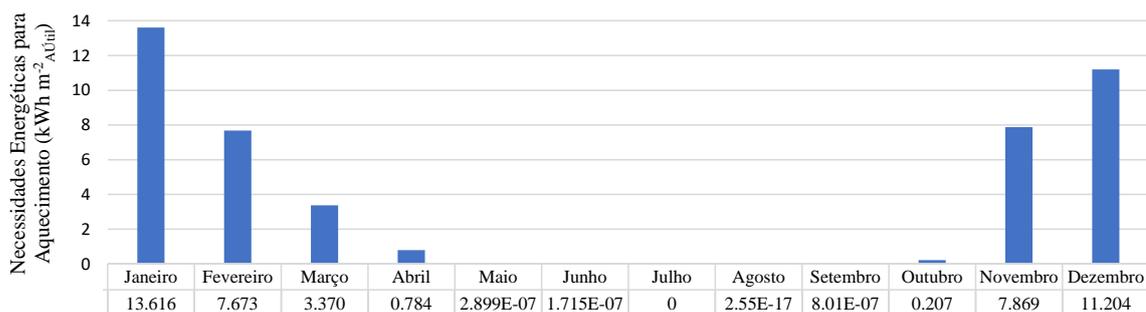


Figura 4.5-Necessidades energéticas para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para os diferentes meses do ano

Seguindo a mesma metodologia, Figura 4.6 demonstra o impacto nas necessidades energéticas para aquecimento, por mês, ao se colocar isolamento térmico nas soluções construtivas das paredes exteriores e cobertura, e ao alterar-se a sua espessura. Os meses apresentados, (janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro), foram aqueles que, na situação de referência, assinalaram, por metro quadrado de área útil, necessidades energéticas superiores. Assim, pela

análise dos resultados, foi possível estabelecer algumas conclusões relativas à variação das necessidades energéticas mensais para aquecimento, em função da espessura de isolamento, obtidas através da metodologia dinâmica, nomeadamente:

- Quanto maior for a espessura de isolamento térmico nas soluções construtivas em contacto com o exterior, menor são as necessidades energéticas para aquecimento.
- Em janeiro, (mês onde as necessidades para foram superiores), a colocação de isolamento térmico com 2 cm de espessura, reduziu em 56% as necessidades energéticas, em relação à situação de referência. Com 12 cm de espessura, as necessidades são quase nulas, com uma redução de 94% no seu valor.
- Em dezembro, a magnitude das reduções foi semelhante a janeiro.
- Em fevereiro, a colocação de isolamento nas soluções construtivas tem um maior impacto em relação aos restantes meses em análise. Para uma espessura de 2 cm de isolamento, as necessidades energéticas reduziram 67% em relação às necessidades registadas na situação de referência. A partir de uma espessura de 10 cm de material isolante, assistiu-se a uma redução de 99%, logo, registaram-se valores próximos de zero. Nomeadamente, a partir de uma espessura de isolamento igual a 6 cm, o mês de fevereiro registou necessidades para aquecimento inferiores ao mês de março.
- Para espessuras de isolamento mais elevadas, as necessidades energéticas para aquecimento diferem menos para os diferentes meses. Ou seja, para soluções construtivas bem isoladas, as necessidades energéticas para aquecimento, por metro quadrado de área útil, variam menos ao longo do ano.

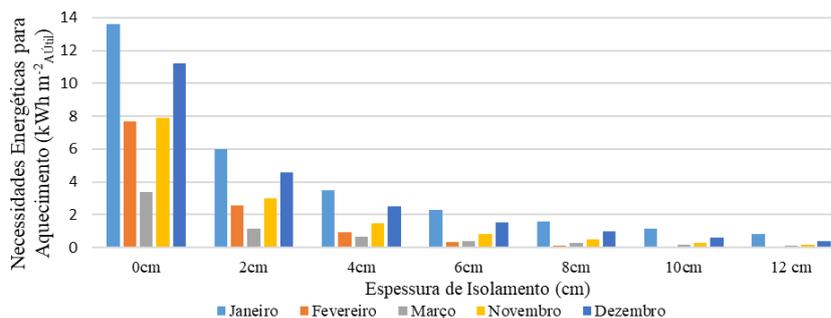


Figura 4.6- Necessidades energéticas para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico

Para avaliar a influência da posição do isolamento no valor das necessidades energéticas para aquecimento em regime dinâmico, seguiu-se a mesma metodologia. Assim, a Figura 4.7 representa o valor das necessidades mensais, para as diferentes posições de isolamento térmico na EOE, quando esta apresenta 2 cm de isolamento. Assim, concluiu-se que:

- No mês de janeiro, as necessidades para aquecimento mensais foram superiores quando as soluções construtivas se encontravam isoladas de acordo com o caso 2, ou seja, a cobertura com isolamento sobre a laje e as paredes isoladas pelo exterior. As necessidades menores foram para o caso 1, com a cobertura e paredes isoladas pelo interior. A diferença entre estes casos foi de cerca de $0,28 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil.mês}^{-1}}$. Esta tendência é também registada noutros meses da estação de aquecimento.
- Já no mês de março, as necessidades foram superiores quando o material isolante se encontrava nas soluções construtivas de acordo com o caso 3, (paredes exteriores isoladas pelo interior e cobertura isolada sobre a laje), e apresentaram ser inferiores quando se encontravam de acordo com o caso 4, (paredes isoladas pelo exteriores e isolamento na cobertura localizado sob a laje). Contudo, as necessidades registadas para estas posições, apenas diferiram entre si, cerca de $0,06 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil.mês}^{-1}}$.
- No mês de novembro, as necessidades para aquecimento foram superiores quando as soluções se encontravam isoladas de acordo com o caso 1 e inferiores quando se apresentavam de acordo com o caso 2, diferindo entre si $0,09 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil.mês}^{-1}}$.

Esta abordagem foi utilizada para todas as espessuras de isolamento, com o intuito de avaliar o desenvolvimento das necessidades em função das diferentes espessuras e posições de isolamento na envolvente. Assim, concluiu-se que:

- A partir de uma espessura de 6 cm de isolamento, os meses de fevereiro, março, novembro e dezembro, registaram necessidades para aquecimento inferiores quando o isolamento térmico se localiza nas soluções construtivas de acordo com o caso 2, e necessidades para aquecimento superiores para o caso 1. Em janeiro, o mesmo só aconteceu a partir de uma espessura de isolamento igual a 10 cm.
- Assim, para uma espessura de isolamento de 10 cm, conforme se ilustra na Figura 4.8, todos os meses em análise, registaram necessidades para aquecimento inferiores quando a cobertura se encontrava isolada sobre a laje e as paredes isoladas pelo exterior (caso 2). E registaram necessidades mensais superiores quando as paredes estavam isoladas pelo interior e a cobertura isolada sob a laje (caso 1). Estes dois casos registaram diferença de $0,17 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil.mês}^{-1}}$ para janeiro e de $0,16 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil.mês}^{-1}}$ para novembro e dezembro. Para fevereiro e março, a diferença foi menos pronunciada, cerca de $0,03 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil.mês}^{-1}}$ e $0,06 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil.mês}^{-1}}$, respetivamente.
- Pela figura, também se concluiu que as necessidades para aquecimento registadas em fevereiro são inferiores às necessidades registadas no mês de março, mesmo que a temperatura média mensal do mês de fevereiro seja inferior à do mês de março.

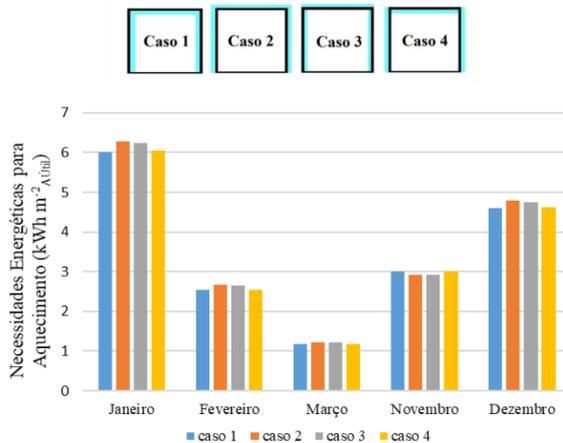


Figura 4.7- Necessidades energéticas mensais para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, em função das diferentes posições de 2 cm isolamento térmico

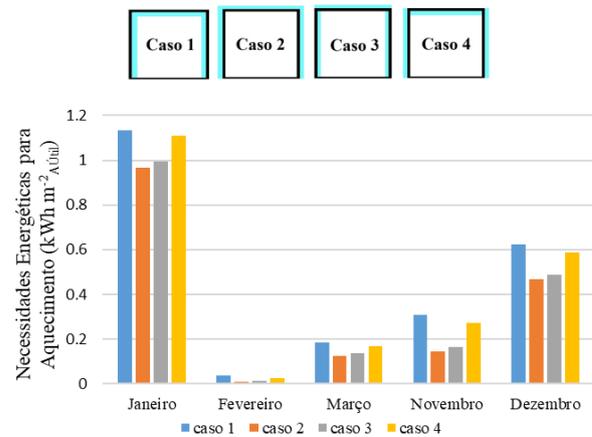


Figura 4.8- Necessidades energéticas mensais para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, em função das diferentes posições de 10 cm isolamento térmico

Uma das vantagens de estudar uma grandeza através da simulação dinâmica horária, consiste na possibilidade de se observarem resultados horários ou diários. Assim, como o mês de janeiro apresentou o valor mais elevado para as necessidades energéticas para aquecimento, estudou-se este mês em maior detalhe.

A primeira abordagem foi efetuar a análise com base em médias diárias. Deste modo, para o mês de janeiro, avaliou-se o desenvolvimento das necessidades para aquecimento, por dia para todas as situações (ver Figura 4.9). Assim, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- Na situação de referência (sem isolamento), embora o dia 19 de janeiro tenha registado as temperaturas médias exteriores inferiores, as necessidades energéticas diárias para aquecimento foram superiores no 7º dia do mês, em $0,07 \text{ kWh.m}^{-2} \text{ A}_{\text{útil}}.\text{dia}^{-1}$, comparativamente ao dia mais frio. As necessidades mais reduzidas foram registadas no dia mais quente do mês de janeiro, o dia 30, registando uma diferença de $0,66 \text{ kWh.m}^{-2} \text{ A}_{\text{útil}}.\text{dia}^{-1}$ em relação às necessidades registadas no dia 7.
- Quando se coloca isolamento térmico e se altera a espessura deste, as necessidades energéticas para aquecimento variaram de forma semelhante à situação de referência, com valores mais reduzidos quanto maior for a espessura deste.
- Neste mês, colocar isolamento com 2 cm de espessura nas soluções construtivas em contacto com o exterior, reduziu as necessidades médias para aquecimento em 56%.
- Quanto maior for a espessura do material isolante menor é o impacto. Por exemplo, numa solução construtiva com 4 cm de isolamento, houve um decréscimo de 42% em relação às necessidades médias registadas para uma espessura de 2 cm de isolamento. Esse decréscimo é inferior para espessuras superiores, sendo de 26%, quando se

compara as necessidades médias para aquecimento registadas para uma espessura de isolamento de 12 cm, em relação a uma espessura de 10 cm.

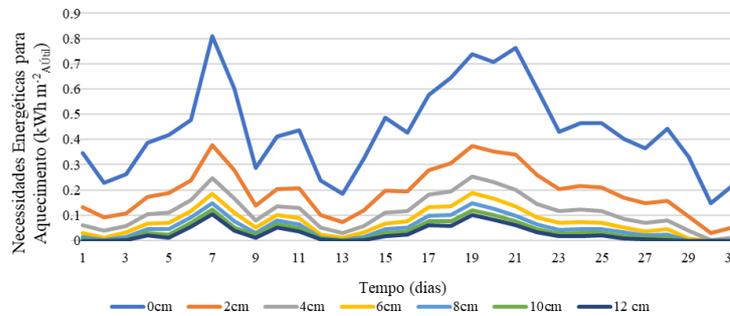


Figura 4.9- Necessidades energéticas para aquecimento diárias, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para o mês de janeiro, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico na envolvente exterior

Com base nas necessidades energéticas horárias, analisou-se de que forma é que estas variavam para dias característicos em função do isolamento, nomeadamente no dia mais frio de janeiro e no dia onde se registaram as necessidades diárias para aquecimento superiores, o dia 7 de janeiro. Foi possível obter as seguintes conclusões:

- No dia mais frio de janeiro, observou-se na Figura 4.10 que, entre as 10 horas e as 16 horas, as necessidades para aquecimento registaram valores nulos, mesmo na situação de referência, onde não existe qualquer material isolante, provavelmente devido aos ganhos solares. Contudo, nas primeiras e últimas horas do dia, quando as temperaturas exteriores são inferiores, existe uma diferença pronunciada entre as soluções isoladas e as soluções não isoladas. É de notar que, para espessuras de isolamento mais elevadas, embora as necessidades sejam próximas do zero, nas horas de menor calor, nunca são nulas. Neste dia, a colocação de isolamento térmico nas soluções construtivas reduziu as necessidades diárias em 49%.
- No dia 7 de janeiro, dia que registou as necessidades diárias para aquecimento superiores, as necessidades apenas foram nulas a partir de uma espessura de isolamento igual a 10 cm, entre as 15 horas e as 16 horas, conforme se pode visualizar na Figura 4.11. Neste dia, a colocação de isolamento térmico nas soluções construtivas reduziu as necessidades diárias em 53%.
- Comparando o desenvolvimento das necessidades para aquecimento registadas nestes dois dias, embora as necessidades médias diárias para a fração de referência tenham sido superiores no dia 7 de janeiro, no dia mais frio foi atingido o valor mais elevado para as necessidades, pelas 17 horas. Este foi superior em $0,011 \text{ kWh m}^{-2} \text{ A}_{\text{útil}}$, em relação às necessidades máximas atingidas no dia 7.

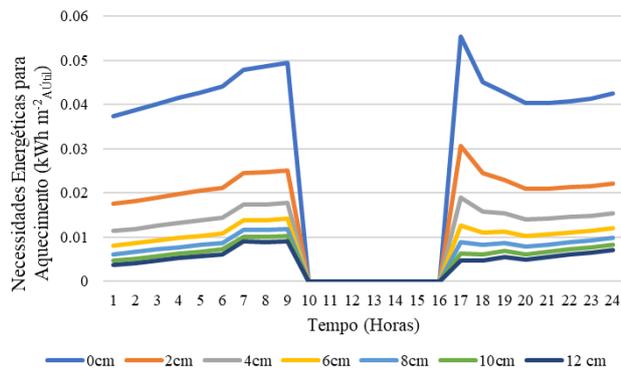


Figura 4.10- Necessidades energéticas horárias para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para o dia mais frio de janeiro, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico

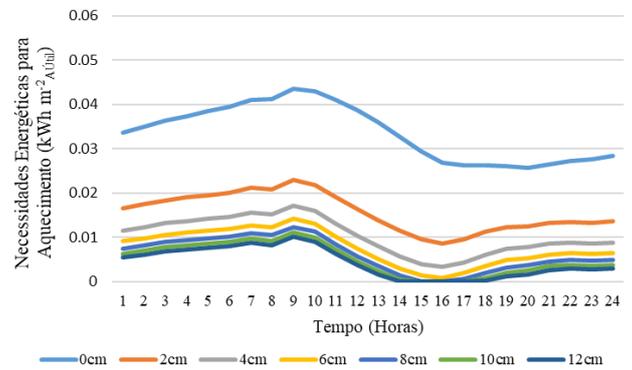


Figura 4.11- Necessidades energéticas horárias para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para o dia 7 de janeiro, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico

Seguindo a mesma metodologia, analisou-se para os mesmos dias, como é que as necessidades para aquecimento variaram, por hora, em função das diferentes posições de isolamento térmico na envolvente. Assim, da análise do desenvolvimento da variável em função das posições de isolamento térmico, no dia mais frio de janeiro e no dia 7 de janeiro, foi possível obter as seguintes conclusões:

- Relativamente ao desenvolvimento das necessidades energéticas para aquecimento em função da posição do material, concluiu-se anteriormente que, para o mês de janeiro, quando o isolamento térmico apresenta uma espessura igual a 2 cm, as necessidades mensais para aquecimento foram superiores no caso 2, (parede isolada pelo exterior e cobertura com isolamento sobre a laje). E, para uma espessura de 12 cm de isolamento, verificou-se o contrário. As necessidades mensais foram inferiores no caso 2 e superiores no caso 1. Contudo, para estes dias, verificou-se que, para todas as espessuras de isolamento, as necessidades registaram valores médios superiores para o caso 1 e inferiores para o caso 2. O desenvolvimento das necessidades energéticas para aquecimento em função da posição do material isolante nas soluções construtivas em contacto com o exterior, no dia mais frio e no dia 7 de janeiro, pode ser observado na Figura 4.12 e Figura 4.13, respetivamente.
- No dia mais frio de janeiro, os valores das necessidades energéticas para aquecimento, para as diferentes posições de isolamento, apresentaram diferenças mais pronunciadas quanto maior era a espessura de isolamento. O mesmo se verificou no dia 7 de janeiro. Contudo, neste dia, para a mesma espessura de isolamento, a diferença entre as necessidades registadas para casos que apresentavam posições de isolamento na cobertura diferentes, foi mais acentuada do que no dia mais frio. Por exemplo, para uma espessura de 12 cm, a diferença entre as necessidades diárias registadas para o caso 1 e para caso 2, foi de $0,06 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \text{ A}_{\text{útil}} \cdot \text{dia}^{-1}$ e de $0,01 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \text{ A}_{\text{útil}} \cdot \text{dia}^{-1}$ no dia 7 de janeiro

e no dia mais frio, respetivamente. Assim, a posição de isolamento na cobertura, apresentou uma maior influencia no dia 7 de janeiro.

- Nos dois dias, para diferentes posições de isolamento térmico na envolvente, as necessidades registaram um desenvolvimento semelhante. Contudo, observou-se uma semelhança no valor das necessidades registadas entre casos, de acordo com a posição de isolamento na cobertura. Assim, concluiu-se que, a posição do isolamento térmico na cobertura é a que tem uma maior influencia no valor das necessidades energéticas para aquecimento, uma vez que, na envolvente opaca exterior, a cobertura tem grande impacto nas perdas de calor da fração.

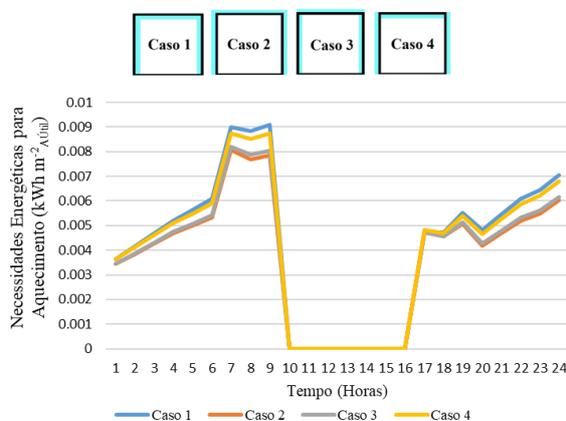


Figura 4.12- Necessidades energéticas para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para o dia mais frio de janeiro, em função das diferentes posições de isolamento térmico

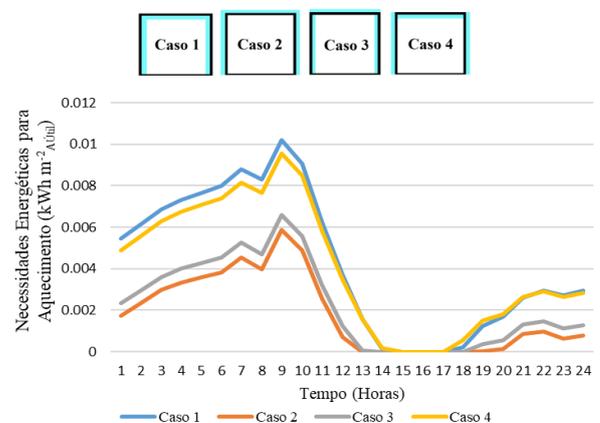


Figura 4.13- Necessidades energéticas para aquecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para o dia 7 de janeiro, em função das diferentes posições de isolamento térmico

Para avaliar de que forma é que as necessidades energéticas para arrefecimento variavam em cada mês, repetiu-se a metodologia usada para avaliar as necessidades para aquecimento, onde se realizou o somatório dos resultados adquiridos na simulação dinâmica horária, obtendo assim, as necessidades para arrefecimento com uma base mensal. Assim, a Figura 4.14 demonstra de que forma é que as necessidades, no espaço útil da fração em estudo, variam para os diferentes meses do ano. Como seria de esperar, nos meses que registaram as temperaturas medias exteriores superiores, as necessidades para arrefecimento, por metro quadrado de área útil, são superiores, nomeadamente, nos meses de junho a setembro. Neste caso, embora a temperatura exterior média tenha sido superior em agosto, as necessidades energéticas médias foram superiores em julho.

O mês de abril registou as menores necessidades energéticas de arrefecimento. Embora nenhum mês tenha registado valores nulos, de janeiro a maio e de outubro a dezembro, as necessidades para arrefecimento foram muito próximas de zero.

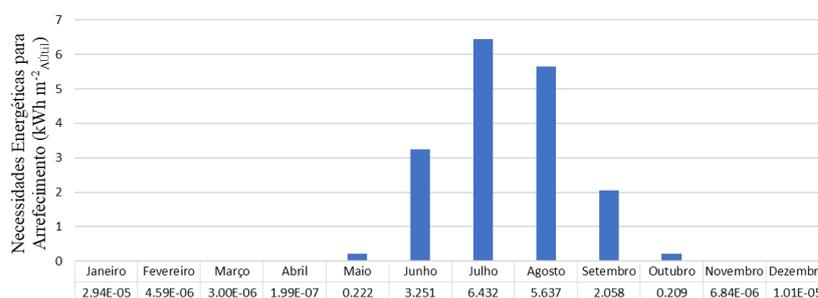


Figura 4.14- Necessidades energéticas para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para os diferentes meses do ano

Seguindo a mesma abordagem, a Figura 4.15 representa o impacto da colocação de isolamento térmico nas soluções construtivas das paredes exteriores e cobertura, nas necessidades energéticas para arrefecimento. Conclui-se que:

- Ao contrário do que se observou nas necessidades energéticas para aquecimento, a colocação de isolamento nas soluções construtivas aumenta as necessidades energéticas para arrefecimento nas estações de arrefecimento.
- É importante salientar que, a alteração da espessura do material isolante não apresentou tanto impacto nas necessidades de arrefecimento, quando comparado com o impacto evidenciado no valor das necessidades para aquecimento.
- Em junho verificou-se que, o aumento da espessura do isolamento aumentou o valor das necessidades. Colocar isolamento térmico nas soluções em contacto com o exterior aumentou as necessidades em 19%. Para uma espessura igual a 12 cm, registou-se um aumento de 26% no valor das necessidades de arrefecimento na fração, em relação à situação de referência.
- No mês de setembro, as necessidades também aumentaram quando se colocou isolamento térmico e se aumentou sua espessura. Para uma espessura de isolamento igual a 12 cm, as necessidades para arrefecimento aumentaram 65%.
- Para os meses de julho e agosto, a colocação de isolamento diminuiu o valor das necessidades para arrefecimento em 8% e em 0,89%. Contudo, o aumento da espessura, provocou um incremento no valor da variável.
- Em julho, esse incremento nunca ultrapassou o valor das necessidades para arrefecimento registadas na fração de referência. De facto, para uma espessura de isolamento igual a 12 cm, as necessidades registadas para a fração são 6% inferiores às necessidades registadas na situação de referência.
- Em agosto, para uma espessura igual a 4 cm, já se verificaram necessidades para arrefecimento superiores às necessidades registadas na situação de referência, em 2%. Para

uma espessura de isolamento de 12 cm, as necessidades de arrefecimento na fração aumentaram 9% em relação à situação com 2 cm.

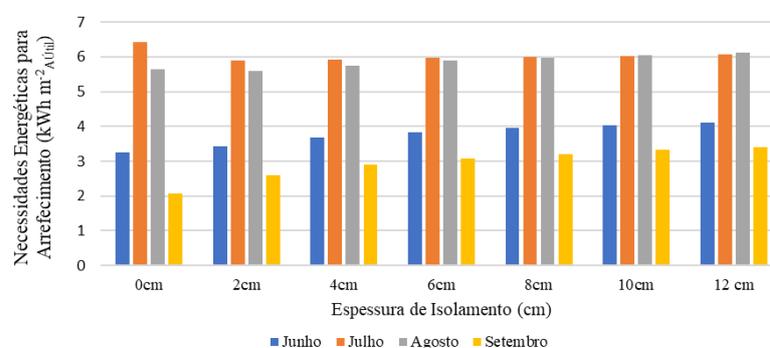


Figura 4.15-Necessidades energéticas para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para junho, julho, agosto e setembro, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico.

A Figura 4.16 mostra os valores das necessidades para as diferentes posições do material isolante (diferentes casos), com 2 cm de espessura, para os meses que registaram necessidades de arrefecimento mais elevadas. Assim, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- As necessidades energéticas para arrefecimento, para todos os meses e diferentes espessuras, quando o isolamento se encontrava localizado de acordo com o caso 1, (parede isolada pelo interior e na cobertura e isolamento está sob a laje), as necessidades atingiram um maior valor. Estas foram menores quando o isolamento se encontrava na envolvente de acordo com o caso 2, (parede isolada pelo exterior e isolamento sobre a laje na cobertura).
- No mês de junho, observou-se que a partir de uma espessura de 6 cm de isolamento, as necessidades foram superiores quando o isolamento se localizava nas soluções de acordo com o caso 4.
- Para uma espessura de 2 cm isolamento, a diferença dos valores registados entre as necessidades do caso 1 e do caso 2 (valores máximos e mínimos registados), foi de $0,46 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Aútil.mês}^{-1}}$, $0,38 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Aútil.mês}^{-1}}$, $0,52 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Aútil.mês}^{-1}}$ e $0,37 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Aútil.mês}^{-1}}$, de junho a setembro, respetivamente.
- Ao aumentar as espessuras, apesar de se aumentarem as necessidades, a diferença entre os valores registados para as diferentes posições de isolamento é menos acentuada. Para uma espessura de isolamento igual a 12 cm nas soluções construtivas, para os meses de julho, agosto e setembro, a diferença entre as necessidades registadas no caso 1 e no caso 2, diminuiu, respetivamente, $0,09 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Aútil.mês}^{-1}}$, $0,16 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Aútil.mês}^{-1}}$ e $0,07 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Aútil.mês}^{-1}}$. Em junho, a diferença das necessidades registadas para as posições de isolamento de acordo com o caso 4 e o caso 2 (valor máximo e mínimo para 12 cm de espessura), diminuiu $0,06 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Aútil.mês}^{-1}}$.

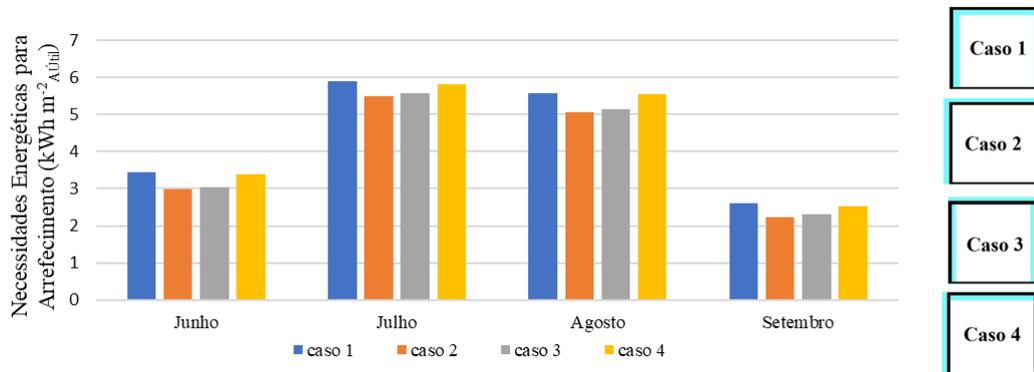


Figura 4.16- Necessidades energéticas mensais para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, para junho, julho, agosto e setembro, em função das diferentes posições de 2 cm isolamento térmico

Analisando agora a evolução diária das necessidades, optou-se por observar o mês de julho, que apresenta as maiores necessidades energéticas e o mês de agosto, com a maior temperatura média exterior. Assim, a Figura 4.17 e a Figura 4.18 apresentam, respetivamente, o desenvolvimento das necessidades energéticas para arrefecimento, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico. Conclui-se que:

- Em julho, embora as necessidades diárias para arrefecimento aumentem com a espessura de isolamento, o valor destas raramente ultrapassa o valor registado na fração próxima do real.
- Em agosto registou-se que, em determinados dias, se verifica que as necessidades energéticas para arrefecimento diminuem com o aumento da espessura do isolamento, nomeadamente no dia 10 de agosto, que corresponde ao dia mais quente do ano.
- Para as diferentes posições de isolamento, concluiu-se que, para ambos os meses, as necessidades energéticas diárias para arrefecimento foram, maioritariamente, influenciadas pela posição de isolamento na cobertura, uma vez que esta é a principal responsável pelos ganhos existentes na envolvente opaca.
- Para os casos que apresentam a cobertura isolada de forma igual, embora os valores continuem muito próximos, quando as paredes estão isoladas pelo exterior, as necessidades diárias registadas são ligeiramente inferiores.

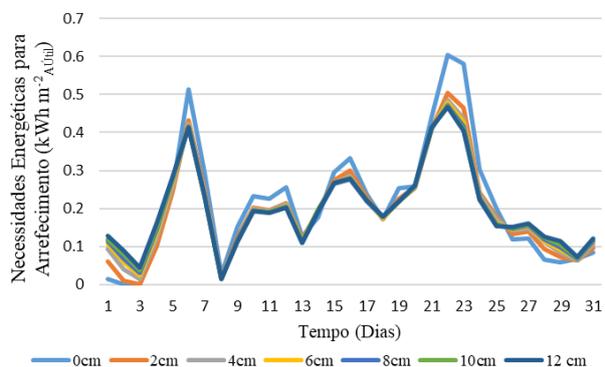


Figura 4.17- Necessidades energéticas para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, no mês de julho, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico

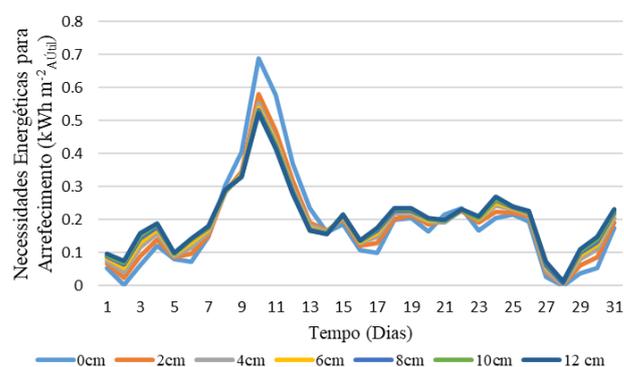


Figura 4.18- Necessidades energéticas para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, no mês de agosto, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico

Quanto à evolução horária das necessidades, analisou-se o dia 22 de julho e o dia mais quente de agosto e do ano. Assim, a Figura 4.19 e a Figura 4.20 representam, para estes dois dias, o desenvolvimento das necessidades energéticas para arrefecimento, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico, tendo-se concluído que:

- Em quase todas as horas destes dois dias, o aumento da espessura de isolamento diminui as necessidades energéticas para arrefecimento. De facto, para uma espessura de isolamento igual a 12 cm, as necessidades diárias reduziram 23% e 24%, para 22 de julho e 10 de agosto, respetivamente, em relação às necessidades registadas para o mesmo dia na fração de referência
- No dia 22 de julho, as necessidades foram nulas quando a fração apresentava soluções isoladas, entre as 5 horas e 8 horas. Entre as 9 horas e as 13 horas, o valor das necessidades foi maior para espessuras mais elevadas de isolamento. Neste intervalo, para soluções construtivas com 12 cm de isolamento, verificou-se um ligeiro aumento de 7% no valor das necessidades, em relação às necessidades registadas para a fração isenta de isolamento.
- No dia 10 de agosto, embora corresponda ao dia mais quente do ano, as necessidades para arrefecimento registadas na fração, para todas as diferentes soluções construtivas, foram nulas entre as 9 horas e as 15 horas, atingindo o valor mais elevado às 16 horas. Contudo, para todas as horas em que se registaram valores, aumentar o isolamento teve um impacto positivo no valor das necessidades para arrefecimento. Estas reduziram.

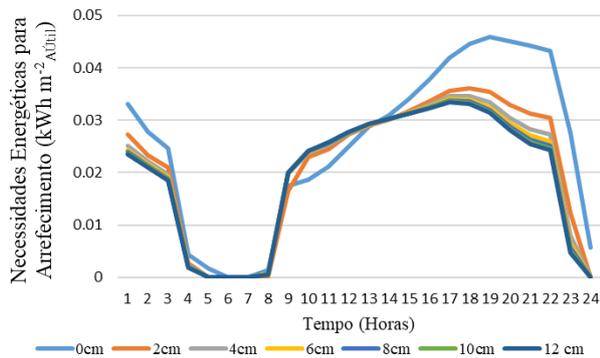


Figura 4.19- Necessidades energéticas horárias para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, que registou as maiores necessidades para arrefecimento, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico

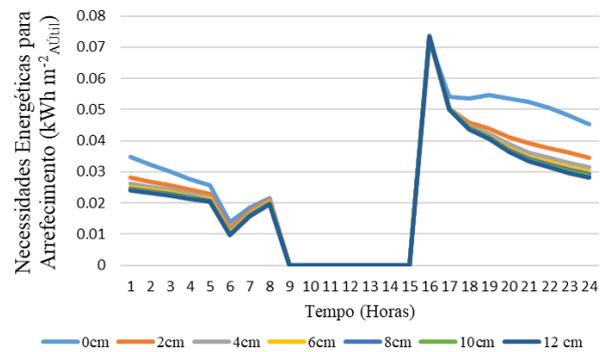


Figura 4.20- Necessidades energéticas horárias para arrefecimento, por metro quadrado de área útil da fração em estudo, no dia mais quente do ano, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico

4.2.2 Temperatura superficial interior (°C)

Uma das maiores vantagens em se realizarem simulações dinâmicas é o facto do programa permitir estudar o comportamento das variáveis, como por exemplo a evolução horária das temperaturas, em função da orientação das envolventes, ao contrário da análise sazonal, que agrega os elementos construtivos. Através de uma simulação horária existe a possibilidade de converter os resultados para uma base diária ou mensal. Assim, com base na simulação dinâmica horária da fração em estudo, a grandeza referente à temperatura da face interna (*Surface Inside Face Temperature*) foi estudada para as componentes opacas em contacto com o ar exterior, nomeadamente as paredes e a cobertura que constituem a zona térmica (espaços úteis da fração).

Para apurar o comportamento da variável na fração com as características mais próximas do real, a Figura 4.21 representa a variação da temperatura média diária da face interna das paredes e cobertura exterior, durante um ano, tendo para efeitos comparativos, a possibilidade de se avaliarem as temperaturas médias diárias do ar exterior. Nos meses mais frios, a parede orientada a SO apresentou as maiores temperaturas e a cobertura as menores. Contudo, a meio do ano, durante a estação de arrefecimento, as temperaturas são mais semelhantes entre si, embora a cobertura registre os valores mais elevados. Comparativamente às temperaturas exteriores, as temperaturas da face interna são sempre superiores. Note-se que a envolvente tem vários períodos com temperaturas abaixo dos 15 °C e chegam-se a atingir os 30 °C nalguns momentos.

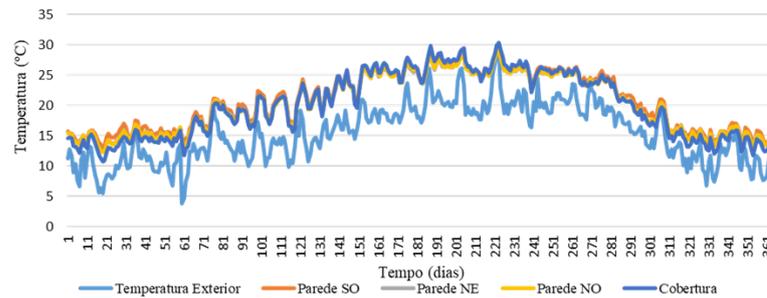


Figura 4.21- Temperaturas média diárias das faces internas das paredes e coberturas, ao longo do ano.

A Figura 4.22 representa o desenvolvimento da temperatura média horária da face interna para as diferentes componentes da envolvente exterior e a variação da temperatura do ar exterior, para o mês que, em média, registou menor temperatura, janeiro. De um modo geral, a fachada orientada a SO apresenta valores superiores para a temperatura da face interna, seguido da fachada orientada a NE e NO (estas apresentam valores muito semelhantes). A cobertura registou os menores valores.

Registou-se, em média, uma diferença de, aproximadamente, $5,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre a temperatura média da face interna e a temperatura exterior na parede orientada a SO. Essa diferença decresce para $4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ para as restantes paredes em análise. Já a cobertura regista uma diferença média de $3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ com a temperatura exterior. No dia mais frio do mês, a fachada orientada a SO também registou valores superiores: em média, meio grau em relação ao valor registado para as restantes paredes e $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ de diferença em relação à temperatura média diária registada na face interna da cobertura. No intervalo de tempo entre as 11 horas e as 17 horas, horário onde existe maior radiação solar para um dia de inverno, concluiu-se que a diferença entre as temperaturas da face interna para as paredes com diferentes orientações diminui e a diferença entre a temperatura exterior também. Na cobertura, a diferença entre a temperatura exterior é quase nula. No mesmo intervalo, para o dia mais quente de janeiro, a temperatura exterior regista valores superiores à temperatura da face interna para os diferentes elementos da envolvente exterior em análise, sendo inferior nas primeiras e últimas horas do dia. Contudo, apresenta uma diferença menos acentuada quando comparada com as diferenças entre temperaturas assinaladas no dia mais frio do mês.

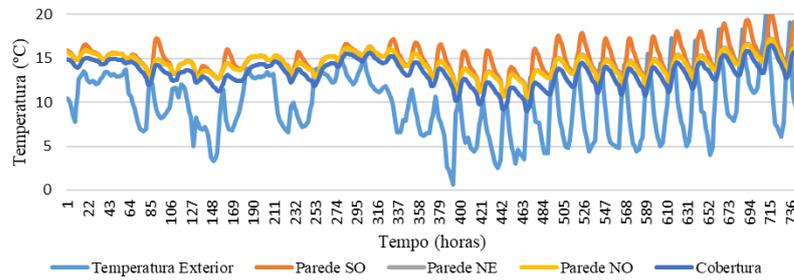


Figura 4.22- Temperatura média horária no mês de janeiro

Embora o mês de janeiro tenha, em média, a temperatura exterior mais baixa, o dia mais frio do ano, foi o dia 1 de março. Desta forma, a Figura 4.23 representa o desenvolvimento da temperatura média horária da face interna para as diferentes componentes da envolvente exterior e a variação da temperatura do ar exterior, para o mês de março. Durante este mês, a temperatura média horária da face interna da parede orientada a SO também foi superior às restantes. Em média, registou valores superiores em meio grau (como observado no mês de janeiro) e, em relação à cobertura de cerca de 1 °C. No dia mais frio do mês, a diferença média entre a temperatura da face interna e a temperatura do ar exterior, foi de aproximadamente 11 °C para a parede SO e de cerca de 10 °C para as restantes.

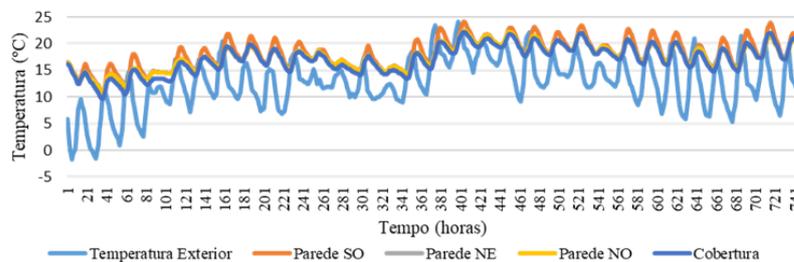


Figura 4.23- Temperatura média horária no mês de março

Um mês que também foi alvo de atenção foi o mês de agosto. Além de ser o mês que registou uma temperatura média exterior superior, também é o mês com o dia mais quente do ano. Assim, a Figura 4.24 apresenta a temperatura horária da face interna, para as diferentes componentes da envolvente, na situação de referência, e a temperatura do ar exterior. Neste mês, a variável apresenta valores bastante semelhantes para as diferentes componentes, embora registre valores ligeiramente maiores para a cobertura e parede orientada a SO. Em média, a diferença entre o valor da variável e a temperatura exterior é de 5,30 °C para a fachada SO e cobertura e de 4,75 °C para a parede orientada a NE e NO.

No dia mais quente, a temperatura exterior apresentou amplitudes de 10 °C (entre um mínimo de 23,70 °C e um máximo de 37,50 °C), enquanto que, as componentes construtivas registaram amplitudes entre 4 °C e 5 °C.

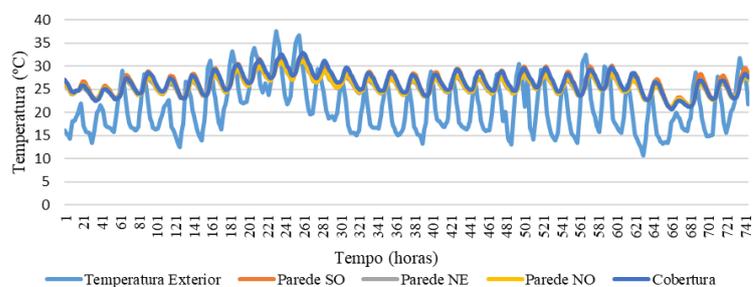


Figura 4.24- Temperatura média horária, no mês de agosto

Para se ter como referência o comportamento da grandeza um mês intermédio, optou-se pelo mês de outubro, no outono, onde a temperatura exterior é mais amena. Deste modo, a Figura 4.25 apresenta a temperatura média diária da face interna para as diferentes componentes da envolvente exterior. Mais uma vez, a variável apresenta um valor superior para a parede orientada a SO. Nos primeiros dez dias do mês, a variável, na cobertura, era superior quando comparada com as paredes orientadas a NE e NO. Contudo, conforme as temperaturas exteriores diminuíram, aproximadamente a partir do dia 10, a cobertura registou as menores temperaturas. Logo, associadas a temperaturas exteriores mais baixas, a temperatura da face interna na cobertura também é mais baixa.

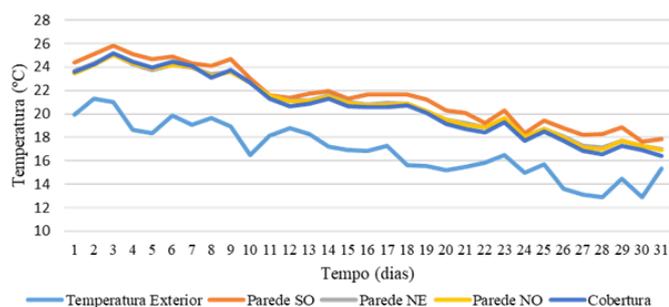


Figura 4.25- Temperatura média diária, no mês de outubro

De seguida, tendo como referência os mesmos dias e meses, estudou-se qual o impacto de se colocar e alterar a espessura de isolamento nas soluções construtivas em contacto com o exterior, com base numa metodologia dinâmica horária.

4.2.2.1 Avaliação do impacto da colocação de isolamento

Para se avaliar o impacto de se alterar a envolvente opaca exterior em regime dinâmico, realizaram-se diversas simulações dinâmicas horárias da fração em estudo, colocando e alterando a espessura de isolamento térmico nas soluções construtivas exteriores. Para se obter conclusões mais diretas, com os resultados obtidos, realizaram-se médias mensais e diárias, para os meses escolhidos para serem alvo de análise, e obtiveram-se as seguintes conclusões:

- Nos meses analisados, janeiro, março, agosto e outubro, a temperatura da face interna da EOE aumentou com o aumento da espessura de isolamento térmico. Contudo, em agosto, como se está na presença de um mês quente, aumentar a espessura de isolamento não apresentou tanto impacto como num mês da estação de aquecimento.
- Durante o mês de janeiro, o valor da variável foi superior para a fachada orientada a SO, para todas as diferentes espessuras de isolamento térmico. Contudo, quando se compara a parede SO com as restantes paredes, essa diferença diminui conforme se aumenta a espessura de isolamento. Por exemplo, para uma espessura igual a 2 cm, a parede SO registou uma temperatura média da face interna superior em 0,35 °C e 0,38 °C quando comparada com as paredes orientadas a NE e NO, respetivamente. Essa diferença decresceu com o aumento da espessura e, para 12 cm de isolamento, foi de 0,10 °C entre a parede NE e de 0,13 °C para a parede NO. Esta afirmação é visível na Figura 4.26, que representa, por hora, o desenvolvimento da variável para o mês de janeiro, quando as componentes da envolvente exterior apresentam uma espessura de isolamento de 2 cm e 12 cm.
- Para janeiro, em termos percentuais, aumentar a espessura de isolamento apresentou um maior impacto na temperatura média registada na face interna da cobertura. Comparando o valor da variável para uma solução construtiva isenta de isolamento, com uma solução com 12 cm de isolamento, existiu um incremento de 36% na temperatura da face interna na cobertura. Para a parede orientada a SO, o incremento foi de 23% e de 27% para as paredes orientadas a NE e NO.
- As conclusões obtidas para o mês de março foram bastante semelhantes às do mês de janeiro: o valor da variável foi superior na fachada orientada a SO, para todas as espessuras de isolamento. Contudo, essa diferença diminui conforme se aumentou a espessura de isolamento. Por exemplo, a parede SO, quando comparada com a parede NE e NO, registou uma temperatura superior em 0,31 °C e 0,36 °C, respetivamente. Essa diferença decresceu com o aumento da espessura e, para 12 cm de espessura, foi quase nula, entre 0,07 °C e 0,09 °C. Mais uma vez, aumentar a espessura de isolamento, em termos percentuais, teve maior impacto na cobertura, aproximadamente 32%, quando se passa da solução construtiva inicial, para 12cm de isolamento. Para a parede orientada a SO, o incremento foi de 26% e de 29% para as paredes orientadas a NE e NO.
- Em agosto, os valores registados para as temperaturas da face interna são muito próximos para diferentes espessuras de isolamento, registando-se diferenças inferiores a 4%, como se observa Figura 4.27, que representa, por hora, o desenvolvimento da variável para o mês de agosto, quando as componentes da envolvente exterior apresentam uma espessura de isolamento de 2 cm e 12 cm.

- Para o mês de outubro, quando a temperatura média exterior é mais elevada, (os primeiros dez dias do mês), a temperatura média diária da face interna, para as diferentes espessuras de isolamento, é mais próxima entre si. A partir do dia 11, quando a temperatura exterior começa a decrescer, já se verifica uma diferença mais acentuada entre o valor registado para as diferentes espessuras, como ilustra a Figura 4.28. Por exemplo, a parede orientada a SO, nos primeiros dez dias, a parede com 12 cm de isolamento apresenta uma temperatura média superior em 1,36 °C à não isolada. Contudo, a partir do dia 11, a diferença média sobe para 4,35 °C.

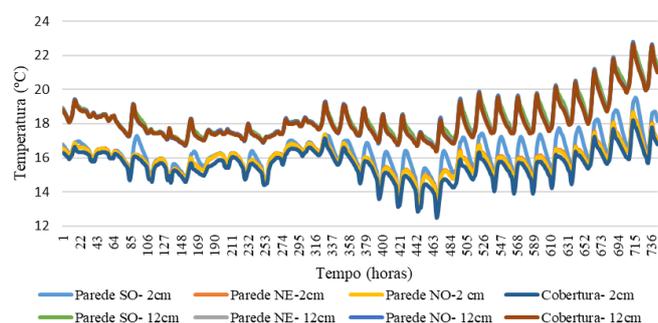


Figura 4.26- Comparação da temperatura média diária, no mês de janeiro, para uma espessura de isolamento igual a 2cm e 12 cm

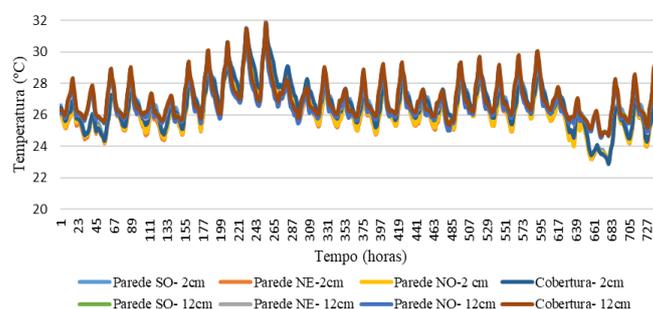


Figura 4.27- Comparação da temperatura média diária, no mês de agosto, para uma espessura de isolamento igual a 2cm e 12 cm

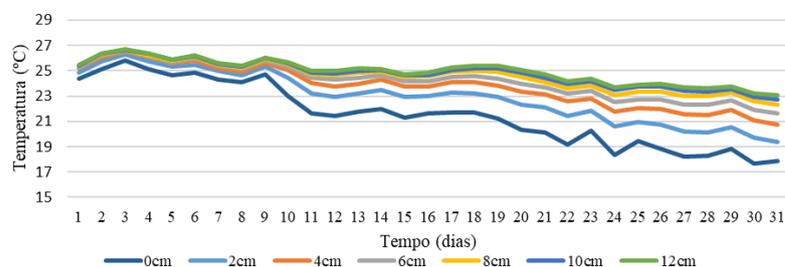


Figura 4.28- Temperatura média diária registada na parede orientada a SO, no mês de outubro, para as diferentes espessuras de isolamento térmico

Observando agora a temperatura da face interna nalguns dias característicos dos meses referidos anteriormente, obteve-se as seguintes conclusões:

- No dia mais frio do mês de janeiro, assiste-se a um aumento da temperatura superficial com o aumento da espessura de isolamento térmico, dos 3 °C aos 6,50 °C nas paredes e entre 5 °C a 8 °C na cobertura. A diferença ocorre no horário onde existe maior radiação solar.
- No dia mais frio do ano, ou seja, 1 de março, a temperatura da face interna registada na EOE também aumenta com o aumento da espessura de isolamento térmico. Na parede orientada a SO ao colocar-se 12 cm de isolamento passa-se dos 1,85°C (quando não se tem isolamento) para os 6,13°C. Na cobertura regista-se uma variação entre 3,35°C e 6,40°C.

De seguida, para os mesmos dias e meses, estudou-se o impacto das diferentes posições de isolamento nas soluções construtivas da EOE, com base numa metodologia dinâmica horária.

4.2.2.2 Avaliação da posição de isolamento térmico na EOE

Neste subcapítulo apresenta-se, de forma sumária, as conclusões relativas ao comportamento da temperatura da face interna, em regime dinâmico, em função das diferentes posições de isolamento nas paredes exteriores e cobertura, com base nas diferentes posições na envolvente, referidas nos casos presentes na secção 3.3. Relembrando:

- Caso 1: Cobertura com isolamento sob a laje e parede isolada pelo interior
- Caso 2: Cobertura com isolamento sobre a laje e parede isolada pelo exterior
- Caso 3: Cobertura com isolamento sobre a laje e parede isolada pelo interior
- Caso 4: Cobertura com isolamento sob a laje e parede isolada pelo exterior

Assim, através de médias mensais dos resultados obtidos da simulação dinâmica horária, concluiu-se que:

- Em janeiro, a temperatura média mensal da face interna de todos os elementos da EOE, até uma espessura de 6 cm de isolamento, foi superior no caso 1. Contudo, a partir de uma espessura de 8 cm, para a parede orientada a SO e cobertura, foi superior quando o isolamento térmico se encontrava de acordo com o caso 3. Para as paredes orientadas a NE e a NO, a temperatura média foi superior para o caso 2. Em todos os elementos da EOE, a temperatura registou valores inferiores para o caso 4.
- Em março, agosto e outubro, a temperatura média mensal da face interna de todas as componentes da EOE foi superior para o caso 1, e inferior para o caso 2, para todas as espessuras de isolamento.

Para os dias mais críticos de cada mês analisados, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- No dia mais frio do mês de janeiro, a temperatura média diária da face interna das paredes exteriores, foi inferior para o caso 1 e superior para o caso 2. Neste dia, nas primeiras e últimas horas do dia, a variável registou valores próximos para as diferentes posições de isolamento. Só no horário de maior radiação solar é que se verificou as maiores diferenças nos valores registados entre os casos. Os casos 1 e 4 (cobertura isolada sob a laje) registaram valores e um comportamento muito semelhantes, e os casos 2 e 3 (cobertura isolada sobre a laje) também. Desta forma, a temperatura registada na face interna da cobertura é independente da localização de isolamento nas paredes exteriores.
- No dia mais frio do ano, verificou-se que, para espessuras de isolamento mais elevadas, a temperatura registada para os diferentes casos ficava mais dispersa. Nas paredes, a temperatura da face interna apresentou maiores amplitudes quando o isolamento se

encontrava de acordo com os casos 1 e 3. Já na cobertura, as maiores amplitudes foram para os casos 1 e 4.

4.2.3 Transferência convectiva de calor na superfície interior ($W m^{-2} °C^{-1}$)

Nesta subsecção, é apresentada uma análise sobre o desenvolvimento do coeficiente de transferência convectiva de calor no interior da face (*Surface Inside Face Convection Heat Transfer Coefficient*), nas paredes em contacto com o ar exterior e na cobertura exterior. Para os meses escolhidos, também foi estudado, em regime dinâmico, qual o impacto de aumentar a espessura de isolamento e alterar a sua posição na envolvente no valor do coeficiente.

Para apurar o comportamento do coeficiente na fração com as características o mais próximas do real, a Figura 4.29 representa a variação do coeficiente médio diário de transferência de calor convectiva, no interior da face, das diferentes componentes opacas em contacto com o ar exterior, durante um ano. As primeiras conclusões que se retiram são os diferentes valores registados para o coeficiente em função da componente em contacto com o exterior e respetiva orientação. O coeficiente médio diário na face interior da cobertura, nos dias que correspondem a dias da estação de aquecimento, é superior relativamente às paredes exteriores. A meio do ano, ou seja, nos meses que correspondem à estação de arrefecimento, o valor do coeficiente na cobertura já é inferior. Relativamente às paredes exteriores, a parede orientada a SO aparenta ter valores inferiores para o coeficiente médio diário no início e fim do ano, ou seja, quando as temperaturas exteriores são inferiores.

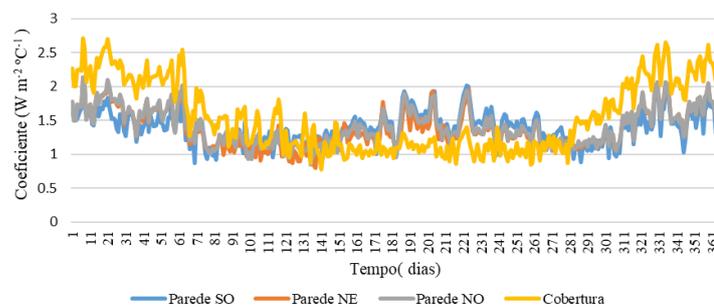


Figura 4.29- Coeficiente médio diário de transferência de calor convectiva no interior da face das paredes e coberturas, durante para ano

Com base na Figura 4.30, verifica-se que o coeficiente apresenta valores superiores para a cobertura e inferiores para a parede orientada a SO, no mês de janeiro. Ao se comparar o valor médio mensal do coeficiente de transferência de calor da cobertura com as outras componentes opacas exteriores, a cobertura regista um valor médio superior em $0,70 W m^{-2} °C^{-1}$ em relação ao valor médio registado na parede orientada a SO, e superior em $0,55 W m^{-2} °C^{-1}$, comparativamente às paredes orientadas a NE e a NO. Contudo, embora a cobertura tenha

valores superiores para o coeficiente, a parede orientada a NO apresenta uma maior amplitude entre o valor máximo e mínimo registrado, uma diferença de $2 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

No dia mais frio do mês, o coeficiente de transferência de calor também foi superior na cobertura, registrando um valor máximo de $2,44 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Para todas as componentes da envolvente opaca exterior, o coeficiente atinge o seu valor máximo pelas 9 horas da manhã. A partir dessa hora, entre as 10 horas e as 17 horas, verificou-se um decréscimo no valor do coeficiente, provavelmente associado às horas de exposição solar. Nesse intervalo, o valor mínimo do coeficiente é atingido, em todas as componentes, sendo inferior na parede orientada a SO, cerca de $0,60 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

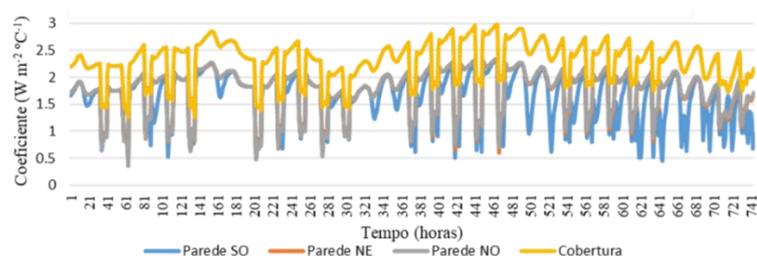


Figura 4.30- Coeficiente médio horário de transferência de calor convectiva no interior da face das paredes e coberturas, em janeiro

No mês de março, também se verificou a tendência registrada em janeiro, demonstrada na Figura 4.31. No dia mais frio do ano, o coeficiente apresentou um comportamento semelhante ao comportamento registrado no dia mais frio de janeiro. No mesmo intervalo de tempo, entre as 10 horas e as 17 horas, o coeficiente para as diferentes componentes da envolvente atingiu o seu valor mínimo. Embora o valor do coeficiente seja menor do que em janeiro, o coeficiente também apresentou um valor superior para a cobertura e inferior na parede orientada a SO.

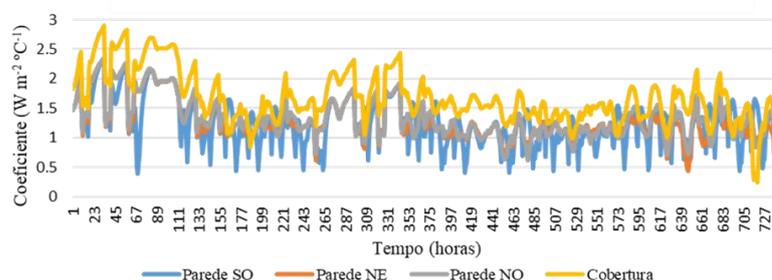


Figura 4.31- Coeficiente médio horário de transferência de calor convectiva no interior da face das paredes e coberturas, em março

Ao contrário do que se observou no mês de janeiro, em agosto o coeficiente de transferência de calor foi superior nas paredes exteriores e inferior na cobertura. Tal é observado na Figura 4.32,

que representa o desenvolvimento, por hora, do coeficiente de transferência de calor convectiva no interior da face da EOE. Neste mês, o coeficiente médio foi superior na parede SO, registrando um valor de $1,51 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Em comparação com o coeficiente médio registrado nas restantes componentes, foi superior em $0,14 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ em relação à parede orientada a NE, superior em $0,10 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ em relação à parede orientada a NO e superior em $0,40 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, comparativamente à cobertura. A maior amplitude, entre o valor máximo e mínimo do coeficiente, foi registada na parede SO, sendo uma diferença de $1,02 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. A cobertura registou a menor amplitude, cerca de $0,54 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

No dia mais quente do ano, nas primeiras e últimas horas do dia, o coeficiente registado na cobertura foi inferior, sendo superior na parede orientada a SO. Nas primeiras horas do dia, o coeficiente médio registado na parede SO foi superior em $0,75 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, em $0,11 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e em $0,08 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, em relação aos coeficientes médios registados na cobertura e nas paredes orientadas a NE e NO, respetivamente. Nas horas de maior radiação solar, verificou-se um aumento no valor do coeficiente para a cobertura e uma redução do seu valor nas paredes exteriores, principalmente na parede NE. Durante este intervalo a cobertura apresenta valores para o coeficiente médio superiores em $0,16 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, em relação às paredes orientadas a SO e a NO, e superior em $0,49 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ em relação à parede orientada a NE. Em comparação com o dia mais frio do mês, o coeficiente registado nas paredes exteriores foi superior no dia mais quente do mês. Na cobertura verificou-se o inverso. O coeficiente foi superior no dia com a temperatura média inferior.

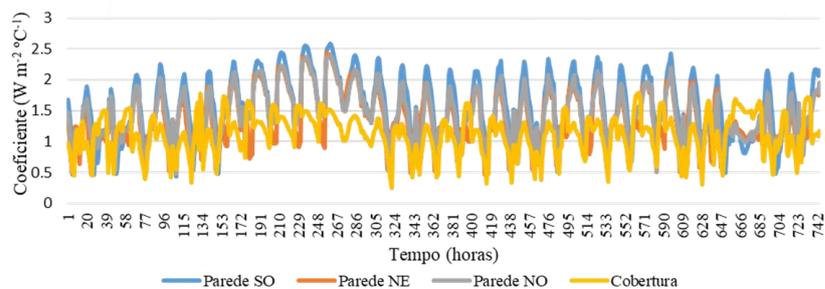


Figura 4.32- Coeficiente médio horário de transferência de calor convectiva no interior da face das paredes e coberturas, em agosto

Na Figura 4.33 apresenta-se o desenvolvimento do coeficiente médio diário no mês outubro na EOE. Nos primeiros dez dias do mês, quando a temperatura média exterior é mais elevada, o coeficiente médio diário foi superior no interior da face da parede orientada a SO, e inferior no interior da face da cobertura. A partir do décimo dia, quando se verificou um decréscimo da temperatura média exterior, verificou-se o oposto. Para o dia mais frio deste mês, confirmou-se que o valor do coeficiente foi superior no interior da face da cobertura. Neste dia, o coeficiente médio diário na cobertura, foi superior em $0,43 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ em relação aos coeficientes médios

registados nas paredes orientadas a SO e a NE, e superior em $0,40 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ comparativamente à parede orientada NO.

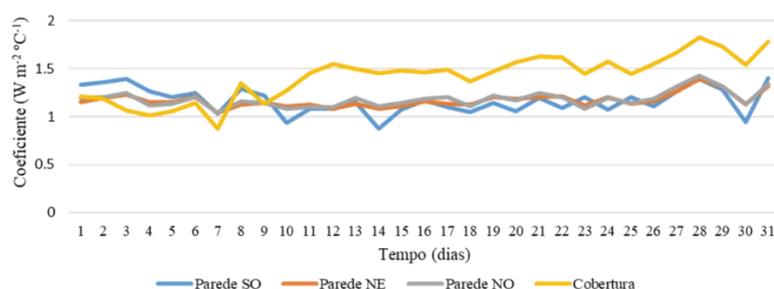


Figura 4.33- Coeficiente médio diário de transferência de calor convectiva no interior da face das paredes e coberturas, em outubro

4.2.3.1 Avaliação do impacto da colocação de isolamento

Nesta secção, estudou-se qual o impacto de se colocar isolamento térmico na envolvente opaca exterior e se alterar a sua espessura no valor do coeficiente de transferência de calor convectiva. Para tal, realizaram-se diversas simulações dinâmicas horárias da fração em estudo, alterando-se a espessura do material isolante. Para se obter conclusões mais diretas, com os resultados obtidos para o coeficiente, realizaram-se médias mensais, para os meses seleccionados para o estudo. Assim, obtiveram-se as seguintes conclusões.

- No mês de janeiro, em todas as componentes da EOE, o coeficiente médio reduziu-se com o aumento da espessura de isolamento térmico nas soluções construtivas. Essa redução foi mais visível na cobertura. Em termos percentuais, ao se comparar o valor médio do coeficiente obtido quando as soluções construtivas estão isentas de isolamento, com soluções com 12cm de isolamento, existiu um decréscimo de 45% para a parede orientada a SO, um decréscimo de, aproximadamente 50%, para as paredes orientadas a NE e a NO, e um decréscimo de 58% para a cobertura.
- No mês de março, até uma espessura de 6 cm, o coeficiente médio registado nas paredes exteriores diminuiu com o aumento da espessura de isolamento. Contudo, a partir de uma espessura de 8cm, aumentou com o aumento da espessura, o que evidencia o facto da variável ser de natureza muito variável. Contudo, mesmo que tenha existido um ligeiro incremento no valor médio do coeficiente, para soluções construtivas com 12 cm de isolamento, em relação ao valor registado nas soluções de referência, o coeficiente decresceu 27% na parede SO, 34% na parede NE e 36% na parede NO. Na cobertura, o coeficiente de transferência de calor convectiva diminuiu sempre com o aumento da espessura. Mais uma vez, aumentar a espessura de isolamento teve mais impacto na cobertura. Para soluções com 12 cm de isolamento, o coeficiente médio registado na cobertura decresceu 62%.
- No mês de agosto, comparativamente ao mês de janeiro, o valor médio do coeficiente registado nas paredes exteriores, não sofreu grandes diferenças com o aumento da espessura

de isolamento. Embora o coeficiente médio tenha sido superior nas paredes exteriores, a aplicação de isolamento teve maior impacto na cobertura. Em termos percentuais, em relação ao coeficiente médio registado para soluções isentas de isolamento, assistiu-se a um decréscimo de 15% no valor do coeficiente médio registado para soluções com 2 cm de isolamento. Nas paredes exteriores, esse decréscimo reduziu para 4%, 2% e 5% para as paredes orientadas a SO, NE e NO, respetivamente.

- No mês de outubro, também se observou que, colocar isolamento nas soluções construtivas, teve um maior impacto no valor médio do coeficiente na cobertura, onde se evidenciou um decréscimo de 23% no seu valor. Nas paredes exteriores, o coeficiente apresentou desenvolvimentos diferentes em função do aumento da espessura de isolamento. Mesmo assim, o coeficiente médio registado nas paredes, para todas as espessuras, foi inferior ao coeficiente registado na solução de referência. Em relação ao valor médio de referência, a parede que apresentou um decréscimo mais pronunciado foi a parede orientada a NO, onde, a variável reduziu um máximo de 25%, para soluções com 8 cm de isolamento. De seguida, a parede orientada a NE, para 6cm de material isolante, registou um decréscimo máximo de 24%. Já a parede SO registou um decréscimo máximo de 19%, para uma espessura de 4 cm. Na cobertura, o valor médio do coeficiente diminuiu conforme se aumenta a espessura de isolamento, registando uma redução média máxima de 54%, para soluções isoladas com 12 cm de isolamento.

Através do desenvolvimento do coeficiente, por hora, foi possível efetuar algumas observações relativas aos dias críticos dos meses anteriores. Assim, obtiveram-se as seguintes conclusões, resumidas na Tabela 4.3:

Tabela 4.3- Conclusões retiradas pela análise do desenvolvimento, por hora, do coeficiente de transferência de calor por convecção no interior da face, nos dias críticos, em função da espessura de isolamento térmico

	Conclusões
Dia mais frio de janeiro	<ul style="list-style-type: none"> • Nas paredes exteriores, as primeiras e últimas horas do dia, foram ao encontro do que foi concluído anteriormente, ou seja, o valor do coeficiente diminuiu com o aumento da espessura de isolamento. Contudo, das 10 horas às 17 horas, o valor do coeficiente não seguiu nenhum padrão, seguindo um desenvolvimento aleatório. Nesse intervalo, associado a ganhos solares, o valor do coeficiente desceu significativamente para as diferentes soluções construtivas. Na parede orientada a SO, o valor mínimo, $0,38 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, foi alcançado para 8 cm de isolamento. Nas paredes orientadas a NE e a NO, o valor mínimo, respetivamente, $0,27 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e $0,42 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, foi atingido para 10 cm de isolamento. • Na cobertura, o valor do coeficiente diminuiu com o aumento da espessura de isolamento. No intervalo de tempo das 10 horas às 17 horas, também se assistiu a um decréscimo no valor do coeficiente, para todas as espessuras. Contudo, durante este intervalo, o coeficiente seguiu ainda o padrão de desenvolvimento observado para as primeiras e últimas horas do dia, atingindo um valor mínimo de $0,26 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, para 12 cm de isolamento.

Dia mais frio do ano	<ul style="list-style-type: none"> Nas paredes exteriores, as primeiras e últimas horas do dia, foram ao encontro do que se concluiu anteriormente. Contudo, concluiu-se que, associado a espessuras de isolamento mais elevadas, o coeficiente apresentou menos amplitudes ao longo do dia. Por exemplo, na parede orientada a SO, a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo para o coeficiente registado na solução com 12 cm de isolamento foi de $0,45 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, enquanto que, na solução com 2 cm de isolamento, a diferença subiu para $1,17 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Na cobertura, o desenvolvimento do coeficiente foi semelhante ao comportamento do coeficiente nas paredes exteriores. Além disso, foi possível concluir que, o desenvolvimento do coeficiente para as soluções com 10 cm e 12 cm de isolamento é muito semelhante. Mais uma vez, verificou-se que, nas soluções com a maior espessura de isolamento, o coeficiente apresentou menos amplitudes ao longo do dia.
Dia mais quente de ano	<ul style="list-style-type: none"> No dia mais quente do ano, em ambas as componentes, o valor do coeficiente atingiu valores mais baixos para espessuras maiores. Contudo, o valor do coeficiente, para as diferentes espessuras de isolamento é muito semelhante, o que evidencia que, alterar a espessura tem pouco impacto no valor da variável. A colocação de isolamento tem maior impacto no valor da variável do que a alteração da sua espessura, principalmente nas espessuras de isolamento mais elevadas. Por exemplo, na parede orientada a SO, colocar 2 cm de isolamento nas soluções construtivas reduziu o coeficiente média diário em $0,17 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. A partir de uma espessura de 8 cm, o valor do coeficiente para as diferentes soluções construtivas difere apenas em $0,01 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

4.2.3.2 Avaliação da posição do isolamento térmico na EOE

Neste subcapítulo apresenta-se, de forma sumária, as conclusões relativas ao comportamento do coeficiente de transferência de calor convectiva, em regime dinâmico, em função das diferentes posições de isolamento nas paredes exteriores e cobertura.

Assim, com base nos valores mensais concluiu-se que:

- Em janeiro, os coeficientes médios registados nos diferentes casos foram muito próximos, para todas as espessuras de isolamento térmico. Para as paredes exteriores e cobertura, para espessuras de isolamento de 2 cm e 4 cm, registaram-se valores superiores para o coeficiente quando as soluções construtivas se encontravam isoladas de acordo com o caso 2. A partir de 6 cm de espessura, o coeficiente médio foi superior quando as soluções construtivas se encontram de acordo com o caso 4. Ambos os casos apresentavam a parede isolada pelo exterior, e a cobertura isolada sobre e sob a laje, respetivamente.
- Em março, o coeficiente médio registado nas paredes exteriores foi superior nos casos 4 e 2. Ambos apresentam a parede isolada pelo exterior. Também se observou que, conforme a espessura de isolamento aumentava, maior era discrepância registada entre casos. Na cobertura, o valor médio do coeficiente foi superior nos casos 2 e 3. Na cobertura, aumentar a espessura de isolamento, teve uma maior influência no valor médio do coeficiente, quando

este se localizava sob a laje (casos 1 e 4). Ao se comparar o valor registado entre 12 cm e 2 cm de isolamento, assistiu-se a um decréscimo, de 51% para o caso 1 e caso 4, e de 42% para o caso 2 e caso 3, estes últimos, com isolamentos sobre a laje.

- Em agosto, o coeficiente médio registado para as paredes exteriores, para todas as espessuras de isolamento, foi superior para o caso 4, ou seja, quando a parede estava isolada pelo exterior e a cobertura isolada sob laje. Os menores valores foram registados quando as soluções estavam de acordo com o caso 3, com a parede isolada pelo interior e a cobertura isolada sobre a laje. Para espessuras mais elevadas, o coeficiente médio registado nas paredes revelou uma proximidade de valores entre casos, em consenso com a posição de isolamento nas paredes. Mais uma vez concluiu-se que, a posição de isolamento nas paredes exteriores, não apresentou grande influência no coeficiente médio registado na cobertura.
- Em outubro, o coeficiente médio registado para as paredes exteriores, com espessuras de isolamento de 2 cm e 4 cm, foi superior quando as soluções se encontravam isoladas de acordo com o caso 1. Contudo, a partir de uma espessura de 6 cm de isolamento, o coeficiente médio assumiu valores mais elevados quando as soluções construtivas se encontravam de acordo com o caso 4, ou seja, com a parede isolada pelo exterior e com isolamento sob a laje.

Para os dias mais críticos de cada mês que foram alvo de análise, também se procedeu a uma análise comparativa entre casos, avaliando o comportamento do coeficiente de transferência de calor convectiva registado no interior da face da EOE, por hora, em função das diferentes localizações de isolamento térmico no envelope. Assim, para os dias analisados, obtiveram-se as seguintes conclusões, resumidas na Tabela 4.4:

Tabela 4.4-Conclusões retiradas pela análise do desenvolvimento, por hora, do coeficiente de transferência de calor por convecção no interior da face, nos dias críticos, em função da posição de isolamento térmico na EOE

	Conclusões
Dia mais frio de janeiro	<ul style="list-style-type: none"> • O coeficiente de transferência de calor convectiva no interior da face das paredes exteriores, registou comportamentos semelhantes para as diferentes posições de isolamento na envolvente, de acordo com posição de isolamento nas paredes exteriores, independentemente da posição de isolamento na cobertura. Assim, verificou-se um desenvolvimento semelhante do coeficiente entre o caso 2 e o caso 4 (parede isolada pelo exterior), e entre o caso 1 e o caso 3 (parede isolada pelo interior). • O coeficiente de transferência de calor convectiva no interior da face da cobertura também registou comportamentos semelhantes para os diferentes casos, em função da localização do isolamento na cobertura. Assim, o coeficiente registou um desenvolvimento semelhante entre o caso 2 e o caso 3 (com isolamento sobre a laje) e entre o caso 1 e o caso 4, (com isolamento sob a laje).
Dia mais frio do ano	<ul style="list-style-type: none"> • Para espessuras de isolamento mais reduzidas, coeficiente de transferência de calor convectiva registado nas paredes exteriores também registou a tendência observada no dia mais frio de janeiro. Contudo, a partir de uma

	<p>espessura de 6 cm de isolamento, quando as paredes estavam isoladas pelo interior (caso 1 e caso 3), a posição de isolamento na cobertura apresentou uma influência maior, pois, para paredes igualmente isoladas, registou-se, uma diferença média de $0,05 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Para paredes isoladas pelo exterior (caso 2 e caso 4), a posição de isolamento na cobertura continuou a não apresentar grande relevância no coeficiente registado, sendo a diferença entre os dois casos de apenas $0,01 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.</p> <ul style="list-style-type: none"> • O coeficiente de transferência de calor convectiva na cobertura, mais uma vez, apresentou comportamentos semelhantes para os diferentes casos, em função da localização do isolamento na cobertura, para todas as espessuras de isolamento, independentemente da localização de isolamento nas paredes exteriores.
Dia mais quente de ano	<ul style="list-style-type: none"> • Nas primeiras e últimas horas do dia, o coeficiente de transferência de calor convectiva nas paredes exteriores, apresentou valores muito semelhante para as diferentes posições de isolamento. Contudo, no intervalo de maior exposição solar, observou-se uma discrepância entre os valores registados para as diferentes posições. • Na cobertura, nas primeiras e últimas horas do dia, o coeficiente de transferência de calor convectiva também apresentou valores muito próximos para as diferentes posições de isolamento. No intervalo de maior radiação solar, assistiu-se a um aumento no valor do coeficiente, onde se observou uma proximidade de valores entre casos, de acordo com a posição do isolamento em relação à laje. Quando a cobertura estava isolada sobre a laje, o coeficiente médio de transferência de calor foi superior em $0,23 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

4.2.4 Taxa de perda de calor na superfície interior (W)

Neste subcapítulo, é apresentada uma análise sobre o desenvolvimento da taxa de perda calor por condução na superfície interior das paredes em contacto com o ar exterior e na cobertura exterior (*Surface Inside Face Conduction Heat Loss Rate*), seguindo a mesma metodologia utilizada nas grandezas anteriores. Assim, para os meses escolhidos, também foi estudado, em regime dinâmico, de que forma é que a taxa de perda de calor na superfície interior da EOE variava, ao se aumentar a espessura de isolamento e ao se alterar a sua posição na envolvente.

Durante o ano, na fração com as soluções construtivas próximas do real, a taxa de perda de calor na superfície interior dos diferentes elementos que constituem a EOE, revelou ser bastante superior na cobertura, em comparação com as paredes exteriores. Em janeiro, na cobertura, a taxa média de perda de calor foi 18 vezes superior à taxa média registada na parede orientada a SO, 10 vezes maior do que a taxa média registada na parede orientada a NE e 7 vezes superior à taxa média observada na fachada NO. Essa discrepância entre resultados é observada na Figura 4.34, que demonstram o desenvolvimento a taxa horária de perda de calor na superfície interior. Ao comparar-se o desenvolvimento da grandeza no dia mais frio e no dia mais quente

do mês, a taxa média diária de perda de calor por condução foi superior no dia mais frio, como era expectável. Por exemplo, na cobertura foi, aproximadamente, 2 vezes superior e na parede orientada a SO, foi 4 vezes superior.

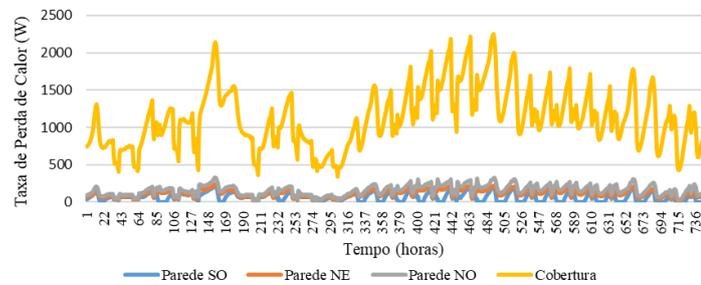


Figura 4.34- Taxa média horária de perda de calor na superfície interior das paredes exteriores e coberturas, durante o mês de janeiro

No mês de março, na situação sem isolamento, a cobertura registou uma taxa média de perda de calor 13 vezes, 8 vezes e 5 vezes, superior à taxa média registada na parede orientada a SO, a NE e a NO, respetivamente. No dia mais frio do ano, a taxa de perda de calor no interior da face atingiu o seu valor máximo, em todos os elementos opacos em contacto com o exterior, pelas 9 horas. Neste dia, a taxa média de perda de calor na cobertura foi 10 vezes superior à taxa média registada na parede orientada a SO, 6 vezes superior à taxa média na parede orientada a NE e 4 vezes superior à taxa média na parede NO.

No mês de agosto, também se verificou uma taxa de perda de calor na superfície interior da cobertura mais elevada, onde a taxa média foi 5 vezes superior à taxa média registada na parede orientada a SO, 4 vezes maior à taxa média na parede com orientação NE e 3 vezes superior à taxa média na fachada NO. Desta forma, no geral, num mês de verão, na superfície interior da parede SO, também se registaram valores inferiores para a taxa de perda de calor. De notar que, a discrepância de valores entre a cobertura e as paredes não é tao acentuada como nos meses frios. Estes resultados podem ser observados na Figura 4.35.

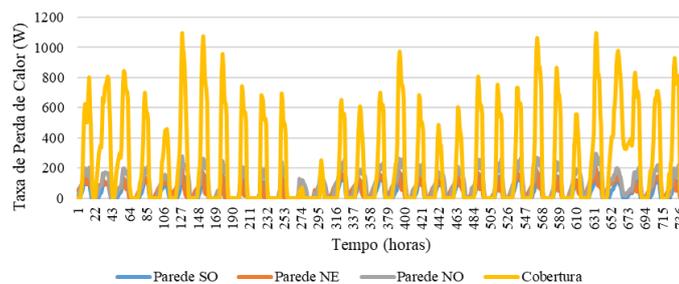


Figura 4.35- Taxa média horária de perda de calor na superfície interior das paredes exteriores e coberturas, durante o mês de agosto

No mês de outubro, a taxa de perda de calor na superfície interior na EOE, também apresentou um comportamento semelhante ao registado nos meses anteriormente analisados. Neste mês, na cobertura registou-se uma taxa média 13 vezes superior à taxa média registada na parede orientada a SO, (igual ao mês de março), 7 vezes superior à taxa média registada na parede orientada NE e 5 vezes superior à taxa média de perda de calor observada na fachada NO (também igual ao mês de março). Neste mês, foi possível verificar que, conforme as temperaturas médias exteriores diminuía, (aproximadamente a partir do décimo dia), a diferença entre a taxa média diária de perda de calor na cobertura e nas paredes exteriores aumentava. Essa diferença e a discrepância de resultados registados, pode ser observada na Figura 4.36, que representa a taxa média diária de perda de calor na superfície interior da EOE.

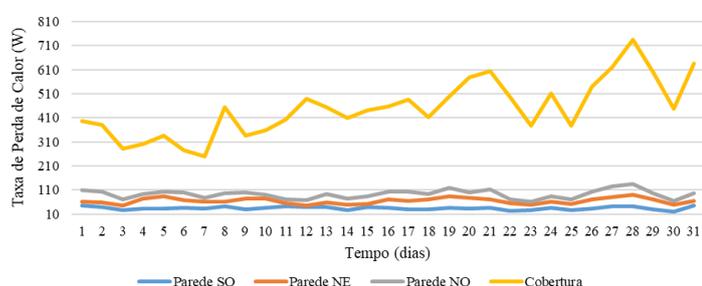


Figura 4.36-Taxa média diária de perda de calor na superfície interior das paredes exteriores e coberturas, durante o mês de outubro

De seguida, tendo como referência os mesmos dias e meses, estudou-se qual o impacto no valor da grandeza, de se colocar e alterar a espessura de isolamento nas soluções construtivas em contacto com o exterior, com base numa metodologia dinâmica horária.

4.2.4.1 Avaliação do impacto da colocação de isolamento

Nesta secção, estudou-se qual o impacto de se colocar isolamento térmico na envolvente opaca exterior e de se alterar a sua espessura. Conclui-se que:

- Em todos os meses estudados, a taxa de perda de calor na superfície interior de todos os elementos opacos em contacto com o exterior, reduziu com o aumento da espessura de isolamento térmico.
- Em janeiro, colocar isolamento teve um impacto mais significativo na cobertura. Nomeadamente, a taxa média de perda de calor reduziu em 51%. Para a parede orientada a SO, colocar 2 cm isolamento nas soluções construtivas reduziu a perda de calor em 30%. Para as paredes orientadas a NE e a NO, verificou-se uma redução média de, aproximadamente, 29%. Ao se comparar o valor médio da variável registada quando as soluções construtivas estão isentas de isolamento, com a taxa média registada para 12 cm de isolamento, verificou-se um decréscimo de 84% para a cobertura. Nas paredes orientadas a SO, a NE e a NO existiu um decréscimo de 68%, 70% e 71%, respetivamente.

- No mês de março, também se verificou que, colocar isolamento térmico teve um impacto mais significativo no valor médio da taxa registada na cobertura. Para uma espessura de 2 cm, a taxa média de perda de calor reduziu em 40%, em comparação com a taxa média registada quando a fração apresentava as soluções isentas. Nas paredes exteriores, para uma solução com 12 cm de isolamento, o valor médio registado para a taxa de perda de calor reduziu em 52%, em 55% e em 59% para as paredes orientadas a SO, a NE e a NO, respetivamente. A meio do mês, onde se verificou um aumento das temperaturas médias exteriores, a taxa média diária apresentou ser mais próxima para as diferentes soluções. Tal, pode ser observado na Figura 4.37, que representa o desenvolvimento da taxa média diária de perda de calor, na superfície interior da parede orientada a NE, em função da espessura de isolamento.

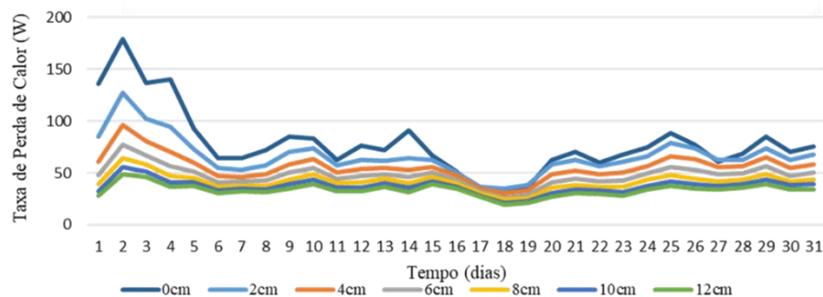


Figura 4.37- Taxa média diária de perda de calor na superfície interior da parede orientada a NE, em função das diferentes espessuras de isolamento térmico

- Em agosto, mais uma vez, verificou-se que, colocar apenas 2 cm de isolamento nas soluções construtivas já apresenta um grande impacto na taxa média de perda de calor, principalmente na cobertura, onde se registou uma redução média de 45% no seu valor. Nas paredes exteriores, a taxa média registada reduziu, respetivamente, 40%, 30% e 37% nas paredes orientadas a SO, NE e a NO. Para espessuras mais elevadas de isolamento, estão associadas taxas médias de perda de calor inferiores. Assim, ao se comparar o valor médio da variável registado numa solução construtiva isenta de isolamento, com uma solução com 12cm de isolamento, observou-se um decréscimo de 66% na taxa de perda de calor superfície interior da cobertura. Nas paredes orientadas a SO, a NE e a NO, assistiu-se a um decréscimo de 68%, 64% e 69%.
- Para o mês de outubro, o isolamento também reduziu o valor médio registado para a taxa na EOE. Embora esse impacto não seja tão elevado como o que foi evidenciado no mês mais frio e no mês mais quente, colocar 2 cm de isolamento nas soluções construtivas, reduziu o valor médio da taxa de perda de calor em 17%, 13% e 16%, nas paredes orientadas a SO, a NE e a NO, respetivamente. Mais uma vez, essa redução foi mais evidenciada na cobertura, onde a taxa média reduziu 35%.

As conclusões relativas aos dias críticos encontram-se resumidas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5- Conclusões retiradas pela análise do desenvolvimento da taxa horária de perda calor por condução de superfície no interior da face, nos dias críticos, em função da espessura de isolamento térmico

	Conclusões
Dia mais frio de janeiro	<ul style="list-style-type: none"> No geral, observou-se a tendência anterior, em que a taxa reduz com o aumento da espessura. Contudo, para as paredes exteriores, no intervalo entre as 11 horas e as 17 horas, a solução isenta de isolamento, apresentou valores inferiores para a taxa de perda de calor, em comparação com a taxa registada para soluções com 2 cm de isolamento. Mais uma vez, concluiu-se que, o aumento da espessura de isolamento apresentou mais impacto na taxa registada na cobertura. Por exemplo, na cobertura, a taxa registada para soluções isoladas com 2 cm de isolamento, variou entre 989W e 627W. Para 12 cm, a perda de calor reduziu para valores entre 394 W e 161 W. Assim, assistiu-se a uma redução na taxa média diária de calor de 600 W. Estabelecendo a mesma comparação para as paredes exteriores, a taxa média diária reduziu, aproximadamente, 40 W, 68 W e 94 W para as paredes orientadas a SO, a NE e a NO, respetivamente.
Dia mais frio do ano	<ul style="list-style-type: none"> A taxa de perda de calor diminui com o aumento da espessura de isolamento. No intervalo de tempo correspondentes às horas de radiação solar, das 10 horas às 17 horas, observou-se uma maior variação. Concluiu-se também que, aumentar a espessura de isolamento tem um maior impacto na cobertura. Ao se comparar a taxa registada para soluções isoladas com 2 cm de isolamento, com a taxa registada para soluções com 12 cm, assistiu-se a uma redução na perda média diária de calor no interior da face de 71%. Estabelecendo a mesma comparação para as paredes exteriores, a taxa média diária reduziu, aproximadamente, 38%, 56% e 67% para as paredes orientadas a SO, a NE e a NO, respetivamente.
Dia mais quente de ano	<ul style="list-style-type: none"> Tanto na cobertura como nas paredes exteriores, a variável desenvolveu-se de forma semelhante. Nas primeiras e últimas horas do dia, registaram-se valores nulos para a taxa de perda de calor por condução. A taxa apresentou variações no seu valor entre as 10 horas e as 17 horas, horário de maior radiação solar. Neste dia, a taxa de perda de calor apresentou um desenvolvimento em função da espessura de isolamento diferente do que foi concluído anteriormente. Até às 12 horas, as conclusões são semelhantes às considerações anteriores: o valor da taxa de perda de calor reduz com o aumento da espessura de isolamento. Porém, a partir das 12 horas, verificou-se o oposto. Associado a menores espessuras, está associado um maior valor para a taxa de perda de calor por condução. Neste dia concluiu-se que, o aumento da espessura de isolamento teve um maior impacto na parede orientado a NO. Ao se comparar a taxa registada entre as soluções isoladas com 2 cm de isolamento e com 12 cm, assistiu-se a uma redução na perda média diária de calor de 27%. Para os restantes elementos, a taxa média diária reduziu, aproximadamente, 21%, 3% e 6% para as paredes orientadas a SO e a NE e cobertura, respetivamente.

4.2.4.2 Avaliação da posição do isolamento térmico na EOE

Neste subcapítulo apresenta-se, de forma sumária, as conclusões relativas ao comportamento da taxa de perda calor por condução de superfície no interior da face, em regime dinâmico, em função das diferentes posições de isolamento nas paredes exteriores e cobertura.

Assim, através de médias mensais dos resultados obtidos pela simulação dinâmica horária, concluiu-se que, para todos os meses analisados, as conclusões foram semelhantes:

- A taxa de perda calor por condução no interior da face das paredes exteriores, para todas as espessuras de isolamento térmico, registou valores mais elevados quando as soluções construtivas se encontram isoladas de acordo com o caso 4, ou seja, quando as paredes estão isoladas pelo exterior e na cobertura, o isolamento está sob a laje. A taxa registou valores inferiores, quando o isolamento se encontra de acordo com o caso 3, ou seja, as paredes estão isoladas pelo interior e o isolamento na cobertura está sobre a laje. Já na cobertura, a taxa de perda calor por condução registou valores superiores para o caso 3 e inferiores para o caso 4.
- Em todos os meses, para todos os elementos da EOE, conforme se aumenta a espessura do material isolante, a diferença entre a taxa de perda de calor para os diferentes casos fica mais perceptível.
- Embora as conclusões para os diferentes meses sejam semelhantes, no mês de agosto, a diferença entre a taxa média mensal registada para as diferentes posições foi mais pronunciada. Por exemplo, em agosto, para a parede orientada a NE com uma espessura de isolamento igual a 12 cm, a diferença entre a taxa média mensal registada nos casos 4 e 3, (casos onde a taxa média registada foi superior e inferior, respetivamente), foi de 9,28 W. Em janeiro, a diferença obtida nessas condições foi apenas de 1,33 W.

Na Tabela 4.6 apresentam-se as principais conclusões relativas aos dias críticos estudados.

Tabela 4.6- Conclusões retiradas pela análise do desenvolvimento da taxa horária de perda calor por condução de superfície no interior da face, nos dias críticos, em função da posição de isolamento térmico na EOE

	Conclusões
Dia mais frio de janeiro	<ul style="list-style-type: none"> • A taxa de perda de calor por condução registada nas paredes exteriores, apresentou uma similaridade de comportamentos entre os casos. • A taxa de perda de calor por condução registada na cobertura também apresentou similaridade no seu comportamento, de acordo com a posição de isolamento térmico na cobertura, independentemente da posição de isolamento térmico nas paredes exteriores. • Como foi concluído anteriormente, através de médias mensais, no mês de janeiro, a diferença entre a taxa média mensal registada para as diferentes posições não é muito pronunciada. Neste dia, para os diferentes elementos da EOE tal foi verificado. Inclusive, o desenvolvimento da taxa de perda de calor para os diferentes casos foi semelhante.

Dia mais frio do ano	<ul style="list-style-type: none"> Nas primeiras e últimas horas do dia, a taxa de perda de calor na face interna das paredes apresentou valores superiores para o caso 1, (parede isolada pelo interior e a cobertura isolada sob a laje). No intervalo entre as 13 horas e as 17 horas, em que existe uma maior radiação, registou-se valores superiores para o caso 2, (parede isolada pelo exterior e a cobertura isolada sobre a laje). Neste dia, nas paredes exteriores, também se assistiu a uma similaridade de comportamentos entre os casos. Contudo, embora de forma pouco pronunciada, verificou-se a influência da posição de isolamento na cobertura. Em paredes igualmente isoladas, quando a cobertura apresentava o isolamento sob a laje, registaram-se taxas de perda de calor ligeiramente superiores do que quando o isolamento se encontrava sobre a laje. A taxa de perda de calor por condução registada na cobertura voltou a apresentar similaridade no seu comportamento, independentemente da posição de isolamento nas paredes exteriores.
Dia mais quente de ano	<ul style="list-style-type: none"> A taxa de perda de calor por condução registada nas paredes exteriores, para as diferentes posições, apresentou variações no intervalo das 9 horas às 17 horas, onde existe uma maior radiação solar. Nas primeiras e últimas horas do dia, foi nula. Quando as temperaturas do ar exterior se apresentavam mais elevadas, a posição de isolamento na cobertura apresentou uma maior influência na taxa de perda de calor por condução registada nas paredes exteriores.

4.3 Comparação entre as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento obtidas na metodologia sazonal e dinâmica

Neste subcapítulo é feita uma comparação entre os resultados obtidos para as necessidades energéticas para aquecimento e para arrefecimento, através da metodologia atualmente em vigor, ou seja, com base no método sazonal e através de uma metodologia dinâmica horária. Esta última, futuramente, pode ser a metodologia adotada para avaliar o desempenho energético dos edifícios para habitação. Os resultados obtidos na simulação dinâmica, em $\text{kWh m}^{-2}_{\text{Útil}}$, foram somados para se obter as necessidades anuais e assim ser possível estabelecer uma comparação entre regimes.

Relativamente às necessidades energéticas registadas para a fração com as características próximas do real, concluiu-se que:

- As necessidades energéticas para aquecimento, em regime sazonal foram sobrevalorizadas em 68%, em relação às necessidades obtidas em regime dinâmico. Por metro quadrado de área útil, registou-se uma diferença de $93,28 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil}}.\text{Ano}^{-1}$.

- As necessidades energéticas para arrefecimento, em regime sazonal foram subvalorizadas em 36%, em relação as necessidades obtidas em regime dinâmico, uma diferença de cerca de $6,48 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil}}.\text{Ano}^{-1}$.

A Figura 4.38 e a Figura 4.39 representam, respetivamente, as necessidades energéticas para aquecimento e para arrefecimento na fração, obtidas através da metodologia sazonal prevista na legislação e através da metodologia dinâmica, quando esta apresenta soluções construtivas em contacto com o exterior com isolamento térmico e se altera a sua espessura. Conclui-se que:

- As necessidades energéticas para aquecimento, em função do aumento da espessura de isolamento térmico, em ambos os regimes, apresentam um comportamento idêntico: à medida que se aumenta a espessura do material isolante, as necessidades energéticas para aquecimento decrescem.
- Contudo, para todas as espessuras de isolamento, as necessidades para aquecimento em regime sazonal registam valores bastante elevados em comparação com as necessidades obtidas em regime dinâmico. No entanto, essa diferença diminui conforme se aumenta a espessura. Por exemplo, para uma espessura de 2 cm de isolamento térmico, a diferença entre as necessidades para aquecimento obtidas nos diferentes regimes foi de $59,62 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil}}.\text{Ano}^{-1}$. Para uma espessura de 12 cm, a diferença reduziu para $40,43 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil}}.\text{Ano}^{-1}$. Contudo, para a mesma espessura, em regime dinâmico, as necessidades são quase nulas, enquanto que, em regime sazonal, em comparação, ainda se regista um valor significativo, cerca de $42,08 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil}}.\text{Ano}^{-1}$.
- A colocação de isolamento apresentou um impacto positivo em ambos os regimes. A colocação de 2 cm de isolamento traduziu-se num decréscimo de 44% das necessidades de aquecimento, para o regime sazonal, e em 61% para o dinâmico.
- No caso das necessidades energéticas para arrefecimento, embora os valores obtidos entre as diferentes metodologias sejam menos discrepantes, à medida que se aumenta a espessura de isolamento, assiste-se a um comportamento distinto entre regimes: no regime sazonal, as necessidades para arrefecimento diminuem com o aumento da espessura de isolamento térmico; enquanto que no regime dinâmico se observa o inverso. As necessidades de arrefecimento aumentam com o aumento da espessura de isolamento.
- Em regime sazonal, a colocação de isolamento térmico diminuiu as necessidades energéticas de arrefecimento em 17%, 21%, 27% e 20% para os casos 1 a 4, respetivamente. Já em regime dinâmico, para o caso 1 e o caso 4, quando a cobertura apresenta o isolamento sob a laje, a colocação de isolamento térmico aumentou as necessidades em 3% e 1%, respetivamente. Contudo, quando a cobertura apresenta o isolamento sobre a laje, ou seja, o caso 2 e o caso 3, a colocação de isolamento nas soluções diminuiu as necessidades em 9% e em 7%, respetivamente.

- Comparando os diferentes regimes, como as necessidades de arrefecimento apresentam evoluções opostas com o incremento de isolamento, os valores registados para as diferentes metodologias tende a apresentar uma discrepância mais acentuada. Por exemplo, para uma espessura de 2 cm, as necessidades para arrefecimento obtidas para os diferentes métodos, distavam entre si, $8,85 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil}}.\text{Ano}^{-1}$. Para uma espessura de 12 cm, a diferença aumentou para $15 \text{ kWh.m}^{-2}_{\text{Útil}}.\text{Ano}^{-1}$. Em termos percentuais, uma diferença de 49%, passou para 68%, em relação às necessidades obtidas em regime dinâmico.

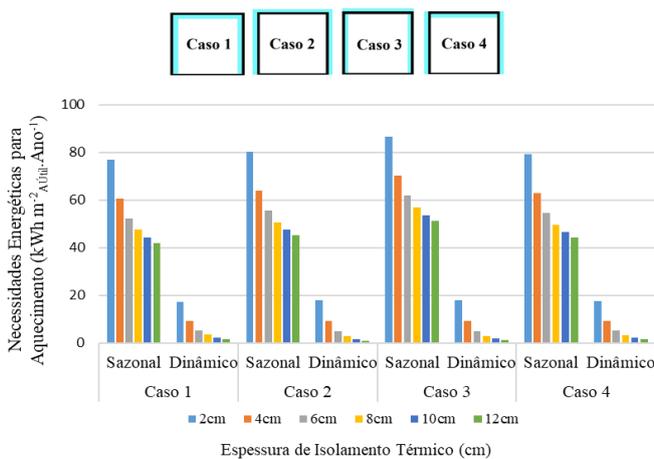


Figura 4.38- Necessidades energéticas para aquecimento, obtidas em regime sazonal e regime dinâmico, em função das diferentes espessuras e posições de isolamento térmico

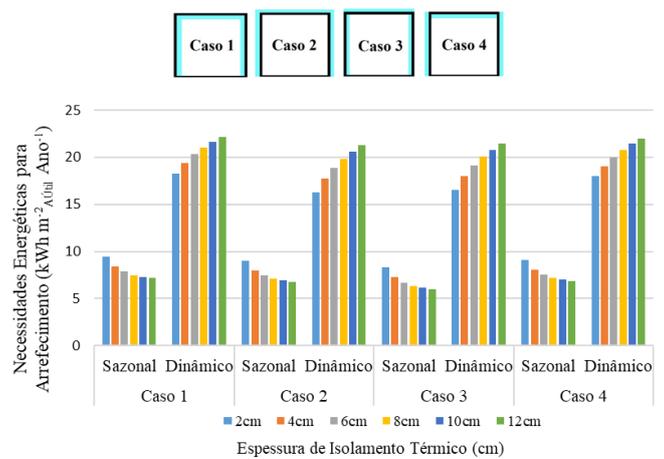


Figura 4.39- Necessidades energéticas para arrefecimento, obtidas em regime sazonal e regime dinâmico, em função das diferentes espessuras e posições de isolamento térmico

Relativamente ao impacto da posição e espessura do isolamento na envolvente, a Figura 4.40 e a Figura 4.41 apresentam, respetivamente, as necessidades energéticas para aquecimento e para arrefecimento, obtidas através de uma metodologia dinâmica. Comparando os resultados obtidos para os dois regimes, conclui-se que:

- Em regime sazonal, foi concluído que, para todas as espessuras de isolamento, as necessidades para aquecimento são inferiores quando as soluções estão isoladas de acordo com o caso 1 e superiores de acordo com o caso 3. Contudo, em regime dinâmico, para diferentes espessuras, obteve-se diferentes conclusões: para uma espessura de isolamento igual a 2 cm, as necessidades para aquecimento são superiores no caso 2 e inferiores no caso 1. Para uma espessura de 4 cm são superiores no caso 2 e inferiores no caso 4. A partir de uma espessura de 6 cm, são superiores no caso 1 e inferiores no caso 2. Assim, as conclusões obtidas para as necessidades energéticas para aquecimento, em função da localização de isolamento térmico na envolvente, foram distintas para os diferentes regimes.
- Já as necessidades para arrefecimento, em ambos os regimes, apresentam valores superiores quando o isolamento se encontra na envolvente de acordo com o caso 1, ou seja, isolamento

sob a laje e parede isolada pelo interior. Contudo, utilizando o método sazonal, os valores inferiores para as necessidades foram registados quando o isolamento se encontra de acordo com o caso 3, ou seja, isolamento sobre a laje e parede isolada pelo interior. Enquanto que, em regime dinâmico, os valores inferiores foram registados para o caso 2, quando a parede se encontra isolada pelo exterior e a cobertura apresenta o isolamento sobre a laje.

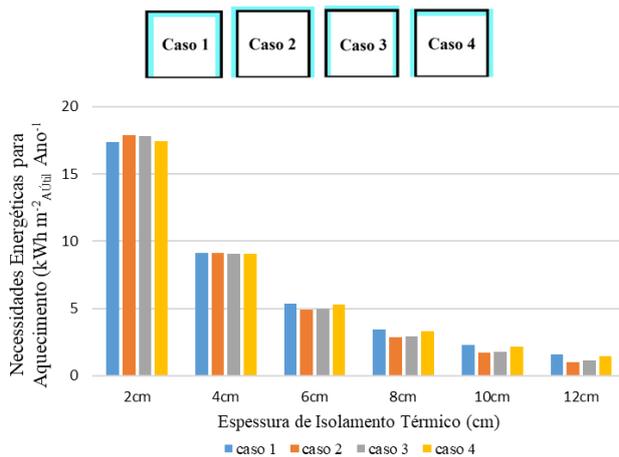


Figura 4.40- Necessidades energéticas para aquecimento, obtidas em regime dinâmico, em função das diferentes posições e espessuras de isolamento térmico

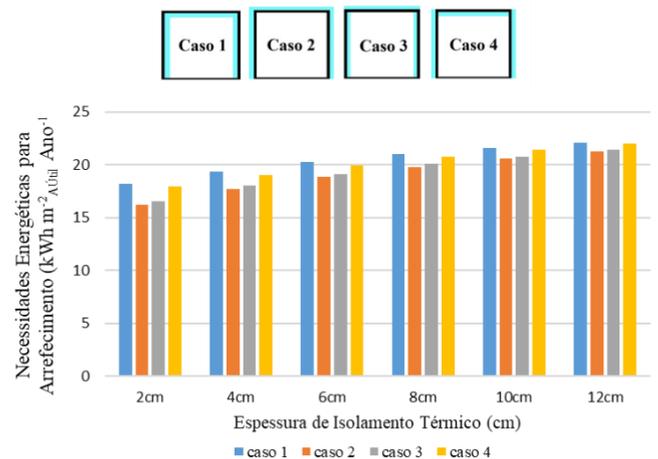


Figura 4.41- Necessidades energéticas para arrefecimento, obtidas em regime dinâmico, em função das diferentes posições e espessuras de isolamento térmico

Para justificar as discrepâncias existentes entre os resultados obtidos para os diferentes regimes, tem de se ter em conta a metodologia e a forma como as grandezas são avaliadas e introduzidas. Para os diferentes regimes, o estudo focou-se na influência da colocação e variação de isolamento térmico das paredes e cobertura. Assim, as principais razões para as discrepâncias existentes entre métodos de cálculos foram:

- Para cada regime estão associados diferentes métodos de cálculo. Enquanto que, em regime sazonal é utilizado um método simplificado, admitindo um comportamento quase estacionário, as simulações dinâmicas utilizam equações de balanço de energia bastante mais detalhadas e complexas.
- Diferenças de cálculo das perdas e ganhos de calor na envolvente. Por exemplo nos envidraçados, enquanto que, para avaliar o desempenho da fração através da metodologia dinâmica, o cálculo é influenciado pela variabilidade horária da exposição solar.
- Na avaliação em regime sazonal foram utilizadas numerosas simplificações e valores tabelados, nomeadamente na contabilização das pontes térmicas, na caracterização dos vãos envidraçados e na contabilização do sombreamento existente. A utilização de valores tabelados e por defeito, aumentam a incerteza dos resultados.

- Na avaliação em regime dinâmico, a contabilização das pontes térmicas lineares foi negligenciada, sendo um dos motivos para as diferenças encontradas.
- A forma como os dados climáticos são tratados. Em regime sazonal, não são detetadas as variações climáticas ao longo do tempo
- O próprio erro humano não pode ser negligenciado. Como foi dito anteriormente, como o programa apresenta uma grande complexidade, os erros na introdução de dados podem ser relevantes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

No decorrer desta dissertação avaliou-se o desempenho de uma fração real, situada na cidade de Coimbra, aplicando-se a metodologia presente na legislação atual, que utiliza uma abordagem sazonal, e através de uma metodologia dinâmica horária. Posteriormente, para aumentar a amostragem de resultados, e avaliar a diferença entre regimes aplicou-se, como medida de melhoria, isolamento térmico nas soluções construtivas opacas em contacto com o ar exterior. Para ambos os regimes, estudou-se de que forma é que as grandezas relacionadas com o desempenho e fluxo de calor variavam com o aumento do isolamento e para diferentes posições deste na envolvente.

O principal objetivo da dissertação foi avaliar o impacto de se utilizar um método dinâmico em relação ao sazonal. Para tal compararam-se as necessidades para aquecimento e arrefecimento obtidas nos dois regimes, tendo-se concluído que:

- Em comparação com os resultados obtidos na simulação dinâmica, para a fração sem isolamento (situação de referência), os resultados obtidos na análise sazonal sobrevalorizaram em 68% as necessidades energéticas para aquecimento e subvalorizaram em 36% as necessidades para arrefecimento.
- Quando se colocou isolamento térmico na EOE e se alterou a sua espessura, para ambos os regimes, as necessidades energéticas para aquecimento diminuem com o aumento da espessura do material isolante. Contudo, para todas as espessuras, as necessidades para aquecimento em regime sazonal registam valores bastante elevados em comparação com as necessidades obtidas em regime dinâmico. Colocar isolamento térmico nas soluções teve um impacto mais acentuado no valor das necessidades para aquecimento em regime dinâmico, reduzindo as necessidades em 61%, enquanto que, em regime sazonal, apenas foi de 44%.
- No caso das necessidades energéticas para arrefecimento, também se assiste a um comportamento distinto entre regimes. Para o regime sazonal, as necessidades para arrefecimento diminuem com o aumento da espessura de isolamento térmico. Para o regime dinâmico, observa-se o inverso. Neste caso, colocar isolamento tem um maior impacto no valor das necessidades em regime sazonal, onde se assiste a uma redução entre 17% e 27%, em função das diferentes localizações de isolamento nos envelopes. Em regime dinâmico, colocar isolamento aumentou as necessidades para arrefecimento entre 1% e 9%, dependendo das diferentes localizações de isolamento.

- Para justificar as discrepâncias entre resultados teve-se em consideração as simplificações utilizadas em cada método de cálculo. Em regime sazonal, foram utilizadas enumeras simplificações e valores tabelados, nomeadamente, na contabilização das pontes térmicas, na contabilização do sombreamento e na caracterização dos vãos envidraçados. Já no regime dinâmico foi negligenciado o efeito das pontes térmicas.

Em regime sazonal, as conclusões da análise do desempenho da fração são mais diretas. De um modo geral, todos os parâmetros estudados diminuíram à medida que se aumentou a espessura do isolamento. Em regime dinâmico, as conclusões não são tão lineares. De acordo com a base temporal escolhida (mensal, diária ou horária) é possível estudar com maior rigor de que forma é que as grandezas relacionadas com o desempenho energético e trocas de calor variam ao longo do ano, inclusive nos meses e dias mais críticos. De facto, a análise realizada através de uma simulação dinâmica permitiu estudar a fração de forma mais pormenorizada, uma vantagem da abordagem através da simulação dinâmica. É possível, por exemplo, avaliar o impacto das medidas em função da orientação das soluções construtivas.

Em geral, a análise da fração em regime dinâmico permitiu obter uma maior quantidade de conclusões, relacionadas com o desempenho da fração e dos seus elementos construtivos, nomeadamente em função da orientação, radiação solar, e outras variáveis que têm impacto direto com as trocas de calor entre o ar exterior. Assim sendo, entende-se a razão pela qual a atual legislação apela para o uso de métodos mais elaborados e precisos. Contudo, a análise dinâmica revelou ser um método muito trabalhoso, em comparação com a análise sazonal, pois necessita da introdução de mais dados de entrada, o que pode resultar em maiores erros.

5.2 Trabalhos futuros

Na sequência do trabalho desenvolvido nesta dissertação, sugere-se que se realizem mais estudos idênticos, aplicado a outros casos de estudo e outros climas.

Nesta dissertação, compararam-se as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento, obtidas nos dois regimes, alterando-se a envolvente opaca exterior. Sugere-se o estudo de outras componentes, diretamente relacionadas com o desempenho de um edifício, nomeadamente os vãos envidraçados, ventilação, sistemas ativos, entre outros.

Como na dissertação o efeito das pontes térmicas foi negligenciado, outra sugestão é explorarem-se métodos para a sua contabilização destas no desempenho energético de uma habitação, apurando qual a influência destas em regime dinâmico, comparativamente ao regime sazonal.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENE. (2020). Guia SCE – Indicadores de Desempenho Energético (REH).
- Ashton, P. (2016). Getting started: Getting started. *Quick Hits for New Faculty: Successful Strategies by Award-Winning Teachers, c*, 4–6.
- Ballarini, I., Primo, E., & Corrado, V. (2018). On the limits of the quasi-steady-state method to predict the energy performance of low-energy buildings. *Thermal Science*, 2018, 1117–1127. <https://doi.org/10.2298/TSCII70724133B>
- Coelho, G. B. A. (2015). Análise do comportamento higratérmico em regime variável de paredes sujeitas à acção da chuva incidente. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319–331. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- Decreto-Lei n.º 101-D/2020 de 7 de dezembro. Diário Da República n.º 237 – I Série. Direção- Geral de Energia e Geologia. (2020).
- Despacho n.º 6476-H/2021 de 1 de julho. Diário Da República n.º 126 – II Série. Direção- Geral de Energia e Geologia. (2021).
- Ellis, P. G., Torcellini, P. A., & Crawley, D. B. (2008). Energy design plugin : an EnergyPus plugin for SketchUP * National Renewable Energy Laboratory , Golden , CO United States Department of Energy , Washington , DC. *Contract, July 2008*, 238–245.
- EnergyPlus. (n.d.). Weather Data Sources. Acedido a 4 de maio de 2022 em, <https://energyplus.net/weather/sources#INETI>
- Evangelisti, L., Battista, G., Guattari, C., Basilicata, C., & Vollaro, R. de L. (2014). Analysis of two models for evaluating the energy performance of different buildings. *Sustainability (Switzerland)*, 6(8), 5311–5321. <https://doi.org/10.3390/su6085311>
- ISO 52016-1:2017. (n.d.). *ISO 52016-1:2017* Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads — Part 1: Calculation procedures. Acedido a 11 de janeiro de 2022, em <https://www.iso.org/standard/65696.html>

- Luca, G. De, Bianco, F., Degerfeld, M., Ballarini, I., & Corrado, V. (2022). Improvements of simplified hourly models for the energy assessment of buildings : The application of EN ISO 52016 in Italy. *Energy Reports*, 8, 7349–7359. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.120>
- Michalak, P. (2014). The simple hourly method of EN ISO 13790 standard in Matlab/Simulink: A comparative study for the climatic conditions of Poland. *Energy*, 75, 568–578. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.019>
- Palma, P., Gouveia, J. P., & Barbosa, R. (2022). How much will it cost? An energy renovation analysis for the Portuguese dwelling stock. *Sustainable Cities and Society*, 78(August 2021), 103607. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103607>
- Santos, C. A. P. (LNEC), & Matias, L. (LNEC). (2006). ITE 50- Coeficientes de transmissão térmica de elementos na envolvente dos edifícios.
- Schreyer, A. C., & Hoque, S. (2009). Interactive Three-Dimensional Visualization of Building Envelope Systems Using Infrared Thermography and SketchUp. *InfraMation 2009 Proceedings, January*, 1–8.
- Sirén, K., & Hasan, A. (2007). Comparison of two calculation methods used to estimate cooling energy demand and indoor summer temperatures. *Proceedings of the Clima*. http://www.researchgate.net/publication/228735247_Comparison_of_two_calculation_methods_used_to_estimate_cooling_energy_demand_and_indoor_summer_temperatures/file/79e41508e727d9ceca.pdf
- Software, B. (n.d.). Group – Thermal Zone Description/Geometry-. Acedido a 20 de março de 2022, em <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-4/input-output-reference/group-thermal-zone-description-geometry.html>
- Summa, S., Remia, G., & Di Perna, C. (2022). Comparative and Sensitivity Analysis of Numerical Methods for the Discretization of Opaque Structures and Parameters of Glass Components for EN ISO 52016-1. *Energies*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/en15031030>
- Summa, S., Tarabelli, L., & Di Perna, C. (2021). Evaluation of ISO 52010-1: 2017 and proposal for an alternative calculation procedure. *Solar Energy*, 218(July 2020), 262–281. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.046>
- Tadeu, A., Simões, I., Simões, N., & Prata, J. (2011). Simulation of dynamic linear thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain. *Energy and Buildings*, 43(12), 3685–3695. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.001>
- van Dijk, D. (2019). EN ISO 52016-1: The new international standard to calculate building energy needs for heating and cooling, internal temperatures and heating and cooling load. *Building Simulation Conference Proceedings*, 6, 4061–4068. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211405>
-

Zakula, T., Bagaric, M., Ferdelji, N., Milovanovic, B., Mudrinic, S., & Ritosa, K. (2019). Comparison of dynamic simulations and the ISO 52016 standard for the assessment of building energy performance. *Applied Energy*, 254(August 2019), 113553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113553>