



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Frutuoso Miguel Piedade Oliveira

A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SOLUÇÕES PASSIVAS
EM EDIFÍCIOS EM ESTRUTURA METÁLICA

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural, orientada pela Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio e pelo Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2021

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

Frutuoso Miguel Piedade Oliveira

A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SOLUÇÕES PASSIVAS EM EDIFÍCIOS EM ESTRUTURA METÁLICA

ENERGY EFFICIENCY OF PASSIVE SOLUTIONS IN STEEL-FRAMED BUILDINGS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural,
orientada pela Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio e pelo Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

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.

Outubro de 2021

1 2  9 0

UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Agradecimentos

Aos meus pais! À Anabela e ao Frutuoso que, sempre presentes, me indicaram o caminho a seguir. Que nunca puseram em causa as minhas capacidades e sempre acreditaram e apoiaram as minhas tomadas de decisão. Um obrigado por todo o empenho nesta educação e nesta partilha de princípios, que se reflete todos os dias na pessoa que sou. Um agradecimento especial também a toda a minha família, por todos os ensinamentos e pelo impulso que me foram dando.

Aos meus orientadores, Professora Doutora Helena Gervásio e Professor Doutor Paulo Santos, agradeço, principalmente, a paciência e a compreensão que foram tendo comigo. Agradeço a partilha de ideias, de conhecimento, de sugestões e, também, a resiliência que demonstraram acompanhando-me neste trabalho. São a imagem de todos os Professores que se cruzaram comigo no meio académico e que continuam a enaltecer este Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

À Laura, a namorada que nunca me deixa baixar os braços e que sempre está ao meu lado para me apoiar e para me fazer acreditar que tudo está ao nosso alcance, um muito obrigado, do fundo do coração.

A todos os meus amigos, colegas de faculdade, companheiros, que ao longo dos anos têm vindo a partilhar comigo as vivências que nos fazem crescer e evoluir. En Garde!

A todos aqueles que ao longo dos últimos anos têm contribuído para o meu desenvolvimento enquanto profissional. Um agradecimento aos colegas da TRIA, pela confiança e pela oportunidade que me proporcionaram no meu primeiro emprego; aos colegas da MARTIFER por toda a partilha de conhecimento e por me permitirem, junto de vós, deixar a nossa marca nos vários cantos do mundo.

A todos, o meu sincero agradecimento.

Resumo

Em conformidade com as Diretivas Europeias e com vista ao cumprimento das metas propostas pelo Conselho Europeu, os setores da indústria e da construção contribuirão para que a União Europeia alcance um impacto climático neutro até 2050.

Nesse sentido, torna-se da máxima importância o desenvolvimento de soluções passivas na construção de novos edifícios, bem como a utilização de materiais com baixa emissão de carbono ao longo do seu ciclo de vida, que permitirão obter edifícios cada vez mais sustentáveis, do ponto de vista energético e ambiental.

O desenvolvimento destas soluções, de acordo com a evolução da arquitetura vernacular e dos sistemas modulares em estrutura metálica, contribui positivamente para a afirmação deste novo conceito de edifícios passivos em Portugal.

Assim, este trabalho suporta-se em simulações numéricas do programa de análise energética *DesignBuilder*, e procura perceber a influência do clima na definição de soluções passivas com vista à redução das necessidades energéticas de sistemas de climatização e da influência da localização na conceção estrutural do edifício, através de uma análise estrutural recorrendo ao programa *Robot Structural Analysis Professional 2018*.

Para tal, foram realizadas duas análises a dois edifícios em Portugal, localizados em Coimbra e em Faro, com o objetivo de perceber a influência do local de implantação do edifício no que respeita ao desempenho estrutural (ex. requisitos em termos de ações estruturais) e a eficiência energética de soluções passivas em cada uma das regiões climáticas predominantes no território nacional.

Neste estudo compreendeu-se o papel das soluções passivas, nomeadamente de dispositivos de sombreamento e de proteção dos vãos envidraçados, na redução da temperatura máxima verificada no interior dos edifícios durante o verão. Em conjunto com a utilização de sistemas de climatização, será possível constatar que o recurso a este tipo de soluções permite garantir uma temperatura interior de conforto dentro do aceitável e uma redução dos gastos energéticos com sistemas de arrefecimento e aquecimento.

Palavras-chave: Sistemas passivos, eficiência energética, construção metálica, sustentabilidade

Abstract

In compliance with the European Directives and in order to achieve the targets proposed by the European Council, the sectors of industry and construction have to contribute to the aim of the European Union of reaching a neutral climate impact by 2050.

In this sense, it is of utmost importance the development of passive solutions when constructing new buildings. At the same time, the concomitant use of materials with low carbon emissions throughout their life cycle, will allow for increasingly sustainable buildings, both from the viewpoint of energy and environment.

The development of these solutions, aligned with the evolution of vernacular architecture and modular systems in metallic structures, contributes positively to the reinforcement of this new concept of passive buildings in Portugal.

To this aim, this work is supported by numerical simulations made by the software DesignBuilder (energy analysis program) and seeks to understand the influence of climate on the definition of passive solutions, reducing the energy needs of HVAC systems, and to infer the influence of location on the structural design of the buildings (through a structural analysis using the Robot Structural Analysis Professional 2018 program).

Analyses were carried out on two buildings in Portugal in different locations, Coimbra and Faro, in order to understand the structural behaviour of a building with different structural requirements (e.g. load actions) and the energy efficiency of passive solutions in each of the predominant climatic regions in national territory.

In this study, the role of passive solutions, namely shading devices and protection of glass openings, in reducing the maximum temperature observed inside buildings during the summer was understood. Together with the use of air conditioning systems, it is possible to conclude that the use of this type of solutions allows a comfortable interior temperature within an acceptable range and a reduction in energy costs with cooling and heating systems.

Keywords: Passive systems, energy efficiency, steel construction, sustainability

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento geral do tema	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Organização da dissertação	3
2	Construção e sustentabilidade: perspetiva nacional	4
2.1	Princípios da arquitetura vernacular	4
2.2	Casas passivas e eficiência energética dos edifícios	5
2.3	A sustentabilidade da construção modular	7
3	Metodologia adotada na otimização dos edifícios.....	9
3.1	Considerações gerais	9
3.1.1	Conceção arquitetónica do edifício	9
3.1.2	Localização e regiões climáticas	12
3.1.3	Enquadramento regulamentar	13
3.2	Conceção estrutural	13
3.2.1	Caraterização e quantificação das ações.....	14
3.2.1.1	Ações permanentes	15
3.2.1.2	Ações variáveis.....	15
3.2.2	Combinações das ações	16
3.2.3	Metodologia de cálculo	18
3.3	Estudo do comportamento térmico dos edifícios	18
3.3.1	Principais variáveis na análise.....	18
3.3.1.1	Envolvente do edifício.....	19
3.3.1.2	Ventilação.....	25
3.3.2	Modelação e metodologia de análise.....	26
3.3.2.1	Estudo paramétrico	28
4	Caso de estudo	30
4.1	Objetivos.....	30

4.2	Análise estrutural.....	30
4.2.1	Elementos estruturais.....	31
4.2.2	Ligações metálicas.....	32
4.2.3	Estudo comparativo das soluções.....	34
4.3	A importância das soluções passivas no desempenho térmico das habitações.....	35
4.3.1	Comportamento térmico passivo das soluções iniciais.....	36
4.3.1.1	Clima Csb – Coimbra.....	36
4.3.1.2	Clima Csa – Faro.....	38
4.3.2	Comportamento térmico passivo com base no estudo paramétrico.....	39
4.3.2.1	Clima Csb – Coimbra.....	40
4.3.2.2	Clima Csa – Faro.....	42
4.3.3	O papel do ar-condicionado.....	44
4.3.3.1	Clima Csb – Coimbra.....	44
4.3.3.2	Clima Csa – Faro.....	46
4.3.4	Análise ao consumo energético de sistemas de ar-condicionado.....	48
4.3.4.1	Clima Csb – Coimbra.....	48
4.3.3.2	Clima Csa – Faro.....	51
4.4	Análise de ciclo de vida.....	56
5	Conclusões e trabalhos futuros.....	57
5.1	Conclusões.....	57
5.2	Trabalhos futuros.....	59
	Referências bibliográficas.....	60
	Anexos.....	65

Abreviaturas

ACV – Análise de Ciclo de Vida

ADENE – Agência para a Energia

ANCV – Associação Nacional de Coberturas Verdes

Csa – Clima temperado húmido/mediterrâneo com verão seco e quente

Csb – Clima temperado húmido/mediterrâneo com verão seco e temperado

EAHE – *Earth-to-Air Heat Exchangers*

EIFS – *External Insulation and Finishing System*

EPS – *Expanded PolyStyrene*

ICB – *Insulation Cork Board*

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

LSF – *Light Steel Framing*

MW – *Mineral Wool*

NZEB – *Nearly Zero Energy Buildings*

OSB – *Oriented Strand Board*

PHI – *Passivhaus Intitut*

PHPT – Associação *Passivhaus* Portugal

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios

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

SCE – Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

XPS – *Extruded PolyStyrene*

1 Introdução

1.1 Enquadramento geral do tema

Numa altura em que importa evitar e atenuar os problemas do futuro, torna-se imperativo recordar e corrigir os erros do passado.

O ser humano, ofuscado pelo desenvolvimento industrial e tecnológico, não foi capaz de prever os problemas inerentes a vários anos deste desenvolvimento rápido e desorganizado que, na generalidade e em diversas áreas, nos aproximou com grande celeridade do ponto de não retorno no que se refere ao clima global. Esta questão, da máxima importância, pode pôr em causa o alcance da meta do Acordo de Paris, que pretende manter o aumento da temperatura média mundial abaixo dos 2°C em relação aos níveis pré-industriais.

Segundo as conclusões adotadas pelo Conselho Europeu em dezembro de 2020, fazendo cumprir o objetivo de uma União Europeia com impacto neutro no clima até 2050, foi necessário adotar medidas mais ambiciosas para a próxima década e repensar a forma de atuar em relação ao clima e à energia.

Neste âmbito, os setores da indústria e da construção são também obrigados a ter como princípios estas medidas, em conformidade com o incentivo ao crescimento económico, à criação de emprego e ao aumento da qualidade de vida dos cidadãos, de forma a promover a inovação tecnológica sustentável.

No que concerne ao setor industrial, desde cedo que este tem-se adaptado às condicionantes que lhe têm surgido e desde então é-lhe associado um conjunto de princípios que permitem esta fácil adaptabilidade, como por exemplo o *Lean Thinking*, com base na melhoria contínua, tem como objetivo eliminar desperdícios, reduzir custos e aumentar a produtividade e a qualidade de produto e de serviços, na procura da criação de uma cadeia de valor cada vez mais direcionada para sustentabilidade. Portanto, o caminho para o desenvolvimento sustentável e para o cumprimento das metas propostas passará também pelas Políticas Industriais da União Europeia, que influenciarão os restantes setores dependentes da indústria, como o caso do setor da construção.

Este setor, que de forma diferente tem-se adequadamente com muito engenho à evolução das necessidades das populações e contribuindo fortemente para a melhoria da qualidade de vida, no meio de sucessivas crises económicas e sociais, tem tido avanços importantes no

desenvolvimento tecnológico, na redefinição simplista e prática dos processos intrínsecos à construção e na procura de soluções alternativas e sustentáveis.

No entanto, há a necessidade de definir o campo de ação e os objetivos prioritários nos próximos tempos, e nesse sentido a União Europeia e os Estados Membros têm demarcado um conjunto de normativas e de metas que devem ser seguidas e atingidas.

A título de exemplo, as diretivas 2010/31/UE (relativa ao desempenho energético dos edifícios) e 2012/27/UE (relativa à eficiência energética), que têm sofrido alterações ao longo do tempo, através da diretiva 2018/844/UE por exemplo, visam a adoção de medidas que melhorem o desempenho energético e a eficiência energética dos edifícios, tendo em conta as condições locais e climáticas. Estas medidas deverão ter como base a aplicação da energia proveniente de fontes renováveis, de sistemas de aquecimento e arrefecimento passivo, de sombreamentos, da qualidade do ar interior, da luz natural e da conceção do edifício.

No seguimento destes pressupostos, o Estado Português elabora um conjunto de Decretos-Lei que asseguram a transposição das Diretivas Europeias, mas também uma revisão da legislação nacional, o que permite apresentar um Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), cada vez mais importantes e atuais na definição do comportamento sustentável dos edifícios em Portugal.

De facto, é notória a importância do setor industrial e do setor da construção e as sinergias existentes entre eles por forma a seguir o caminho da sustentabilidade, e é neste ponto que procuram convergir.

Quando os processos de fabrico e de desenvolvimento de novas soluções para a construção são cada vez mais otimizados do ponto de vista de custos e da sustentabilidade ambiental, o resultado final só poderá ser o mais benéfico possível para contribuir de forma positiva na construção de novos edifícios. Associado a isto, uma boa conceção arquitetónica, um estudo pormenorizado da eficiência e do desempenho térmico dos edifícios, dos materiais utilizados e um planeamento de obra bem estruturado levarão, certamente, a uma redução do impacto ambiental do setor da construção e, desta forma, a construção terá um papel preponderante na garantia da sustentabilidade ambiental.

1.2 Objetivos

Os objetivos propostos deste trabalho têm como campo principal de ação a avaliação da sustentabilidade e da eficiência energética em edifícios residenciais em estrutura metálica localizados em duas regiões distintas do território nacional, nas fases iniciais de projeto.

O estudo dividir-se-á em duas avaliações: uma direcionada para o pré-dimensionamento estrutural onde, após o processo de conceção estrutural do edifício e a definição das ações, será quantificada a necessidade de matéria-prima para cada uma das situações estudadas; e uma outra direcionada para a compreensão do desempenho térmico dos mesmos, tendo em conta, no estudo prévio das habitações, o papel das soluções passivas e a importância das mesmas na redução das necessidades energéticas de sistemas de climatização.

De forma geral, perceber-se-á a influência da localização no dimensionamento estrutural e, conseqüentemente, do clima na definição da envolvente exterior. O que irá ditar um conjunto de soluções passivas associadas ao espaço onde se inserem e que definirão um grupo de parâmetros importantes no bom desempenho energético de edifícios residenciais e que deverão ser considerados no processo de conceção arquitetónica e estrutural do edifício.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação é dividida em cinco capítulos, sendo este primeiro destinado ao enquadramento geral do tema e a importância da sua discussão no contexto atual. Resumidamente, são apresentados os objetivos gerais deste trabalho, assim como a respetiva organização do mesmo.

No segundo capítulo, procura-se contextualizar este tema no panorama nacional e a evolução do mesmo ao longo dos anos. Será apresentada a importância dos princípios da arquitetura vernacular portuguesa e o seu papel no desenvolvimento sustentável e, também, será exposto o estado da arte referente aos edifícios passivos e à construção modular.

O terceiro capítulo expõe a metodologia assumida neste trabalho, desde a conceção arquitetónica e estrutural dos edifícios e a respetiva localização dos mesmos, às principais variáveis e metodologia de análise no estudo do respetivo comportamento térmico.

O quarto capítulo apresenta os resultados das diferentes análises, tanto a nível estrutural como ao nível da importância das soluções passivas no desempenho térmicos dos edifícios, e a determinação da sustentabilidade das mesmas através de uma análise de ciclo de vida.

O quinto e último capítulo é destinado às conclusões finais e a sua importância na definição de novos trabalhos futuros.

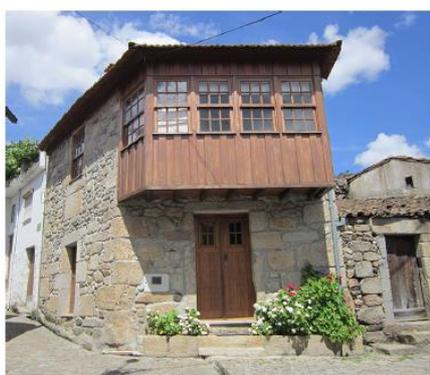
2 Construção e sustentabilidade: perspetiva nacional

2.1 Princípios da arquitetura vernacular

As diferentes regiões do território português distinguem-se, neste contexto, pela sua arquitetura própria, principalmente, a dos edifícios mais antigos. Estes cenários são resultado da constante evolução do edificado e das necessidades dos seus habitantes em melhorar as suas condições de habitabilidade e de vida, adaptando-se ao clima local, combatendo as estações do ano mais críticas do ponto de vista climático.

Ao longo dos anos foram sendo aprimoradas técnicas de construção e de aproveitamento da energia solar, nas zonas climáticas mais frias, e técnicas de proteção passiva, nas zonas mais quentes do território nacional, mitigando os efeitos dos ganhos solares. Esta evolução, em parceria com o bom aproveitamento dos recursos naturais e locais, corresponde aos princípios da arquitetura vernacular, que defendem que as habitações devem ser concebidas para os climas e para o espaço envolvente onde serão implantadas.

Por exemplo, são notórias as diferenças entre o edificado na Beira Alta e no Alentejo, Figura 2.1. As varandas envidraçadas, características dos edifícios da Beira Alta, tem um papel importante na maximização dos ganhos solares; no Alentejo prevalece a necessidade de arrefecimento na estação mais quente, por isso os edifícios tradicionais apresentam uma forte inércia térmica, o uso de cores claras e vãos envidraçados de dimensões reduzidas (Fernandes, J. et al, 2015).



a)



b)

Figura 2.1 – Edificado na Beira Alta (a) e no Alentejo (b), (Fernandes, J. et al, 2015)

Por isto, torna-se premente a utilização deste conceito no panorama atual, servindo de base ao desenvolvimento sustentável da construção. Uma análise cuidada da localização, da exposição e do clima do lugar permitem, por meios naturais, melhorar o comportamento térmico das habitações.

Estes princípios comprovam que as estratégias bioclimáticas são fatores relevantes na conceção de um edifício. Estas estratégias, que abordam as variáveis climáticas existentes no local e a sua interação com os edifícios, não são mais que um conjunto de medidas de caráter geral que influenciam a arquitetura e o projeto de habitações, com o objetivo de promover um bom desempenho em termos de adaptação ao clima e, conseqüentemente, proporcionar o conforto térmico no interior dos edifícios.

Em conclusão, o conhecimento e a implementação, com as devidas adaptações, das estratégias passivas utilizadas na construção dos edifícios mais antigos podem contribuir positivamente para o desenvolvimento da arquitetura contemporânea, mostrando assim a importância da arquitetura vernacular no desenvolvimento de edifícios eficientes do ponto de vista energético (Correia da Silva, J. J. e Sirgado, J. 2015).

2.2 Casas passivas e eficiência energética dos edifícios

Surge, formalmente, na década de 80, o conceito de casas passivas, caracterizando-as como casas de baixos consumo energético. Projetadas com o intuito de aproveitar o contributo das energias renováveis, principalmente da energia solar, e de tecnologias passivas, têm como característica principal a redução dos gastos com energia elétrica, tornando-os praticamente nulos.

Este conceito não é recente do ponto de vista prático e, como já vimos neste capítulo, os princípios associados à arquitetura passiva foram desde cedo evoluindo com o desenvolvimento do edificado vernacular.

Todavia, o seu estudo mais aprofundado é iniciado na Alemanha onde está sediado o *Passivhaus Institut* (PHI), que, através da investigação científica e de ensaios exigentes sobre esta matéria, desenvolveu a norma *Passivhaus* com o objetivo de reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas à utilização dos edifícios e de melhorar a qualidade dos mesmos. Como exemplo, esta norma é obrigatória em alguns países e regiões, como no Luxemburgo, na Região de Bruxelas e no Distrito de Frankfurt, segundo a Associação *Passivhaus* Portugal (PHPT).

Esta Associação, instalada em Portugal desde 2012, procura implementar um conjunto de medidas que passam por fazer a transição progressiva do parque edificado nacional para níveis

de desempenho *Passive House*, garantindo a qualidade do ar interior, conforto térmico e acústico, ausência de patologias e eficiência energética. Neste sentido, e segundo a mesma, torna-se necessário implementar um conjunto de medidas, tais como:

- Reformulação da definição dos edifícios com necessidades quase nulas de energia, NZEB (“*Nearly Zero Energy Buildings*”);
- Implementação gradual ao nível municipal e regional;
- Estabelecer um programa alargado de monitorização da qualidade do parque edificado.

Neste momento, em Portugal, existem já algumas *Passive Houses* certificadas e outras em desenvolvimento, como por exemplo a Habitação Pagal, Figura 2.2, localizada em Santo Tirso. Onde se destaca, para além dos conceitos construtivos que esta norma exige, a sua arquitetura e exposição, a envolvimento com o meio ambiente e a utilização de materiais locais, fazendo deste caso um bom exemplo a ser seguido no progresso da construção em Portugal.



Figura 2.2 – Habitação Pagal, Santo Tirso
(Fonte: Associação Passivhaus Portugal (PHPT) e Homegrid)

Outros organismos têm tido, também em Portugal, um papel determinante na transição energética e na garantia de edifícios cada vez mais eficientes. A ADENE – Agência para a Energia é a entidade que tem como objetivos promover e realizar atividades de interesse público na área da energia, contribuindo com uma estratégia nacional, baseada nas políticas europeias, para melhorar as condições de conforto e salubridade dos edifícios.

Nesse contexto, é implementado em 2017 a Certificação Energética dos Edifícios, transpondo a Diretiva Europeia de Desempenho Energético dos Edifícios. Numa escala de 8 classes, onde A⁺ corresponde a um edifício muito eficiente e F a muito pouco eficiente, Figura 2.3, a certificação energética visa qualificar o conforto térmico e a melhoria das condições de habitabilidade, garantido uma redução dos gastos com eletricidade, gás e água e para além destas vantagens, os edifícios mais eficientes poderão vir a usufruir de benefícios fiscais.



Figura 2.3 – Escala da Certificação Energética dos Edifícios

Contudo, segundo o Estudo de mercado sobre a Eficiência Energética na Habitação Particular, desenvolvido pela ADENE em 2017, o desinteresse geral na adoção de medidas de eficiência energética deve-se, essencialmente, ao investimento inicial elevado e que, segundo o mesmo, não demonstra de forma imediata um aumento dos benefícios resultantes tanto ao nível monetário, como de conforto da habitação e da saúde dos ocupantes. Por isso, é da máxima importância a consciencialização e a partilha de informação sobre o tema, salientando os seus benefícios, sejam eles a médio ou a longo prazo.

2.3 A sustentabilidade da construção modular

Com o desenvolvimento tecnológico, o setor da construção, ao longo dos anos, tem contribuído para a adoção de medidas e de soluções técnicas que tem um impacto direto na sociedade e na economia, sendo desta forma que se assume como um setor importante na implementação de um plano estratégico para a energia e para a sustentabilidade.

Neste âmbito, a construção metálica tem contribuído positivamente para o desenvolvimento sustentável, dada a possibilidade de reciclagem e/ou reutilização dos seus materiais constituintes, minimizando assim a necessidade do consumo de recursos naturais e reduzindo as quantidades de resíduos resultantes da demolição. A par com estes princípios, uma abordagem às várias fases do ciclo de vida do projeto permite identificar as vantagens que este tipo de estruturas oferece.

De certo modo, desde a pré-fabricação destas soluções, que contribui positivamente para a eficiência do processo de construção, reduzindo o seu tempo e diminuindo riscos e prejuízos de obra, até a um possível desmantelamento da estrutura e reutilização dos elementos estruturais, a construção metálica representa uma alternativa viável à construção tradicional, no âmbito da sustentabilidade e dos pilares que a sustentam.

Assente nestes pressupostos, o conceito de construção modular tem ganho espaço no setor da construção civil em Portugal, substituindo, timidamente, as conceções tradicionais. Neste campo, a flexibilidade e adaptabilidade das soluções possibilitam uma boa harmonia entre a arquitetura e as estruturas portantes, permitindo facilmente a sua modificação e extensão de maneira a adaptarem-se a novas formas e exigências arquitetónicas.

É exemplo disso a construção de edifícios em estruturas modulares em aço enformado a frio, vulgarmente conhecidas como estruturas em aço leve ou em LSF (*Light Steel Framing*). A construção em LSF é, na maior parte das vezes, indicada para a construção de edifícios residenciais unifamiliares, Figura 2.4 (a), mas tem ganho também grande relevância na reabilitação de edifícios antigos, Figura 2.4 (b).



Figura 2.4 – Moradia unifamiliar na Sertã (a) e reabilitação de edifício antigo em Sintra (b)
(Fonte: Futureng)

Contudo, no geral, existe alguma resistência à opção por este conceito, não só pela falta de conhecimento e pela perceção de insegurança que está associada às soluções que se afastam das tradicionais, como também devido a alguns cuidados que devem ser tidos em conta a nível da eficiência térmica, pois a fraca inércia térmica dos edifícios em LSF é combatida por soluções de caixilharia e proteção solar com relativa qualidade, o que poderá ter um impacto negativo nos custos associados.

Pelo exposto, a construção metálica modular representa uma aposta credível no desenvolvimento sustentável e na melhoria dos processos construtivos, garantindo os requisitos de qualidade, previamente garantidos no processo de fabrico e posteriormente na sua rápida aplicação em obra. O uso de materiais reutilizáveis ou recicláveis e a otimização do processo de montagem, reduzindo os custos e a necessidade de mão de obra, são os principais fatores que fazem deste conceito o futuro da construção.

3 Metodologia adotada na otimização dos edifícios

O presente capítulo pretende expor os princípios que serviram de base ao desenvolvimento e à análise das soluções propostas. Dividindo-se em três partes, apresenta conceitos gerais no âmbito da conceção arquitetónica e da localização dos edifícios, pressupostos que estiveram na base do pré-dimensionamento estrutural e algumas considerações que foram tidas em conta na modelação e no estudo do comportamento térmico dos mesmos.

3.1 Considerações gerais

Algumas dessas considerações são, na generalidade, transversais aos modelos considerados e definem desde logo importantes parâmetros que serão mantidos ao longo do estudo.

3.1.1 Conceção arquitetónica do edifício

O ponto de partida desta análise começa pela definição e pela conceção do edifício. Nesse sentido optou-se por idealizar uma moradia unifamiliar com dois pisos, Figura 3.1.



Figura 3.1 – Modelo computacional da moradia

Como ilustrado na Figura 3.2, o piso 0, no rés-do-chão, é constituído por uma cozinha, uma sala de estar e uma casa de banho; e o piso 1 é constituído por três quartos com casa de banho privativa e uma sala de estar. A moradia dispõe ainda de um terraço no piso 1 com acesso aos quartos.

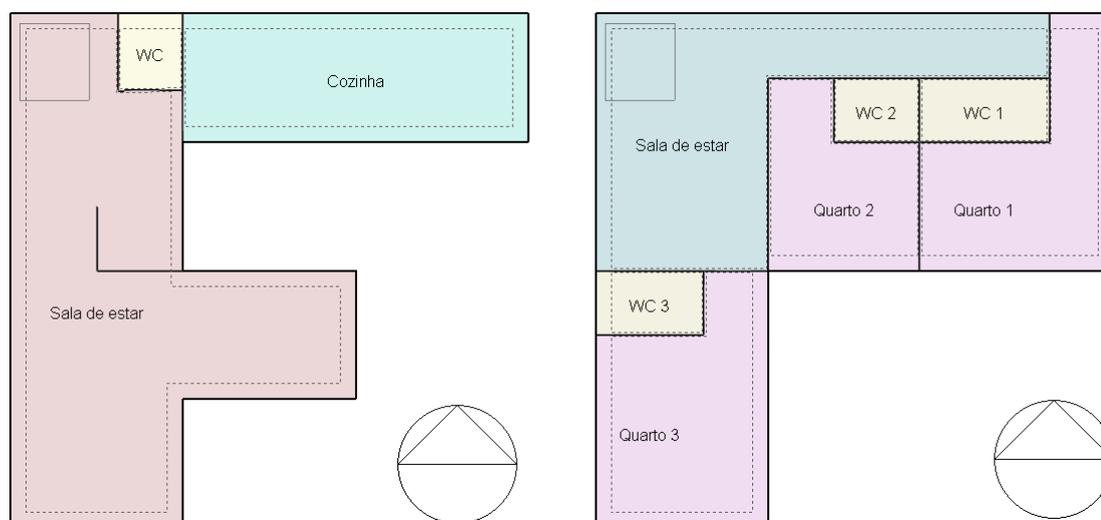


Figura 3.2 – Planta do piso 0 (Esq.) e planta do piso 1 (Dir.) da moradia

Com o objetivo de caracterizar a área envolvente do edifício, quantificando as áreas opacas e envidraçadas por cada alçado, como indicado no Quadro 3.1, é de notar a percentagem de área envidraçada na fachada virada a sul (36.9%). Como pretendido, será através da área envidraçada que podemos tirar partido dos ganhos solares, mas para determinadas alturas do ano, nomeadamente, nas estações mais quentes, apresentar grandes áreas envidraçadas pode ser desfavorável na análise do comportamento térmico da habitação, uma vez que poderão ser observados fenómenos de sobreaquecimento das divisões que apresentarem maiores áreas envidraçadas e que se encontram mais expostas.

Quadro 3.1 - Envolvente exterior vertical

Fachada	Área total [m ²]	Área opaca		Área envidraçada	
		[m ²]	[%]	[m ²]	[%]
Norte	72.00	64.80	90.0%	7.20	10.0%
Sul	72.00	45.44	63.1%	26.56	36.9%
Este	72.00	55.80	77.5%	16.20	22.5%
Oeste	72.00	64.80	90.0%	7.20	10.0%
Total	288.00	230.84	80.2%	57.16	19.8%

No seguimento desta caracterização, importa ainda referir a área de implantação do edifício de 84 m², equivalente à área interior do piso 0, e de 96 m², relativamente ao piso 1 e à cobertura plana da habitação, representadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Envolvente exterior horizontal

Envolvente	Área total [m ²]	Área opaca	
		[m ²]	[%]
Implantação (Piso0)	84.00	84.00	100.0%
Telhado (Piso 1)	96.00	96.00	100.0%
Terraço	48.00	48.00	100.0%
Total	228.00	228.00	100.0%

Numa primeira fase, de conceção e de definição da arquitetura do edifício, é importante garantir a interoperabilidade entre a arquitetura e o dimensionamento estrutural de forma a quantificar e qualificar os principais fatores do desempenho térmico do edifício, assim será possível garantir os princípios de sustentabilidade, otimizando soluções e aumentando a eficiência energética das mesmas (Geletka e Sedlakova, 2012).

Desta forma e através de determinados parâmetros torna-se possível avaliar a compacidade do edifício e tecer algumas considerações sobre a importância do fator de forma do modelo original, exposto no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Medições totais e fator de forma do modelo

Envolvente	Total [m ²]	Área opaca		Área Envidraçada	
		[m ²]	[%]	[m ²]	[%]
	516.00	458.84	88.9%	57.16	11.1%
Totais					
Área de construção [m ²]			Volume de construção [m ³]		
180.00			540		
Fator de forma modelo original			0.96		

Sendo este fator o quociente entre a área da envolvente e o volume de construção, é compreensível que esta relação nos leve a perceber, numa fase inicial, as necessidades energéticas do edifício, porque edifícios menos compactos, com elevados fatores de forma, terão maiores áreas expostas, o que potenciará o aumento das trocas de energia com o exterior (Leal, R. 2015).

3.1.2 Localização e regiões climáticas

Um dos parâmetros inerentes à construção da moradia está relacionado com a sua localização, que terá impacto no comportamento térmico dos edifícios e também no estudo do seu comportamento estrutural.

Posto isto, avaliar-se-ão duas habitações em Portugal, localizadas em Coimbra e em Faro. A escolha destas localizações, como referido anteriormente, tem a ver com futuras considerações no dimensionamento estrutural, nomeadamente, na definição das ações e com os parâmetros associados às regiões climáticas onde serão inseridas.

No caso de Coimbra pretende-se analisar uma solução inserida numa malha urbana mais densa, e no caso de Faro irá ser analisada uma solução mais próxima da zona costeira, exposta a outro tipo de condições climáticas.

Estas duas cidades encontram-se em regiões climáticas distintas e predominantes no território nacional, segundo o sistema Köppen-Geiger. A cidade de Coimbra está inserida na região Csb, caracterizada por um clima temperado com verão seco e suave e a cidade de Faro encontra-se na região Csa, que apresenta um clima temperado com verão quente e seco, Figura 3.3.

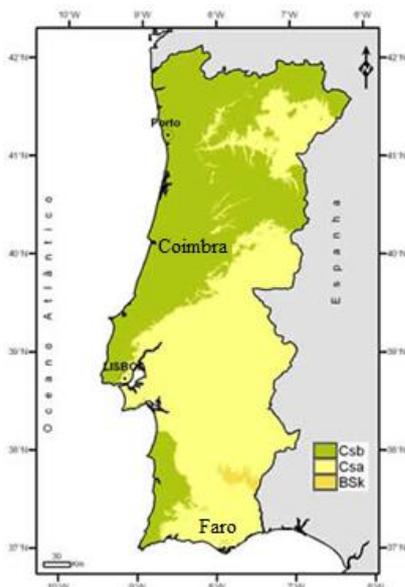


Figura 3.3 – Classificação climática segundo Köppen-Geiger para Portugal continental
(Fonte: IPMA)

É ainda possível observar uma pequena região do Baixo Alentejo, que nos remete para o clima BSk (clima árido de estepe fria da latitude média), mas que não será considerado nesta análise.

3.1.3 Enquadramento regulamentar

Transversal a este estudo, são também as normativas que servirão de base ao pré-dimensionamento estrutural e à análise do comportamento térmico das habitações.

Resumidamente, os eurocódigos estruturais, com os respetivos anexos nacionais, serão a base do pré-dimensionamento apresentado. No âmbito da caracterização e quantificação das ações seguiremos as:

- NP EN 1990:2009 – Bases para o projeto de estruturas
- NP EN 1991:1-1:2009 – Ações em estruturas – Parte 1-1: Ações gerais – Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios
- NP EN 1991:1-3:2009 – Ações em estruturas – Parte 1-3: Ações gerais – Ações da neve
- NP EN 1991:1-4:2010 – Ações em estruturas – Parte 1-4: Ações gerais – Ações do vento

E no âmbito do dimensionamento estrutural, nomeadamente no que se refere ao pré-dimensionamento da estrutura metálica, serão seguidas as:

- NP EN 1993-1-1:2010 – Projeto de estruturas de aço – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios
- NP EN 1993-1-8:2010 – Projeto de estruturas de aço – Parte 1-8: Projeto de ligações

No contexto da análise térmica serão tidos em conta alguns princípios que a legislação nacional apresenta, por exemplo, através do:

- Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação (REH)

3.2 Conceção estrutural

A construção metálica tem tido nos últimos tempos um desenvolvimento considerável na definição de novas soluções e de novos conceitos associados a estruturas para edifícios residenciais.

Contudo, na maioria dos casos, as soluções estruturais ainda passam por soluções em betão armado e revestimentos tradicionais em alvenaria. Sendo estas menos sustentáveis e de construção mais morosa.

É, por isso, pertinente criar uma visão mais fiável da construção metálica e dos seus elementos estruturais, no sentido da procura de soluções sustentáveis e capazes de corresponder às exigências colocadas.

Nesse sentido, é concebida uma solução estrutural constituída por perfis metálicos, da classe S355, do tipo I ou H para elementos viga e elementos coluna, respetivamente.

Com uma malha de pilares uniformemente distribuída, partindo de um modelo inicial de 4x3x3 metros, adotou-se, conforme ilustrado na Figura 3.4, uma solução mais simples, permitindo a utilização do conceito de construção modular, possibilitando outras soluções arquitetónicas associadas à versatilidade que este tipo de estruturas apresenta.

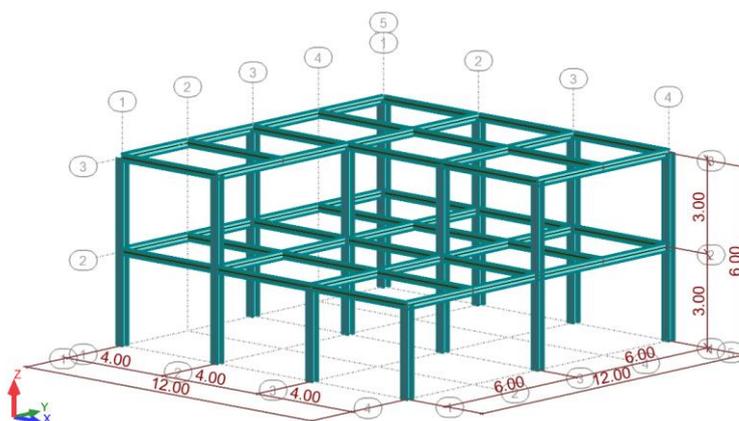


Figura 3.4 – Modelo estrutural

Ainda sobre a conceção estrutural, de forma sucinta, serão considerados dois tipos de ligações aparafusadas: um tipo de ligação com transmissão de momentos (ligação viga-coluna eixo forte) e outro tipo de ligação sem transmissão de momentos (ligações viga-coluna eixo fraco e viga-viga). Importa ainda referir que a base dos pilares é encastrada nas três direções.

Por fim, as lajes do edifício serão do tipo laje mista constituídas por chapas metálicas perfiladas e betão da classe C25/30, tendo sido considerado no modelo estrutural o “efeito de diafragma” provocado pelas mesmas.

Partindo do princípio associado à construção modular e à facilidade de adoção de novas formas e de novas soluções arquitetónicas, não se consideraram contraventamentos ao nível das paredes exteriores.

3.2.1 Caracterização e quantificação das ações

Sucintamente, neste subcapítulo, definir-se-ão os valores das ações considerados neste estudo. Tratando-se de um pré-dimensionamento, consideraram-se apenas algumas ações relevantes nesta fase de projeto. Note-se que a ação sísmica não foi considerada condicionante por se tratar de uma moradia com apenas 2 pisos e uma altura total de 6 m.

3.2.1.1 Ações permanentes

Para ações permanentes, que englobam o peso próprio da laje mista (0.50 kN/m^2), das paredes divisórias interiores (1.00 kN/m^2) e dos acabamentos e das restantes cargas permanentes (0.70 kN/m^2), determinou-se um valor de 2.20 kN/m^2 .

3.2.1.2 Ações variáveis

Caraterizam-se de seguida as ações de natureza não permanente, relacionadas com o tipo de utilização e com as condições ambientais:

- Sobrecarga de utilização

No âmbito das ações variáveis associadas ao tipo de utilização do edifício, definiu-se, de acordo com a NP EN 1991-1-1, uma sobrecarga de utilização da categoria A, referente a atividades domésticas e residenciais, de 2.00 kN/m^2 .

- Ação da neve

De acordo com a NP EN 1991-1-3 determinou-se a sobrecarga associada ao peso da neve para situações de projeto persistentes ou transitórias e para as duas localizações de 0.18 kN/m^2 , para Coimbra, e de 0.07 kN/m^2 , para Faro. Segundo o zonamento apresentado na Figura 3.5.

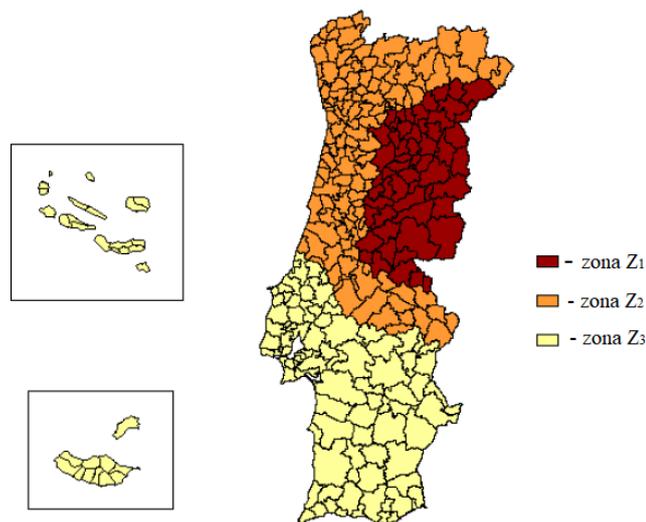


Figura 3.5 – Zonamento do território nacional para a ação da neve
(de acordo com a NP EN 1991-1-3)

Partindo dos seguintes pressuposto, no caso de Coimbra (Zona 2), considerou-se uma altitude média de 193 metros e topografia normal, e para Faro (Zona 3) admitiu-se uma altitude média de 80 metros e uma topografia exposta ao vento.

- Ação do vento

Na definição da ação do vento, de acordo com a NP EN 1991-1-4, assumiu-se, com base no anexo nacional, que Coimbra está abrangida pela Zona A, (a generalidade do território português, com $v_{b,0}=27.00$ m/s) e que Faro pertence à Zona B, (assumindo que se situa numa faixa costeira com 5 km de largura, com $v_{b,0}=30.00$ m/s). Consequentemente, leva-nos também a ter em conta a categoria de terreno e no caso de Coimbra considerou-se que o edifício se encontra numa zona na qual 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 metros e no caso de Faro considerou-se que a habitação está inserida numa zona costeira exposta aos ventos do mar.

Resumidamente, e no seguimento das considerações anteriores, determinou-se que a pressão dinâmica de pico é de 0.54 kN/m² e 1.52 kN/m², respetivamente para Coimbra e Faro.

Assumindo desde já um edifício de planta retangular, Figura 3.6, de forma conservativa, a pressão exercida nas paredes verticais ronda o valor máximo de sucção de 0.75 kN/m² e o valor máximo de pressão de 0.55 kN/m², no edifício em Coimbra, para Faro o valor máximo de sucção é de 2.13 kN/m² e o valor máximo de pressão é de 1.57 kN/m². Contudo, neste pré-dimensionamento desprezou-se o efeito da ação do vento na cobertura.

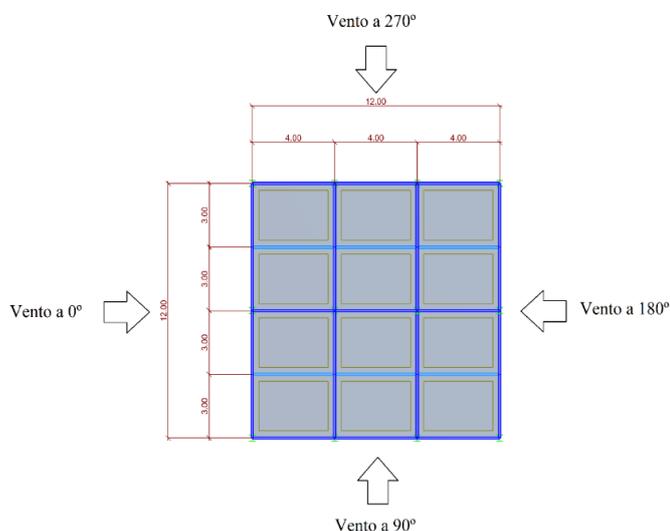


Figura 3.6 – Direções do vento consideradas na análise

3.2.2 Combinações das ações

De acordo com os regulamentos apresentados anteriormente e de acordo com os princípios de dimensionamento em relação aos estados limites, em conformidade com a NP EN 1990,

definiram-se um conjunto de combinações das ações abrangendo os estados limites últimos e os estados limites de utilização.

Resumidamente, para os estados limites últimos consideraram-se as seguintes combinações de ações:

- Combinações de ações para situações de projeto persistentes ou transitórias (combinações fundamentais)

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Para os estados limites de utilização as combinações de ações consideradas são:

- Combinações de ações características

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

- Combinações de ações frequentes

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- Combinações de ações quase-permanentes

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Resta definir os valores dos coeficientes que integram as combinações de ações referidas. No Quadro 3.4 são indicados os valores para os coeficientes ψ para edifícios e no Quadro 3.5 apresentam-se os valores recomendados para os coeficientes parciais de segurança γ .

Quadro 3.4 – Valores recomendados para os coeficientes ψ para edifícios

Categoria de utilização	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga da categoria A: zonas de habitação	0.70	0.50	0.30
Ação da neve (obras localizadas à altitude $H \leq 1000\text{m}$ acima do nível do mar)	0.50	0.20	0.00
Ação do vento em edifícios	0.60	0.20	0.00

Quadro 3.5 – Valores recomendados para os coeficientes parciais de segurança γ

$\gamma_{Gj,sup} = 1,35$ (nos casos desfavoráveis)
$\gamma_{Gj,inf} = 1,00$ (nos casos favoráveis)
$\gamma_{Q,i} = 1,50$ (nos casos desfavoráveis)
$\gamma_{Q,i} = 0,00$ (nos casos favoráveis)

3.2.3 Metodologia de cálculo

No seguimento dos pressupostos de cálculo expostos até então, no que diz respeito a conceção e à análise estrutural, resta explicar a metodologia de cálculo e as limitações que os eurocódigos estruturais determinam para o pré-dimensionamento apresentado.

Por isso, devem ser definidos os princípios que serviram de base ao pré-dimensionamento e que serão considerados nesta análise.

Ao nível da resistência estrutural e do comportamento dos elementos estruturais (vigas e colunas), com o auxílio do software de cálculo estrutural utilizado (*Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2018*), de acordo com a NP EN 1993-1-1, será realizada uma análise elástica de primeira ordem à resistência das secções transversais dos elementos e a verificação da resistência dos mesmos à encurvadura para as combinações de ações mais condicionantes nos estados limites últimos. Da mesma forma e através do mesmo software serão pré-dimensionadas as ligações da estrutura metálica, neste caso de acordo com a NP EN 1993-1-8.

Para as combinações de ações dos estados limites de serviço, serão comparados os valores dos deslocamentos máximos obtidos com os limites definidos nas normas indicadas. Estes limites são $\delta_{max} = L/250$, para os deslocamentos verticais em pavimentos em geral, e para os limites horizontais para edifícios de vários pisos é sugerido um limite em cada piso de $h/300$ e na estrutura global $h_0/500$, em que L representa o vão da viga, h a altura da coluna ou do piso e h_0 a altura da estrutura ou do edifício.

3.3 Estudo do comportamento térmico dos edifícios

No que se refere ao estudo do comportamento térmico dos edifícios é necessário caracterizar alguns fatores importantes no desempenho térmico dos mesmos, assim como a metodologia adotada e o método comparativo que levará à análise das soluções apresentadas.

3.3.1 Principais variáveis na análise

Alguns destes fatores foram já indicados neste capítulo, como por exemplo a localização dos edifícios e as regiões climáticas em que estão inseridos, assim como a própria conceção

arquitetónica que já nos remete para os conceitos de forma e de compacidade do edifício e para a própria orientação do mesmo. Contudo, resta apresentar os principais fatores que serão importantes na definição do estudo paramétrico e que serão as principais variáveis nesta análise.

3.3.1.1 Envolvente do edifício

Um desses fatores é a envolvente do edifício, que, de forma sucinta, é constituída por elementos construtivos opacos do tipo paredes, pavimentos ou coberturas e por elementos envidraçados, e tem um papel importante na definição das condições de conforto do ambiente interior, daí ser da máxima importância a definição de soluções construtivas capazes de responder às necessidades dos utilizadores.

Embora a construção em Portugal ainda se encontre um pouco dependente das soluções tradicionais, o desenvolvimento da engenharia de fachadas tem trazido novas soluções, mais eficazes no seu desempenho térmico e acústico e mais sustentáveis do ponto de vista ambiental e social, acabando por permitir, também, vencer os desafios que a arquitetura impõe.

Nesse sentido, e de acordo com as diretrizes da União Europeia, são impostos limites máximos para os valores de referência dos coeficientes de transmissão térmica para as diferentes zonas climáticas em Portugal que garantem a qualidade térmica da envolvente, como sugerido na Tabela I.01 da Portaria n.º 379-A/2015. No Quadro 3.6 deste documento são apresentados os limites referidos anteriormente para as zonas climáticas de Coimbra (I2) e Faro (I1) de acordo com Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação. De certo modo serão tidos em conta na definição de alguns elementos da envolvente em estudo, muito embora a análise do comportamento térmico das habitações não seja realizada pelo regulamento referido.

Quadro 3.6 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados de acordo com a Tabela I.01 da Portaria n.º 379-A/2015

Zona corrente da envolvente:		Zona climática	
		I1 (Faro)	I2 (Coimbra)
Em contacto com o exterior ou com espaços não uteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} > 0.70$	Elementos opacos verticais U_{ref} [W/(m ² .°C)]	0.50	0.40
	Elementos opacos horizontais U_{ref} [W/(m ² .°C)]	0.40	0.35
Vãos envidraçados (portas e janelas) U_w (W/(m ² .°C))		2.80	2.40

- Elementos opacos: paredes e cobertura

É através destes elementos que uma grande parte da transferência de calor ou de energia ocorre, e por isso uma boa conceção da envolvente opaca permitirá obter um balanço energético eficiente, isolando o ambiente interior das temperaturas mais altas verificadas na estação de arrefecimento e mantendo uma temperatura interior mais confortável na estação de aquecimento.

Neste âmbito, são utilizados vários tipos de isolamento térmico, mesmo nas soluções mais tradicionais em alvenaria de tijolo, que contribuem para uma melhoria do conforto térmico. Os isolamentos térmicos mais vulgares e que serão considerados neste estudo são, por exemplo:

- Polistireno expandido extrudido (XPS);
- Poliestireno expandido moldado (EPS);
- Lã mineral (MW).

Porém, ao longo do tempo têm sido estudadas e concebidas alternativas a estes materiais com o objetivo de desenvolver soluções mais sustentáveis, são exemplos disso:

- O aglomerado de cortiça expandida (ICB), que provém dos desperdícios do processo industrial corticeiro e apresenta um elevado desempenho no isolamento térmico e acústico. Podendo ser aplicado em paredes exteriores, interiores e em lajes e coberturas.
- E, como exemplo de desenvolvimento de soluções neste âmbito, o projeto RiceHUSK+ desenvolvido por um conjunto de entidades como a FARCIMAR, Instituto Superior Técnico e o ITECONS, procura tirar partido das propriedades da casca de arroz (baixa densidade e elevada porosidade) adicionando-a a uma base cimentícia por forma a conceber um produto pré-fabricado com menor massa volúmica e com elevado desempenho térmico e acústico.

Posto isto, fazendo parte integrante dos sistemas de envolventes opacas, estes materiais isolantes em conjunto com outros materiais que conferem alguma rigidez aos elementos de fachada, tem contribuído para o desenvolvimento de soluções cada vez mais adotadas na construção, como por exemplo os sistemas de paredes em LSF que serão tidos em conta neste estudo apenas como sistemas de revestimento exterior.

No caso destas soluções em estruturas de aço leve, são utilizadas placas de OSB pelo exterior e por forma a melhorar o comportamento térmico da envolvente e de maneira a eliminar possíveis pontes térmicas é adicionado à solução o sistema EIFS (*External Insulation and Finishing System*), que é constituído por placas de poliestireno expandido. De acordo com a bibliografia seguida, esta solução utiliza ainda argamassas de cola de cimento à base de resinas com polímeros, reforçada com armadura em fibra e, como acabamento final, as fachadas são

pintadas com um revestimento impermeável; o que perfaz uma solução eficiente do ponto de vista da proteção do edifício contra infiltrações, fissuras estruturais e das variações resultantes das amplitudes térmicas. Na Figura 3.7, é ilustrada a configuração desta solução, assim como os materiais que a constituem.

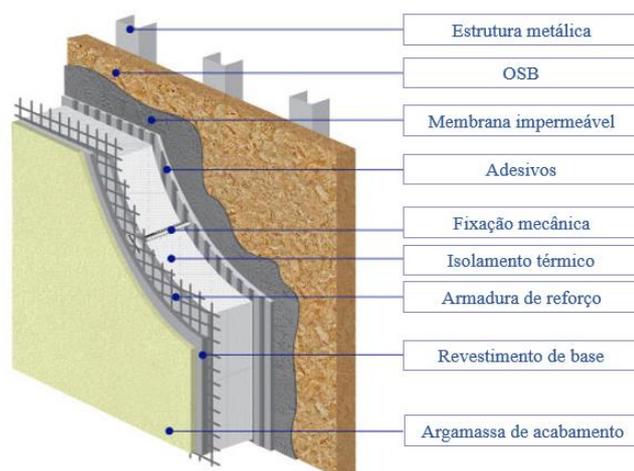


Figura 3.7 – Pormenor construtivo do sistema EIFS
(Fonte: TERRACO®)

No último ponto relativo aos elementos opacos, resta definir a tipologia dos pavimentos dos edifícios. Nesse sentido, serão consideradas lajes mistas de aço-betão às quais são associados elementos de isolamento térmico e acústico e elementos de acabamento exterior.

No que concerne aos elementos da cobertura, será dada relevância à tipologia de coberturas verdes, que tem alcançado ao longo do tempo uma grande expansão e apresentam desde logo várias vantagens do ponto de vista da sustentabilidade ambiental, paisagística e do comportamento térmico e acústico dos edifícios.

Resumidamente, e segundo a Associação Nacional de Coberturas Verdes (ANCV), esta tipologia de coberturas apresenta um conjunto de mais-valias, desde o aumento da eficiência energética à redução dos custos de energia dos edifícios, verificando-se uma redução do impacto da ação térmica dos raios solares, das necessidades de sistemas de aquecimento/arrefecimento, e, para além do impacto natural que causa na paisagem urbana, as coberturas verdes têm um papel importante na absorção de gases poluentes e de partículas tóxicas.

O sistema construtivo é ilustrado na Figura 3.8 e será considerado no estudo que se seguirá.

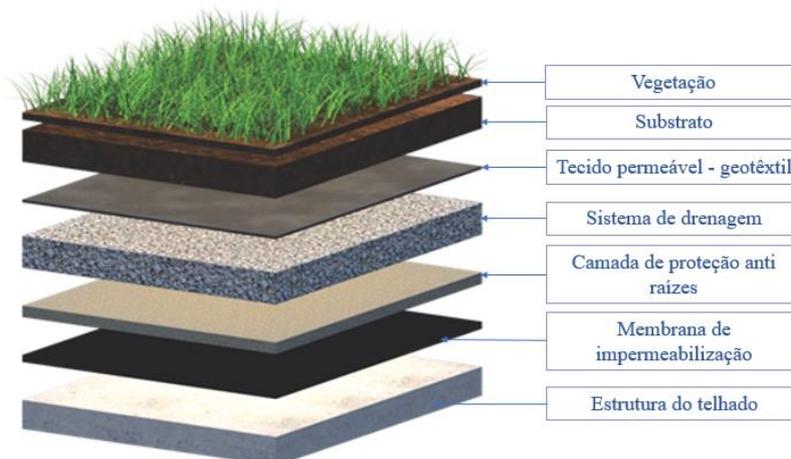


Figura 3.8 – Pormenor construtivo do sistema de coberturas verdes
(Fonte: Ecotecnologias.org)

No que diz respeito aos pavimentos interiores, a tipologia de pavimento utilizada, para além dos elementos que perfazem a laje (chapa metálica perfilada e betão), tem ainda na parte inferior um sistema de teto falso em gesso cartonado e lâ mineral, e na parte superior uma camada de isolamento térmico e acabamento em madeira, como ilustrado na Figura 3.9.

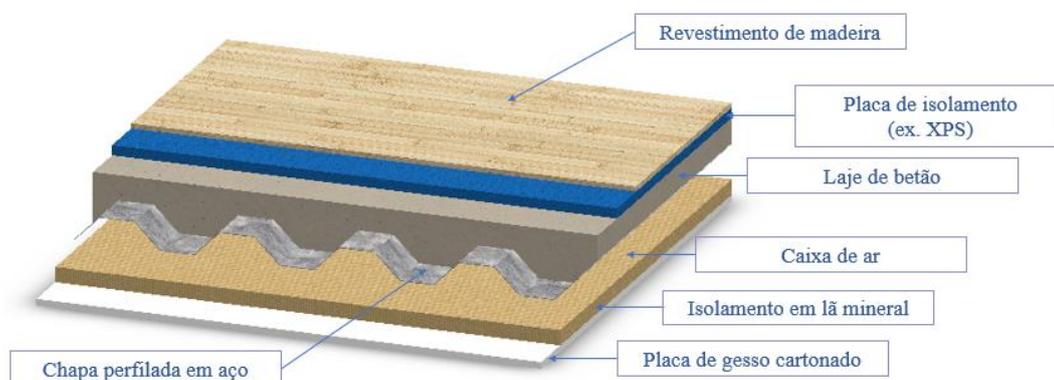


Figura 3.9 – Pormenor construtivo do pavimento interior

Tendo como base as soluções construtivas apresentadas anteriormente, foram definidas possíveis composições dos elementos opacos da envolvente das habitações. Em suma, apresentam-se de seguida, no Quadro 3.7, as características da envolvente opaca em estudo.

Posteriormente, nos anexos deste documento serão apresentados em detalhe os elementos que constituem as soluções referidas.

Quadro 3.7 – Resumo das propriedades da envolvente opaca em estudo

Clima Csb - Coimbra			Clima Csa - Faro		
Envolvente	Espessura [mm]	U [W/(m ² .°C)]	Envolvente	Espessura [mm]	U [W/(m ² .°C)]
Parede exterior	361.8	0.234	Parede exterior	321.8	0.304
Parede interior	88.0	0.631	Parede interior	90.0	0.510
Telhado	699.2	0.251	Telhado	659.2	0.355
Pavimento interior	558.3	0.255	Pavimento interior	518.3	0.364
Pavimento exterior	588.9	0.214	Pavimento exterior	508.3	0.413
Pavimento piso térreo	379.1	0.421	Pavimento piso térreo	379.1	0.421

Em comparação com os valores do coeficiente de transmissão térmica de referência indicados no REH, é possível verificar, no Quadro 3.8, que os valores do coeficiente de transmissão térmica para a envolvente exterior definida para Coimbra são inferiores aos valores indicados no regulamento referido. Na solução definida para Faro, as paredes exteriores e o telhado cumprem os requisitos assinalados, no entanto o pavimento exterior apresenta um valor ligeiramente superior ao limite estipulado.

Quadro 3.8 – Comparação dos valores do coeficiente de transmissão térmica determinados (U) com os valores de referência (U_{ref}) indicados no REH

Coimbra	U [W/(m ² .°C)]	U_{ref} [W/(m ² .°C)]	Faro	U [W/(m ² .°C)]	U_{ref} [W/(m ² .°C)]
Parede exterior	0.234	0.400	Parede exterior	0.304	0.500
Telhado	0.251	0.350	Telhado	0.355	0.400
Pavimento exterior	0.214	0.350	Pavimento exterior	0.413	0.400

Importa ainda salientar, como princípio seguido na análise do comportamento térmico, que é assumido que possíveis pontes térmicas estão corrigidas e por isso não serão calculadas ou tidas em conta neste estudo.

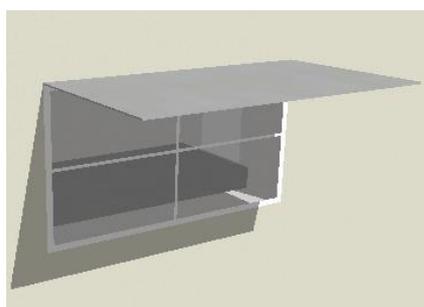
- Envidraçados

Os elementos envidraçados, constituintes de uma fachada, são os principais responsáveis pelos ganhos associados à energia solar. Na generalidade, as fachadas envidraçadas apresentam cada vez mais soluções eficientes do ponto de vista térmico e acústico e são muitas vezes utilizadas na totalidade da envolvente de qualquer tipo de edifício, independentemente do local onde está inserido. Várias soluções de vidro e de caixilharia permitem que esta utilização não comprometa as exigências relacionadas com a eficiência energética.

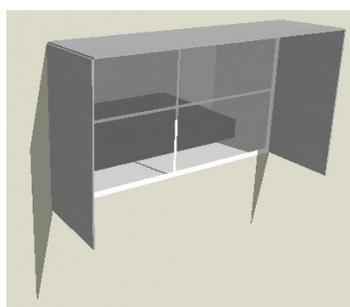
Nesse sentido, os fabricantes de envidraçados têm desenvolvido soluções que permitem a redução de gastos de aquecimento devido às menores perdas de energia no inverno, e no verão reduzem a entrada de calor na habitação, permitindo poupanças no consumo de ar condicionado.

Contudo, deverão ser sempre avaliados diversos parâmetros relacionados com o conforto térmico e com o comportamento acústico da solução. Essencialmente, o estudo da iluminação natural e dos seus efeitos levará à adoção de medidas e tecnologias passivas na envolvente dos edifícios, reduzindo o consumo energético e aumentando o nível de conforto.

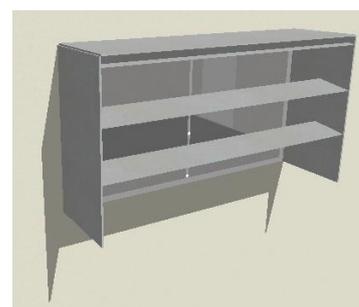
No âmbito deste estudo, será assumido apenas um sistema de envidraçados e serão alternadas as soluções de proteção passiva aos efeitos da radiação solar, como ilustrado na Figura 3.10. De certo modo, é assumido que os sistemas de sombreamento apresentados permitem ser desativados na estação de aquecimento e por isso serão maximizados os ganhos energéticos pelas janelas do edifício. Embora não representados, outros sistemas do tipo persiana ou estore serão também tidos em consideração na presente análise.



a) Pala de sombreamento
(1.0 m)



b) Palas de sombreamento
lateral e horizontal (0.5 m)



c) Palas de sombreamento
lateral e horizontal com
dispositivos intermédios de
sombreamento (0.5 m)

Figura 3.10 – Soluções de proteção passiva

Estes sistemas serão parte integrante dos envidraçados dos edifícios, que são constituídos por dois panos de vidro de 6mm e uma câmara intermédia de 13mm (preenchida com argon). Segundo o software utilizado, esta solução de janela terá um coeficiente de transmissão térmica de $2.51 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, sendo inferior a $2.80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, valor de referência indicado no REH para Faro, mas superior ao limite indicado para Coimbra de $2.40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

3.3.1.2 Ventilação

A ventilação, natural ou mecânica, será um dos fatores variáveis considerados na análise do desempenho térmico dos edifícios. A sua importância divide-se em dois campos: a melhoria da qualidade do ar interior, necessária por questões de salubridade e por manter o ar num estado higrométrico que evite a ocorrência de condensações interiores, e a redução dos custos de climatização na estação de arrefecimento, principalmente durante a noite.

Este processo natural de troca de massa de ar entre o interior e o exterior do edifício depende das diferenças de temperatura em cada um dos espaços ou da ação do vento, que pode influenciar significativamente o comportamento térmico do edifício, se não for considerada na fase de projeto. Contudo, poderá ocorrer também através de equipamentos mecânicos o que aumentará o consumo de energia.

Neste âmbito, várias soluções têm sido estudadas ao longo do tempo. Destacam-se, neste ponto, os sistemas de ventilação com permutadores de calor solo-ar (EAHE, *Earth-to-Air Heat Exchangers*), segundo o artigo sobre o desempenho térmico deste sistema (Rosa, Nuno et al, 2017), esta é uma solução viável como alternativa ou como um complemento aos sistemas tradicionais de ar condicionado, que consiste numa rede de tubos enterrados por onde o ar proveniente do exterior circula sob a ação de um ventilador, ilustrado na Figura 3.11. A elevada inércia térmica do solo reduz as variações diárias e sazonais da temperatura, permitindo fornecer ou dissipar calor nas estações de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

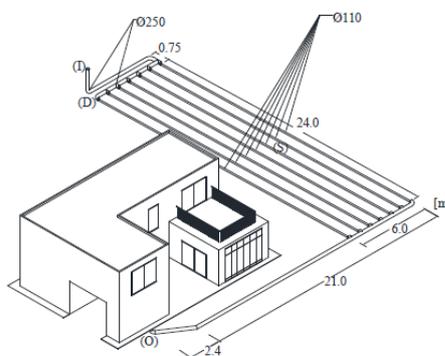


Figura 3.11 – Ilustração do caso de estudo do sistema EAHE (Rosa, Nuno et al, 2017)

No presente estudo não será considerado qualquer sistema de ventilação mecânica, pois é assumido que a ventilação ocorrerá de forma natural, através da abertura de janelas ou de infiltrações. Naturalmente, a modulação desta variável tem em conta um conjunto de regras de boa prática que inevitavelmente acontecem.

Como exemplo, no inverno devem ser reduzidas ou limitadas estas trocas de massa de ar com o exterior por forma a garantir uma temperatura interior nas condições de conforto. Porém, garantido a qualidade do ar interior, será considerado um valor mínimo 0.60 r/h (renovações horárias do ar interior) assumindo que este valor, ao longo do estudo, representa as infiltrações naturais. No verão, tendo em conta as temperaturas inferiores durante a noite e o limite máximo considerado para a temperatura interior durante a ocupação dos diferentes compartimentos, se durante essa ocupação a temperatura exterior for inferior à verificada no interior, irá ser acionada a ventilação natural que corresponderá a um valor máximo de 5.40 r/h que adicionado aos 0.60 r/h, perfaz um total de 6.00 r/h.

3.3.2 Modelação e metodologia de análise

Este estudo será realizado através do software *DesignBuilder*, que é uma ferramenta de modelação que permite criar e visualizar modelos 3D de qualquer tipo de edifício e simular modelos térmicos dos mesmos.

A modelação nos dois casos consistiu em definir a envolvente, a tipologia de edifício e consequentemente a tipologia das divisões do edifício que influenciará os períodos de ocupação das mesmas, de acordo com a base de dados do software. Da mesma forma, são obtidos também os dados relacionados com os climas em estudo.

Nesta análise serão tidas em conta duas semanas distintas para cada estação, estas semanas distinguem-se nos intervalos de temperaturas registados. Um dos casos remete-nos para uma semana de dimensionamento onde as temperaturas apresentam os valores extremos, significando isto que no verão os valores serão mais altos e no do inverno serão os valores mais baixos da temperatura exterior, e o outro remete-nos para uma semana típica em que as temperaturas representam na sua maioria as condições normais das diferentes estações.

Nos quadros seguintes são caracterizadas, de forma sucinta, as semanas em estudo para os dois tipos de clima indicados. No Quadro 3.8 apresentam-se os valores máximos, mínimos, médios e a respetiva amplitude térmica das semanas referentes à estação de arrefecimento, e no Quadro 3.9 da mesma forma serão apresentados os valores referentes à estação de aquecimento.

Quadro 3.9 – Caracterização das semanas em estudo para a estação de arrefecimento

	Clima Csb (Coimbra)		Clima Csa (Faro)	
	Semana de dimensionamento	Semana típica	Semana de dimensionamento	Semana típica
Valores máximos	37.20°C	27.15°C	37.00°C	29.15°C
Valores mínimos	15.05°C	14.10°C	16.45°C	16.75°C
Amplitude térmica	22.15°C	13.05°C	20.55°C	12.40°C
Valores médios	22.76°C	20.24°C	26.28°C	23.14°C

Quadro 3.10 – Caracterização das semanas em estudo para a estação de aquecimento

	Clima Csb (Coimbra)		Clima Csa (Faro)	
	Semana de dimensionamento	Semana típica	Semana de dimensionamento	Semana típica
Valores máximos	14.75°C	16.60°C	17.00°C	18.00°C
Valores mínimos	0.70°C	3.18°C	3.00°C	6.15°C
Amplitude térmica	14.05°C	13.43°C	14.00°C	11.85°C
Valores médios	8.14°C	10.46°C	10.86°C	13.20°C

Por fim, a metodologia de análise consiste numa comparação dos resultados obtidos nos modelos térmicos, através do software mencionado anteriormente, com alguns dos requisitos de desempenho térmico da norma *PassivHaus*, para o clima de Portugal, e que são apresentados no Quadro 3.10.

Quadro 3.11 – Requisitos de desempenho térmico da norma *PassivHaus*

Necessidades anuais de aquecimento	< 15000 Wh/(m ² .a)
Necessidades anuais de arrefecimento	< 15000 Wh/(m ² .a)
Conforto térmico	Temperatura entre 20* e 25°C

*Nesta análise, considerou-se como temperatura de conforto no Inverno 18°C e 25°C para o Verão.

3.3.2.1 Estudo paramétrico

De acordo com o que foi apresentado anteriormente, o estudo das diferentes soluções é dividido em três etapas.

Numa primeira fase, pretende-se perceber o comportamento térmico da habitação assumindo a envolvente em estudo na dissertação de mestrado do Rúben Leal e a envolvente considerada nesta dissertação, tanto para o clima Csa como para o clima Csb. Esta primeira abordagem permitirá perceber a amplitude de temperaturas nos dois casos e nas regiões climáticas consideradas, dando origem a um conjunto de soluções com foco na estação de aquecimento ou na estação de arrefecimento.

Posto isso, o pressuposto seguido leva-nos a definir soluções passivas mais eficientes para o inverno ou para o verão, consoante a análise, e assim reduzir os custos associados aos equipamentos de ar condicionado.

Numa segunda fase, onde será realizado um estudo paramétrico, serão consideradas um conjunto de combinações de soluções passivas que ajudarão na tomada de decisão sobre as soluções finais a adotar para as duas habitações.

Por fim, numa terceira fase, após análise dos resultados da fase anterior, serão considerados equipamentos de ar condicionado por forma a estimar o consumo de energia associado. Neste ponto, o estudo terá duas considerações: a primeira assume que os equipamentos apenas funcionam no período de ocupação dos compartimentos da casa e quando as respetivas temperaturas interiores estão fora do intervalo de temperatura de conforto; e o segundo, com vista a maximizar o consumo dos equipamentos referidos, funcionará sempre que as temperaturas se encontrem fora dos limites referidos e independentemente da ocupação dos espaços.

Em resumo, nos Quadros 3.11 e 3.12 são apresentados os vários casos analisados no estudo paramétrico para as diferentes estações do ano, dizendo respeito à segunda e à terceira fase da metodologia de análise apresentada.

Quadro 3.12 – Estudo paramétrico para a estação de arrefecimento

Descrição		Cenários						
		1	2	3	4	5	6	7
Sombreamento	Pala de sombreamento (1.0 m)	X						
	Palas de sombreamento lateral e horizontal (0.5 m)		X		X			
	Palas de sombreamento lateral e horizontal com dispositivos intermédios de sombreamento (0.5 m)			X		X	X	X
Dispositivos de proteção dos envidraçados	Estore mediamente opaco (exterior)	X				X		X
	Estore mediamente translúcido (exterior)		X					
	Persiana do tipo veneziana (média)			X	X		X	
Ventilação natural/infiltrações externas	0.6 r/h							
	3.0 r/h							
	6.0 r/h	X	X	X	X	X	X	X
Sistema de ar condicionado							X	X

Quadro 3.13 – Estudo paramétrico para a estação de aquecimento

Descrição		Cenários						
		8	9	10	11	12	13	14
Sombreamento	Sem dispositivos de sombreamento	X		X		X	X	X
	Palas de sombreamento lateral e horizontal (0.5 m)		X		X			
Dispositivos de proteção dos envidraçados	Estore mediamente opaco	X					X	
	Estore mediamente translúcido		X			X		
	Persiana do tipo veneziana (média)			X	X			X
Ventilação natural/infiltrações externas	0.6 r/h	X	X	X	X		X	X
	3.0 r/h					X		
	6.0 r/h							
Sistema de ar condicionado							X	X

4 Caso de estudo

4.1 Objetivos

O objetivo deste estudo passa por interpretar o efeito das ações no dimensionamento estrutural, para a mesma tipologia de edifícios em locais diferentes. Desta forma, poderemos perceber, numa primeira abordagem, a influência da localização no consumo de matéria-prima necessária para os elementos estruturais.

Do mesmo modo, a análise do desempenho térmico dos edifícios levará a perceber quais os valores necessários do coeficiente de transmissão térmica que definem a envolvente e que ditam o comportamento da mesma, do ponto de vista da eficácia e ao mesmo tempo da sustentabilidade.

4.2 Análise estrutural

A análise estrutural dividir-se-á em dois pontos: a resistência estrutural e o comportamento da estrutura às ações atuantes em serviço.

O pré-dimensionamento realizado definirá as secções transversais necessárias cumprindo os requisitos de resistência e de estabilidade e as imposições aos limites de deformação da estrutura e dos elementos que a constituem.

Do leque de ações consideradas, a que será determinante neste estudo será a ação do vento. A análise elástica realizada mostrará que o cumprimento dos limites de deformação apresentados anteriormente serão importantes no aumento da inércia das secções das colunas, sendo estes os principais elementos resistentes às ações laterais impostas pelo vento. Tratando-se de secções abertas do tipo H, e não sendo considerados sistemas de contraventamento, o aumento da secção deve-se essencialmente a baixa inércia que este tipo de secções apresenta no seu eixo fraco, em relação ao eixo de maior inércia.

Desta forma, concluímos que os estados limites de serviço serão condicionantes no dimensionamento estrutural dos elementos verticais, pelo que o rácio de resistência estrutural para os estados limites últimos estará longe da capacidade resistente elástica das secções das colunas.

Nos elementos do tipo viga a análise é ligeiramente diferente. Nestes casos, os rácios de dimensionamento para os estados limites últimos e para os estados limites de serviço são muito

semelhantes, repartindo a importância em relação àqueles que serão os estados limites condicionantes.

Contudo, de acordo com os pressupostos seguidos, tendo em conta os estados limites de serviço como critério de pré-dimensionamento, a resistência das secções transversais das vigas fica também longe dos seus limites máximos uma vez que é limitada a sua deformação em serviço.

4.2.1 Elementos estruturais

No seguimento do que foi exposto anteriormente, apresentam-se de seguida os modelos pré-dimensionados para as duas situações. Na Figura 4.1, o modelo a) corresponde à estrutura do edifício situado em Coimbra e o modelo b) à estrutura do edifício em Faro.

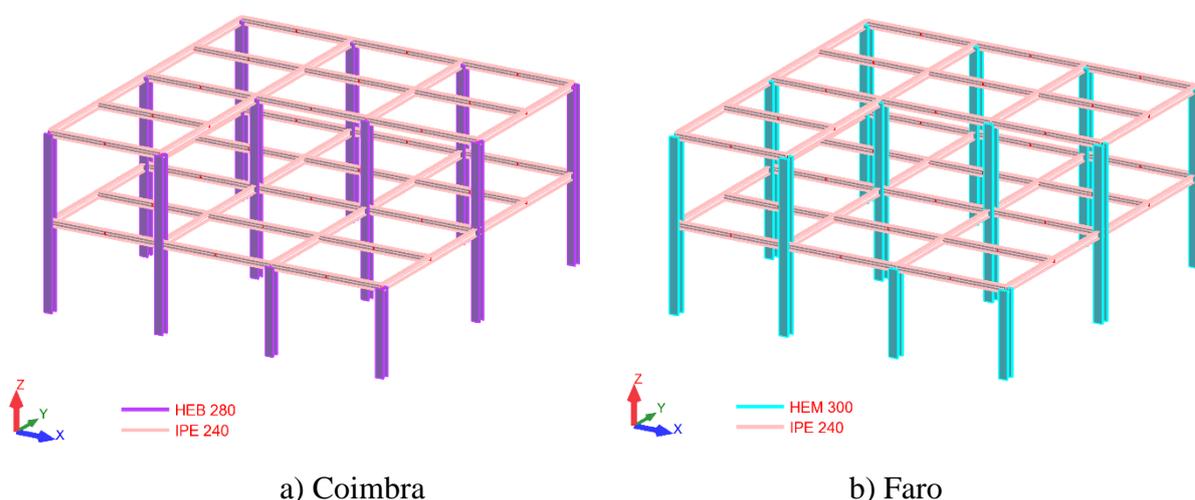


Figura 4.1 – Elementos estruturais pré-dimensionados

No pré-dimensionamento das secções transversais dos elementos de coluna, para além da verificação da resistência das secções é também realizada a verificação dos elementos à encurvadura por flexão composta e, de forma conservativa, considera-se apenas o travamento lateral ao nível do piso 1 nas colunas mais altas (de 6 metros), reduzindo o comprimento efetivo de encurvadura. Isto é, para as diferentes alturas de colunas não é tido em conta o efeito da laje no topo da coluna. No Quadro 4.1 apresentam-se os rácios do pré-dimensionamento e como vemos o fator condicionante para a definição das secções transversais das colunas foram os estados limites de serviço, ficando muito próximo do limite estipulado.

Quadro 4.1 – Rácios de pré-dimensionamento dos elementos verticais

Localização	Secção transversal	Rácio (ULS)	Rácio (SLS)
Coimbra	HEB280	13%	99%
Faro	HEM300	12%	95%

No caso das vigas, é verificada apenas a resistência das secções transversais como indicado no Eurocódigo 3, partindo do pressuposto que estes elementos estão restringidos lateralmente pela laje de betão o que impede os deslocamentos laterais das zonas comprimidas. Posto isto, não foi realizada nenhuma análise à encurvadura. No Quadro 4.2 é possível verificar, ao contrário do que acontece com os elementos verticais, que se tira mais partido da resistência da secção pré-dimensionada, garantindo também os limites de deformação dos elementos horizontais.

Quadro 4.2 – Rácios de pré-dimensionamento dos elementos horizontais

Localização	Secção transversal	Rácio (ULS)	Rácio (SLS)
Coimbra	IPE240	44%	33%
Faro	IPE240	53%	33%

4.2.2 Ligações metálicas

No que diz respeito às ligações metálicas pré-dimensionadas, apresentam-se de seguida os esquemas de cada tipologia.

Como referido, o pré-dimensionamento das ligações metálicas foi também realizado através do software de cálculo indicado que tem como base os princípios de cálculo da NP EN 1993-1-8, nomeadamente a metodologia de cálculo associada ao método das componentes.

Resumidamente, para cada tipologia foi adotado o mesmo conceito nas duas soluções estudadas pelo que os rácios de dimensionamento são muito semelhantes dos dois casos. Nas ligações com transmissão de momentos fletores obteve-se um rácio de dimensionamento na ordem dos 83% e nas ligações sem transmissão de momentos o rácio determinado ronda os 46%, no Quadro 4.3 apresentam-se os rácios de pré-dimensionamento para os Estados Limites Últimos.

Quadro 4.3 – Rácios de pré-dimensionamento das ligações

Localização	Viga-coluna eixo forte	Viga-coluna eixo fraco	Viga-viga
Coimbra	81%	44%	43%
Faro	83%	46%	43%

Em suma, nas figuras seguintes são ilustrados os diferentes tipos de ligações. Na figura 4.2 são apresentadas as ligações com transmissão de momento, ligação viga-coluna eixo forte, e nas Figuras 4.3 e 4.4 são indicadas as ligações em transmissão de momento, ligação viga-coluna eixo fraco e ligação viga-viga, respetivamente.

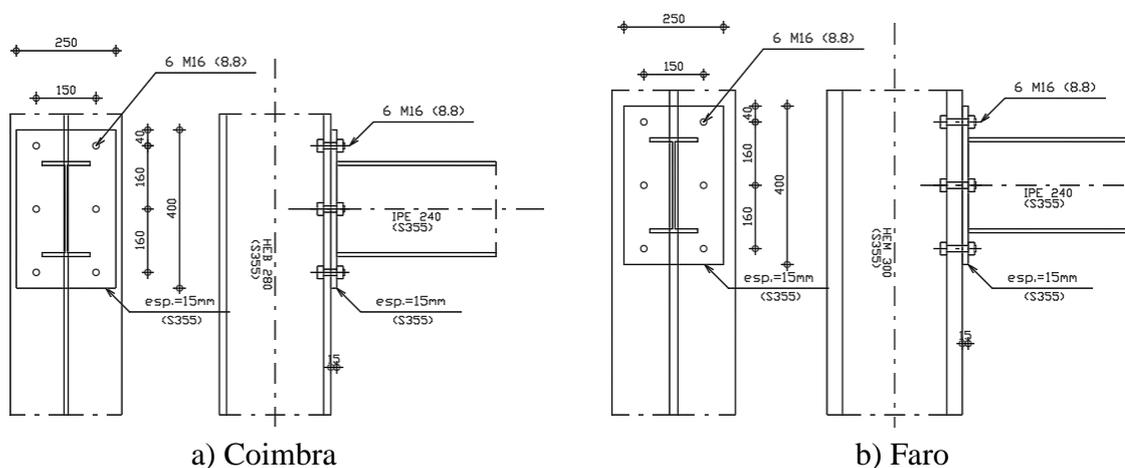


Figura 4.2 – Ligações viga-coluna eixo forte

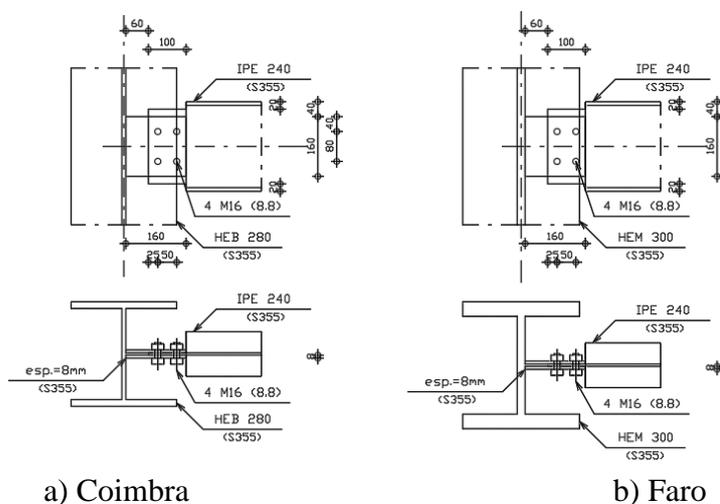


Figura 4.3 – Ligações viga-coluna eixo fraco

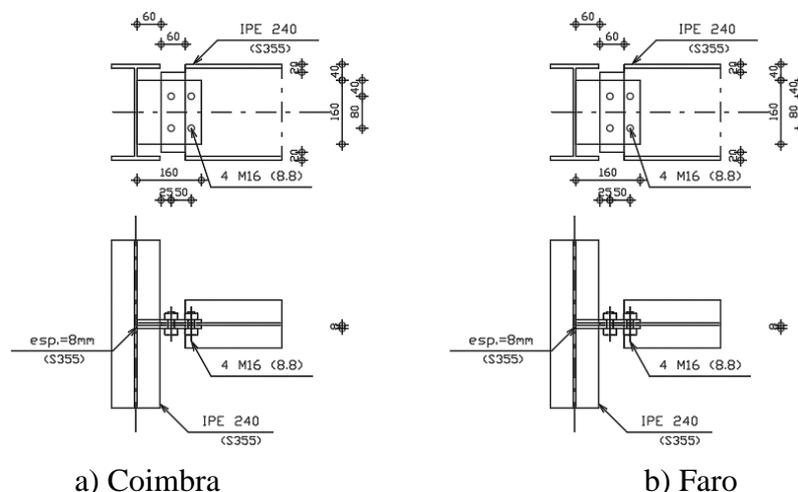


Figura 4.4 – Ligações viga-viga

4.2.3 Estudo comparativo das soluções

Em comparação, as duas soluções apresentam diferenças apenas nas secções transversais das colunas, sendo isto justificado pela diferença entre a ação do vento determinada para as duas situações. Tendo em conta a localização e a proximidade e exposição ao ambiente marítimo, a ação do vento para Faro é muito superior à ação do vento em ambiente urbano determinada para Coimbra.

Ao nível da deformação calculada para os Estados Limites de Serviço, Figura 4.5, cumprindo os requisitos apresentados anteriormente, verificamos que o comportamento estrutural é muito semelhante, o que seria expectável tendo em conta os pressupostos assumidos.

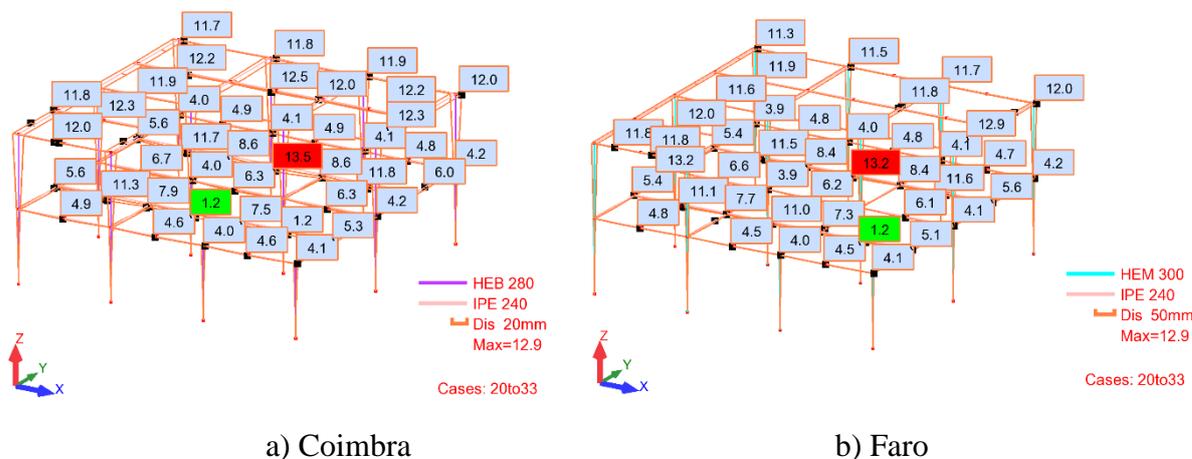


Figura 4.5 – Deformação das estruturas para a envolvente dos Estados Limites de Serviço

Nas duas situações poderemos confirmar que os limites de deformação vertical para pavimentos em geral de $L/250$ ($4000\text{mm}/250 = 16\text{mm}$) é cumprido, assim como os limites de deformação horizontal impostos ao nível do primeiro piso de $h/300$ ($3000\text{mm}/300 = 10\text{mm}$) e ao nível da estrutura global de $h_0/500$ ($6000\text{mm}/500 = 12\text{mm}$).

No âmbito da quantidade de matéria-prima necessária e no que diz respeito ao peso de aço determinado, as duas soluções já apresentam valores distintos, o que influenciará naturalmente os custos associados à estrutura e conseqüentemente a sustentabilidade das mesmas. No Quadro 4.4 verificamos as quantidades de aço determinadas para cada localização e apuramos uma diferença total de 8899.7kg entre a solução localizada em Coimbra e a solução localizada em Faro.

Quadro 4.4 – Quantidade de aço determinada (em kg)

Localização	IPE 240	HEB280	HEM300	Total [kg]
Coimbra	5772.46	6808.43	-	12580.89
Faro	5772.46	-	15708.13	21480.59

Em conclusão, esta diferença está relacionada com os pressupostos assumidos, principalmente no que se refere à não utilização de sistemas de contraventamento ou da adoção de um modelo estrutural diferente. De outra forma, também seria possível colmatar esta diferença utilizando secções com propriedades semelhantes nos dois eixos, como por exemplo secções tubulares quadradas.

4.3 A importância das soluções passivas no desempenho térmico das habitações

No seguimento do que já foi exposto, o presente capítulo servirá para compreender o papel das soluções passivas e o seu contributo no desempenho térmico das habitações. Embora não sejam totalmente eficientes do ponto de vista do seu comportamento térmico, isto é, o seu comportamento passivo poderá não ser suficiente no cumprimento dos limites das temperaturas de conforto nas semanas de dimensionamento, será possível constatar que estas soluções terão um contributo importante na redução dos gastos energéticos com aparelhos de ar-condicionado, cumprindo assim os limites assumidos ao nível das temperaturas de conforto como ao nível das necessidades anuais de aquecimento e arrefecimento.

Em cada uma das análises apresentadas de seguida serão indicadas as temperaturas médias do ar no interior da habitação, de forma global, para a estação de aquecimento e arrefecimento, sendo realizada em cada ponto uma análise comparativa e explicativa. Por fim, será apresentada

uma análise ao consumo energético onde entrarão no estudo os valores da temperatura interior em determinados compartimentos da habitação e onde se entenderá também a ação do ar condicionado ao longo do dia.

4.3.1 Comportamento térmico passivo das soluções iniciais

Esta primeira abordagem pretende mostrar o efeito da envolvente no comportamento térmico dos edifícios e qual a influência da mesma nos ganhos e perdas de energia.

Resumidamente, divide-se em duas iterações: a Iteração 0, que corresponde à utilização da envolvente definida na dissertação de mestrado do Rúben Leal e a Iteração 1, que tem em conta a envolvente definida para este documento. Os restantes parâmetros são iguais para as duas situações, isto é, não foram consideradas palas de sombreamento ou outro tipo de dispositivo de proteção dos envidraçados, considerou-se o valor mínimo de ventilação natural (0.60 r/h) e não foi considerado qualquer meio de ventilação mecânica.

4.3.1.1 Clima Csb – Coimbra

Na Figura 4.6 apresentam-se para as duas semanas de estudo a variação da temperatura interior tendo em conta os pressupostos iniciais desta análise. Como é possível verificar, a variação da temperatura é semelhante tendo em conta as tipologias das envolventes.

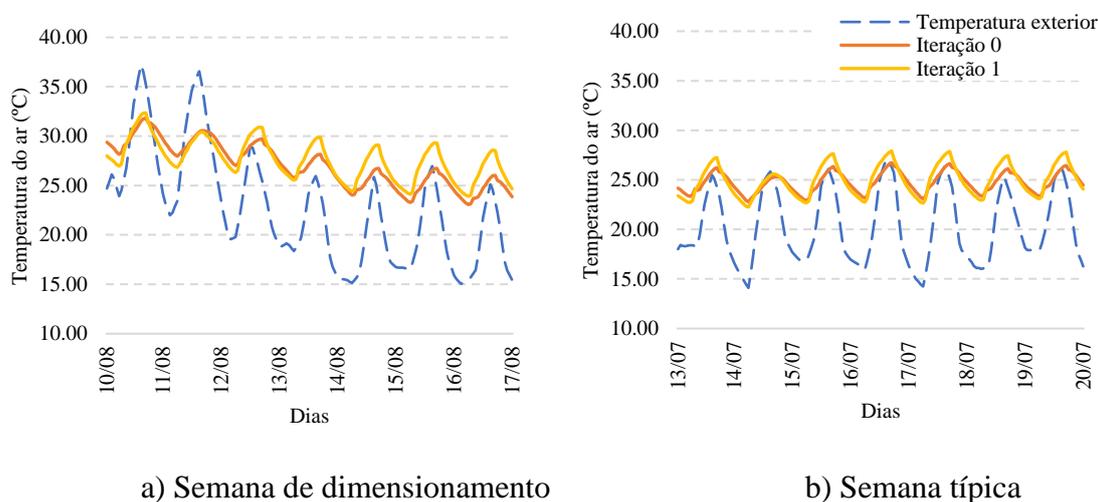


Figura 4.6 – Variação da temperatura interior para a estação de arrefecimento na semana de dimensionamento e na semana típica para as soluções iniciais (Clima Csb – Coimbra)

Na semana de dimensionamento verificam-se temperaturas máximas de 31.84°C, na iteração 0, e 32.36°C, na solução da iteração 1, sendo que as mínimas rondam os 23°C. Estes valores

conduzem a uma média de temperatura interior de 27°C, que se encontra acima do limite estipulado.

Na semana típica, a média de temperatura interior encontra-se perto dos 25°C, embora com máximas de 26.74°C e 27.93°C para a iteração 0 e iteração 1, respetivamente.

Nesta primeira abordagem para a solução em Coimbra, no verão, percebemos que as alterações impostas à envolvente da iteração 1 são prejudiciais no comportamento térmico da habitação.

Contudo, o comportamento da envolvente no Inverno é contrário ao exposto anteriormente. Neste caso, e como demonstra a Figura 4.7, a envolvente da iteração 1 tem melhor comportamento na estação de aquecimento para a semana de dimensionamento, apresentando um valor médio de temperatura interior de 17.99°C superior aos 16.37°C apresentados na solução proveniente da iteração 0. Porém os valores mínimos registados encontram-se abaixo dos 18°C.

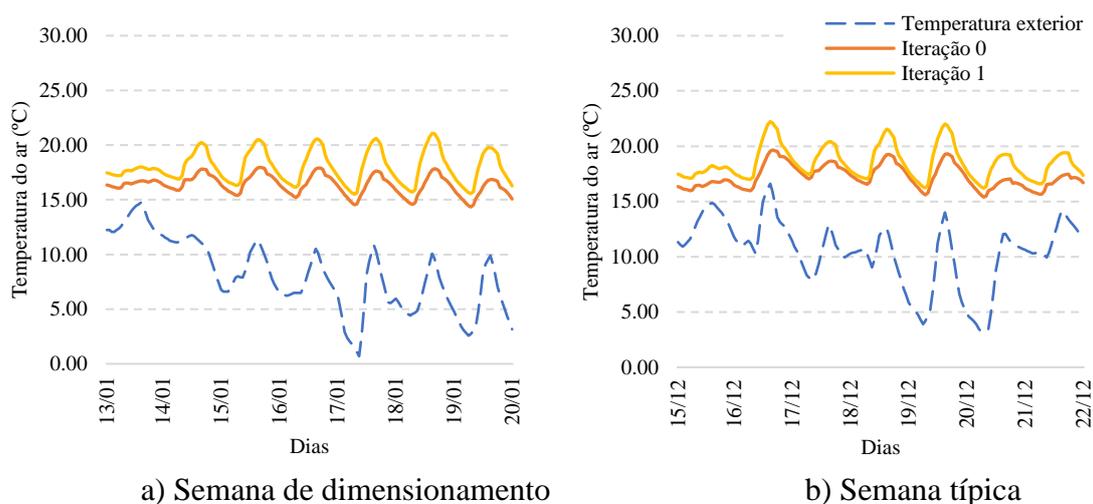


Figura 4.7 – Variação da temperatura interior para a estação de aquecimento na semana de dimensionamento e na semana típica para as soluções iniciais (Clima Csb – Coimbra)

Na semana típica o comportamento é muito idêntico. Uma vez que as temperaturas exteriores não são tão baixas, as médias verificadas encontram-se acima do limite indicado, todavia as temperaturas mínimas continuam abaixo desse mesmo valor.

4.3.1.2 Clima Csa – Faro

No que diz respeito à primeira análise realizada para a solução em Faro, a variação da temperatura interior na semana de dimensionamento e na semana típica é muito semelhante. Nestes casos, as temperaturas nas duas semanas encontram-se entre os 22.45°C e os 31.10°C, com médias muito próximas dos 27°C. Como vemos na Figura 4.8, também a envolvente da iteração 0 apresenta melhor comportamento em comparação com a envolvente da iteração 1, registando temperaturas mais baixas nos períodos de maior calor.

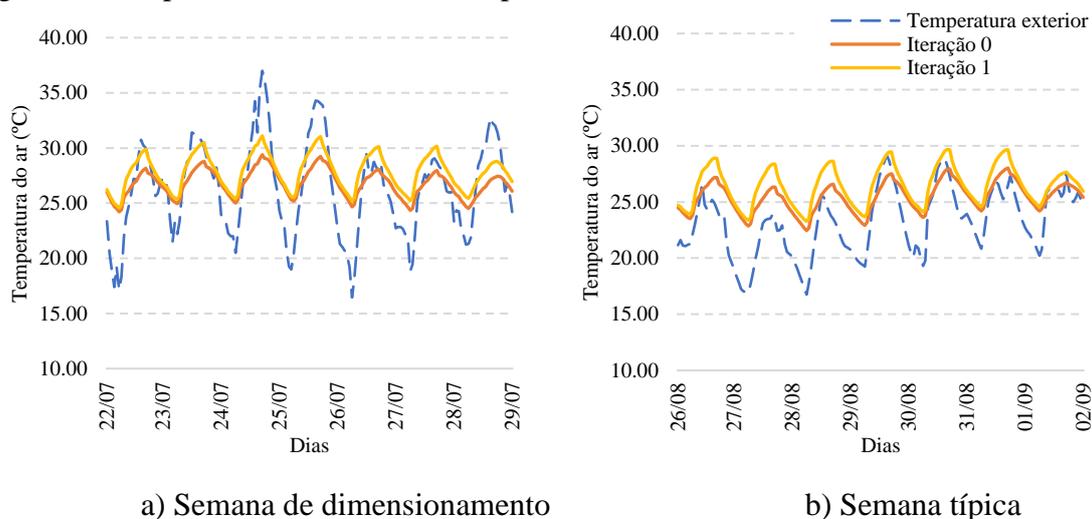


Figura 4.8 – Variação da temperatura interior para a estação de arrefecimento na semana de dimensionamento e na semana típica para as soluções iniciais (Clima Csa – Faro)

No inverno, como mostra a Figura 4.9, a diferença entre as temperaturas mínimas verificadas e as temperaturas máximas varia entre os 5°C e os 7°C. Para ambas as semanas de estudo os valores máximos determinados são de aproximadamente 21°C e 23°C na iteração 0 e na iteração 1, respetivamente. Como já acontecia na análise ao clima Csb, a envolvente da iteração 1 tem melhor comportamento na estação de aquecimento, muito embora as temperaturas mínimas verificadas durante as noites encontram-se abaixo da temperatura de conforto.

No entanto, importa salientar que as médias verificadas são superiores a este limite, assumindo assim que a envolvente terá melhor desempenho na estação de aquecimento.

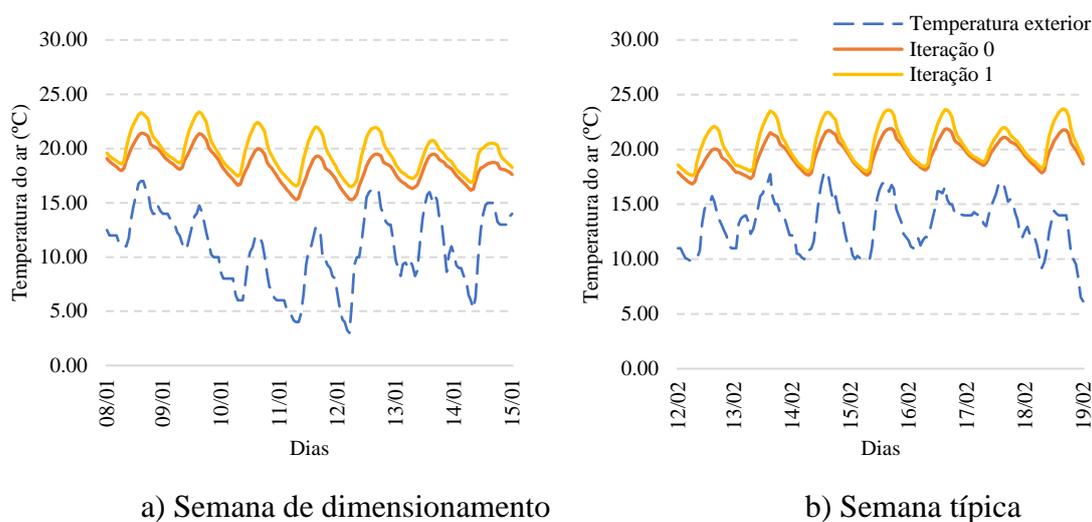


Figura 4.9 – Variação da temperatura interior para a estação de aquecimento na semana de dimensionamento e na semana típica para as soluções iniciais (Clima Csa – Faro)

No geral, esta primeira abordagem aos dois climas e às duas estações do ano, levam-nos a concluir que a envolvente assumida para o estudo paramétrico (correspondente à iteração 1) terá, nos dois casos, melhor comportamento na estação de aquecimento.

Estes resultados são justificados pela maior inércia térmica da envolvente, ou seja, a sua capacidade de absorver mais energia, e pelo aumento das espessuras de isolamento que reduzirá as perdas de energia para o exterior, mantendo uma temperatura interior mais alta em comparação com a temperatura exterior no inverno.

Como era previsto, no verão, o comportamento das envoltentes é semelhante ao que acontece no inverno, mas para esta estação não é pretendido que se reduzam as perdas de energia. Por isso, esta análise leva-nos a dar mais ênfase na próxima fase aos dispositivos de proteção solar que serão importantes na redução dos ganhos energéticos e dessa forma reduzirão as temperaturas máximas verificadas nas duas habitações.

4.3.2 Comportamento térmico passivo com base no estudo paramétrico

De acordo com a análise do estudo anterior, tendo como princípio a redução dos ganhos solares na estação de arrefecimento, o estudo paramétrico realizado neste capítulo combina um conjunto de soluções de sombreamento e de dispositivos de proteção dos envidraçados por forma a reduzir as temperaturas máximas verificadas no interior das duas soluções. A estas considerações, é adicionado o parâmetro da ventilação natural quando a temperatura exterior é mais baixa que a temperatura de conforto, o que contribuirá para a redução da temperatura interior durante a noite, principalmente.

Na estação de aquecimento, o estudo paramétrico terá como principal critério a consideração de dispositivos de proteção dos envidraçados durante a noite, para contribuir de forma positiva para a redução das perdas de energia. O contrário acontece durante as horas em que as temperaturas são mais altas, maximizando os ganhos solares durante o dia.

Esta conjugação de vários fatores, apresentados anteriormente no subcapítulo 3.3.2.1 deste documento, levará à determinação da solução mais eficiente do ponto de vista térmico e passivo, pois, por enquanto, ainda não serão considerados sistemas de aquecimento e de arrefecimento. Portanto, serão analisados os cenários 1 a 5 do estudo paramétrico, correspondentes à estação de arrefecimento, e os cenários 8 a 12, correspondentes à estação de aquecimento.

Neste subcapítulo será apresentada apenas a variação de temperatura para as semanas de dimensionamento, por estas serem determinantes na escolha das soluções a adotar.

4.3.2.1 Clima Csb – Coimbra

Dos cinco cenários estudados para o verão do clima Csb, aqueles que apresentam temperaturas mais baixas nos picos de calor são os cenários 3 e 5, que dispõem de palas de sombreamento laterais e horizontais com dispositivos intermédios (representados anteriormente na Figura 3.10 c)) e que têm um efeito superior na redução dos ganhos solares em relação aos outros dispositivos presentes nos restantes cenários.

Na Figura 4.10, a diferença perceptível entre a curva do cenário 3 e do cenário 5 deve-se principalmente aos dispositivos de proteção dos envidraçados, em que a persiana do tipo veneziana não se mostra tão eficaz quanto um estore mediamente opaco aplicado no exterior.

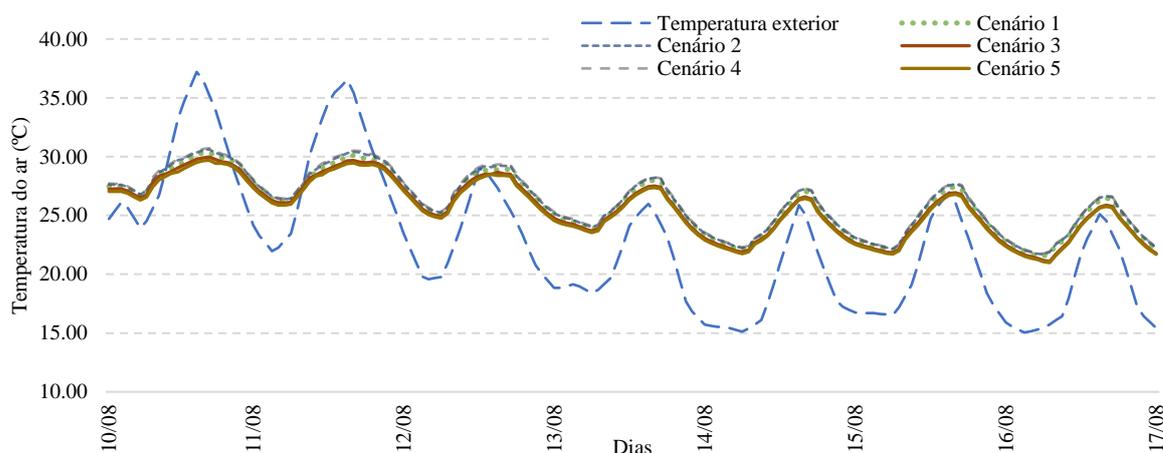


Figura 4.10 – Variação da temperatura interior para a estação de arrefecimento na semana de dimensionamento (Clima Csb – Coimbra)

No entanto, as temperaturas verificadas para estes dois cenários são ainda superiores ao valor limite. O cenário 3 apresenta uma temperatura máxima de 29.97°C e o cenário 5 uma temperatura de 29.69°C, contrastando com os valores mínimos obtidos, respetivamente para cada cenário, de 21.08°C e 20.98°C.

Contudo, as temperaturas médias apuradas para a semana de dimensionamento e para cada cenário encontram-se já próximas dos 25°C, verificando-se para o cenário 3 uma temperatura média de 25.65°C e 25.49°C para o cenário 5.

Na estação de aquecimento, ao contrário do que acontece no verão, os ganhos solares têm um papel determinante no aumento da temperatura interior e por isso os cenários que apresentam melhor comportamento nesta estação são aqueles que não utilizam dispositivos de sombreamento e onde apenas são considerados os estores ou as persianas durante a noite.

Destacam-se os cenários 8 e 10 com uma temperatura média semanal de 18.06°C, acima do valor limite. Contudo, como indica a Figura 4.11, estes casos ainda apresentam valores mínimos de temperaturas inferiores a esse limite.

Em comparação com os restantes cenários, concluímos que não será boa prática considerar qualquer tipo de palas de sombreamento na estação de aquecimento pois têm um impacto significativo nos ganhos energéticos.

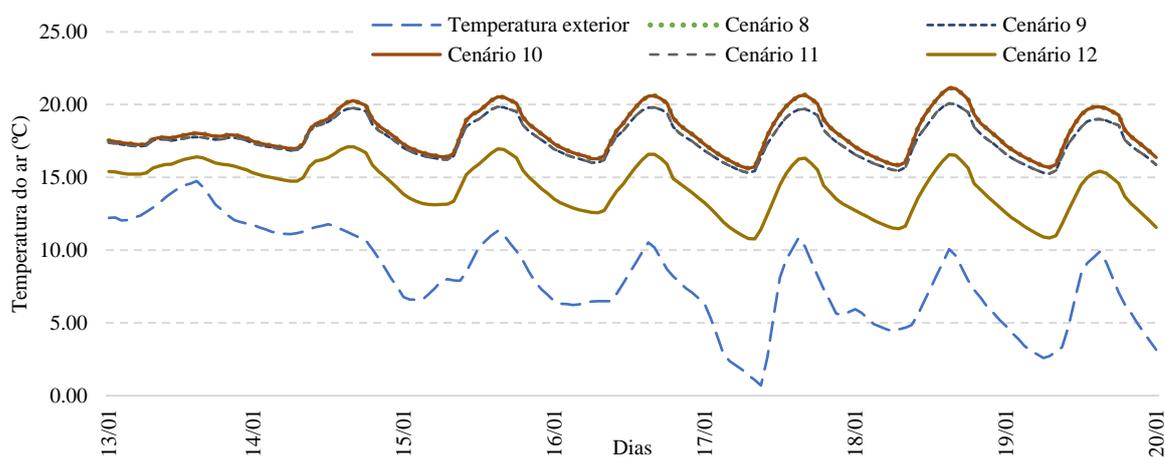


Figura 4.11 – Variação da temperatura interior para a estação de aquecimento na semana de dimensionamento (Clima Csb – Coimbra)

Como ilustrado também, é de notar a discrepância entre os resultados obtidos para o cenário 12 e os restantes. De lembrar que este caso pretende demonstrar o efeito da ventilação indevida no

inverno, e como vemos dá-se uma redução muito grande da temperatura interior, apesar dos ganhos solares através das janelas serem maximizados, uma vez que neste cenário não se considera nenhum tipo de sombreamento.

4.3.2.2 Clima Csa – Faro

De forma análoga, obtêm-se resultados semelhantes para o clima Csa, uma vez que os princípios da análise são os mesmos. Neste caso não existe grande disparidade entre os cenários representados na Figura 4.12 para a semana de dimensionamento da estação de arrefecimento. Como vemos, as curvas de temperatura são idênticas e os seus valores máximos e mínimos são muito próximos, possivelmente a influência da curva da temperatura exterior, que mantém um desenvolvimento mais ou menos constante ao longo dos dias, leva a que seja pouco notória a influência dos parâmetros em estudo.

Dadas as circunstâncias dos casos referentes ao clima Csb, nomeadamente o uso de dispositivos de sombreamento nos diversos cenários, também aqui os cenários 3 e 5 apresentam valores para as temperaturas máximas verificadas, de 29.07°C e 28.96°C respetivamente, que são ligeiramente inferiores aos restantes, mas continuam superiores ao limite dos 25°C.

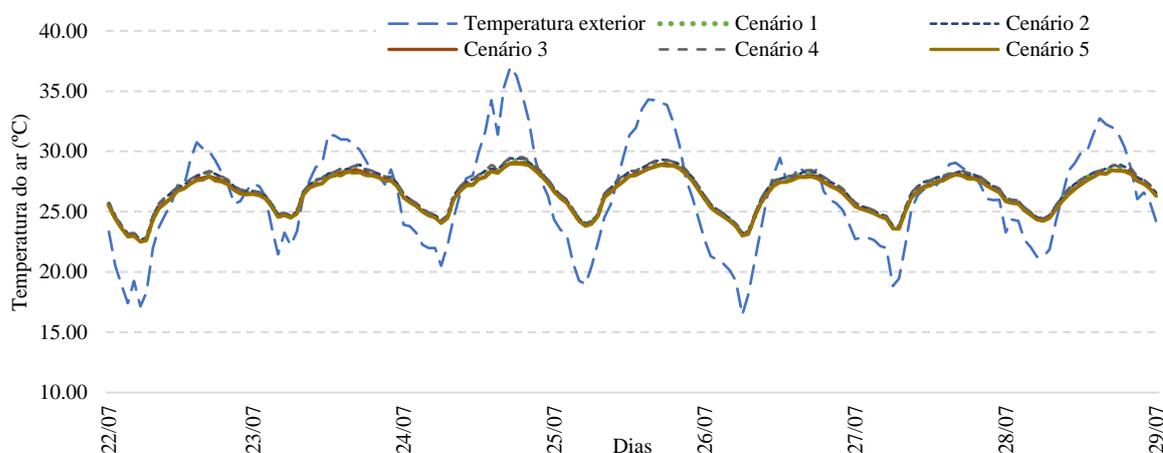


Figura 4.12 – Variação da temperatura interior para a estação de arrefecimento na semana de dimensionamento (Clima Csa – Faro)

Na estação de aquecimento para o clima Csa, os valores médios semanais da temperatura interior já são satisfatórios e superiores aos 18°C, para além do cenário 5 todos os cenários restantes apresentam uma média superior a 19°C.

Pelas mesmas razões que no estudo homólogo para o clima Csb, também os cenários 8 e 10 se destacam dos restantes. Na Figura 4.13, são registadas temperaturas máximas de 23.43°C e mínimas de 16.60°C para os dois cenários, que também apresentam a mesma média semanal de temperatura interior de 19.68°C.

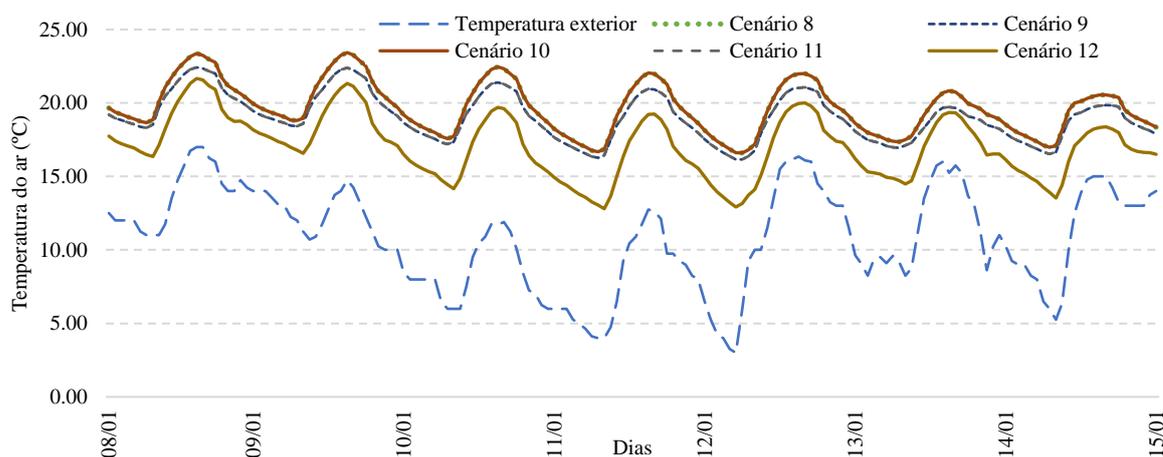


Figura 4.13 – Variação da temperatura interior para a estação de aquecimento na semana de dimensionamento (Clima Csa – Faro)

Nesta segunda fase da análise, é já possível compreender o efeito das variáveis consideradas no estudo paramétrico, assim como o seu contributo para a melhoria do comportamento térmico dos edifícios.

Em média, para os cenários 3 e 5, na estação de arrefecimento dos climas Csb e Csa, reduziu-se a temperatura máxima aproximadamente 2°C em comparação com a iteração 1 apresentada anteriormente. O que comprova o efeito dos dispositivos de sombreamento e de proteção dos envidraçados e a sua importância na redução dos ganhos solares nesta altura do ano.

Na estação de aquecimento, dados os pressupostos assumidos no estudo paramétrico, a diferença entre os cenários 8 e 10 e a iteração 1 não são tão significantes, mas como referido anteriormente, após a análise do comportamento térmico passivo das soluções iniciais, o objetivo seria melhorar o desempenho dos edifícios no verão dado que o seu comportamento no inverno já estaria próximo do desejável.

Em suma, os resultados obtidos para a semana de dimensionamento do verão, principalmente as temperaturas máximas determinadas, encontram-se ainda acima dos valores desejados, sendo necessário numa próxima fase ter em conta a utilização de equipamentos de arrefecimento.

4.3.3 O papel do ar-condicionado

Dando continuidade ao estudo paramétrico, nesta fase serão considerados os dois cenários mais relevantes da fase anterior, para cada altura do ano, e será considerado em cada um o contributo do ar-condicionado, tanto na estação de arrefecimento como na estação de aquecimento.

Posto isto, os cenários em estudo nesta fase serão os cenários 6 e 7 que correspondem ao 3 e 5 com ar-condicionado, na estação de arrefecimento, e os cenários 13 e 14 que correspondem ao 8 e 10, na estação de aquecimento, também com ar-condicionado.

Importa salientar ainda o funcionamento destes equipamentos: no verão, o ar condicionado é ativado sempre que o compartimento da habitação estiver em ocupação e quando a sua temperatura interior for superior a 25°C; e no inverno, o princípio de ocupação é semelhante, no entanto o ar condicionado funcionará sempre que a temperatura interior seja inferior aos 18°C.

4.3.3.1 Clima Csb – Coimbra

Como demonstra a Figura 4.14, o efeito do ar-condicionado no verão, tendo em conta os períodos de utilização dos espaços, tem um papel relevante na redução das temperaturas máximas obtidas no edifício em geral.

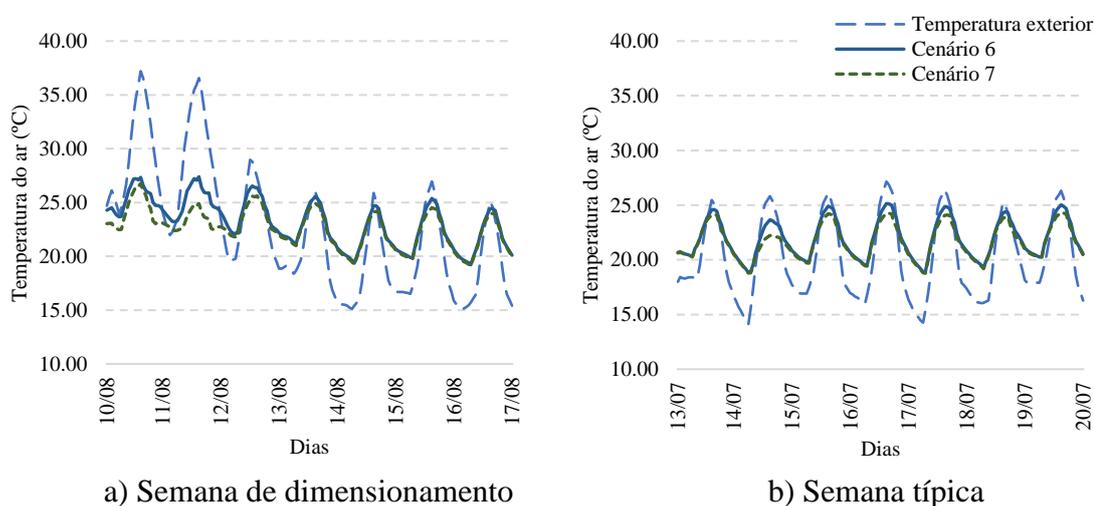


Figura 4.14 – Variação da temperatura interior para a estação de arrefecimento nas semanas de estudo, considerando o efeito do ar-condicionado (Clima Csb – Coimbra)

No entanto, na semana de dimensionamento é possível constatar que são registadas temperaturas superiores aos 25°C, sendo estes resultados justificados pelo período de ocupação dos compartimentos da habitação. Como exemplo, durante o dia e naturalmente durante o

período de maior calor, os quartos não estão ocupados, e dado que integram grande parte do piso 1 com considerada exposição, o aumento da temperatura verificada nestas divisões do edifício quando não são ocupadas contribui de forma negativa para o comportamento térmico global do mesmo.

Por isto, verificam-se temperaturas máximas na semana de dimensionamento de 27.40°C e 26.77°C no cenário 6 e no cenário 7, respetivamente, o que representa uma redução do valor máximo em relação à fase anterior de aproximadamente 2°C. Estes valores contribuem para a redução da temperatura média registada nesta semana, sendo agora inferior ao limite considerado de 25°C.

Na estação de aquecimento a importância da ocupação do piso 1 durante a noite tem um papel benéfico no desempenho térmico do edifício. Como no inverno as temperaturas mais baixas ocorrem durante a noite, a ocupação dos quartos durante esta altura e a consequente utilização do ar-condicionado contribui de forma positiva para uma melhoria do comportamento térmico da habitação.

Como é possível verificar na Figura 4.15, nas duas semanas de estudo, durante os períodos em que a temperatura exterior é mais baixa, o funcionamento do sistema de aquecimento impede que temperaturas inferiores aos 18°C sejam registadas, verificando-se uma temperatura constante durante o período da noite. Estes resultados contribuem para que a temperatura média semanal determinada para a estação de aquecimento seja superior a 19°C.

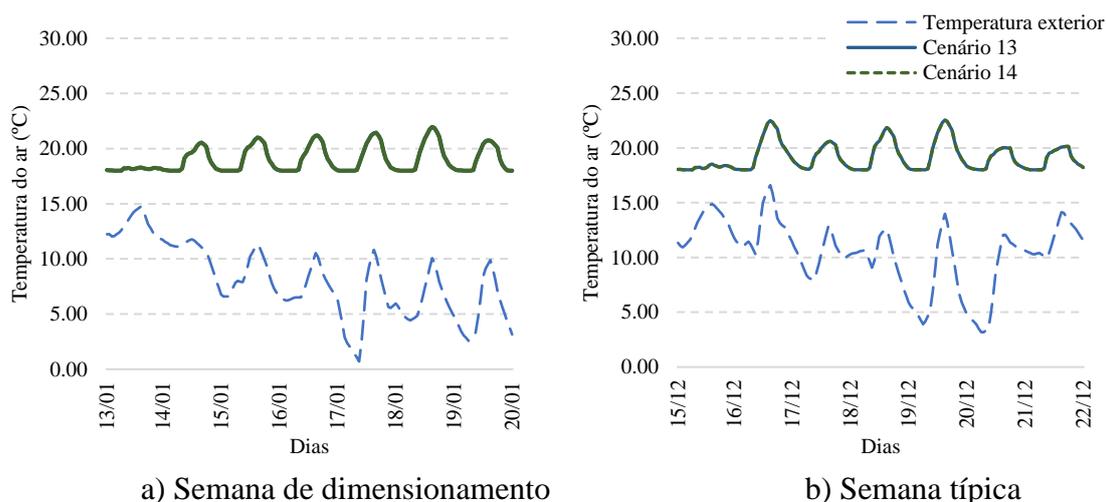


Figura 4.15 – Variação da temperatura interior para a estação de aquecimento nas semanas de estudo, considerando o efeito do ar-condicionado (Clima Csb – Coimbra)

4.3.3.2 Clima Csa – Faro

De forma semelhante, o comportamento térmico para o edifício em Faro é também ligeiramente melhor que o da fase anterior. Para além das razões indicadas, importa destacar a curva de temperatura exterior, Figura 4.16, que durante a semana de dimensionamento apresenta sempre valores máximos consideráveis ao longo dos dias, superiores a 25°C ao contrário do que acontece na semana de dimensionamento no clima Csb.

Também neste caso a temperatura média semanal se encontra ligeiramente abaixo dos 25°C, mas pelas razões indicadas para a estação do verão em Coimbra, os valores máximos registados são de 27.15°C no cenário 6 e 27.13°C no cenário 7.

Na semana típica observam-se também valores máximos superiores ao limite, o que nos leva a concluir que o sistema de arrefecimento, no clima Csa, poderia começar a funcionar para temperaturas mais baixas que os 25°C, de maneira a reduzir a amplitude térmica como consequência da redução dos valores máximos de temperatura.

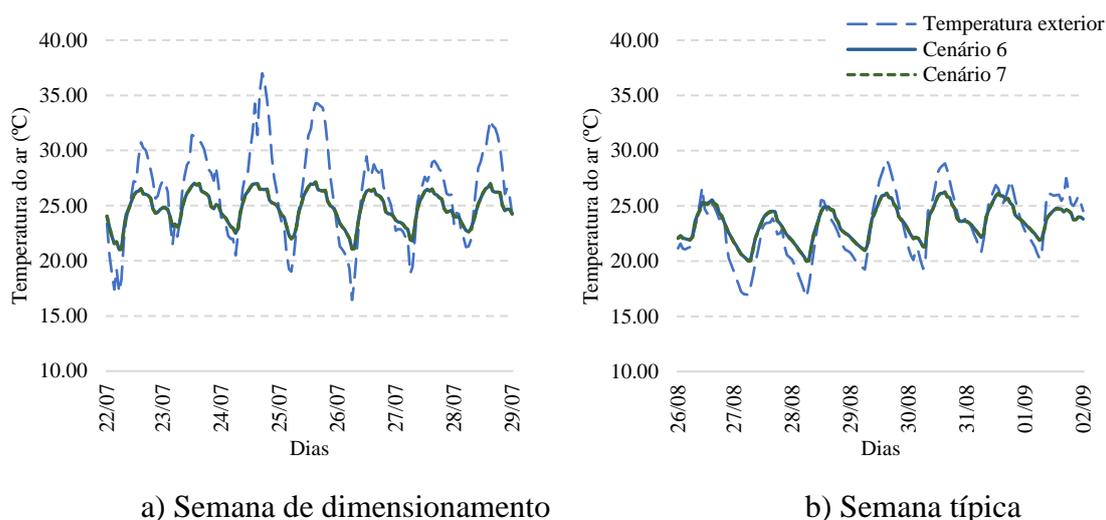


Figura 4.16 – Variação da temperatura interior para a estação de arrefecimento nas semanas de estudo, considerando o efeito do ar-condicionado (Clima Csa – Faro)

Na estação de aquecimento para o clima Csa, a influência no ar-condicionado não é tão notória como no Clima Csb. Os patamares de temperatura constante de 18°C, que foram referidos na análise ao edifício de Coimbra, ocorrem apenas em dois dias, como vemos na Figura 4.17.

O bom desempenho da solução idealizada permite obter temperaturas interiores médias semanais de aproximadamente 19.95°C na semana de dimensionamento e 20.60°C na semana típica.

A influência do sistema de aquecimento neste caso é verificada na redução de 1°C no valor da amplitude térmica nos vários cenários.

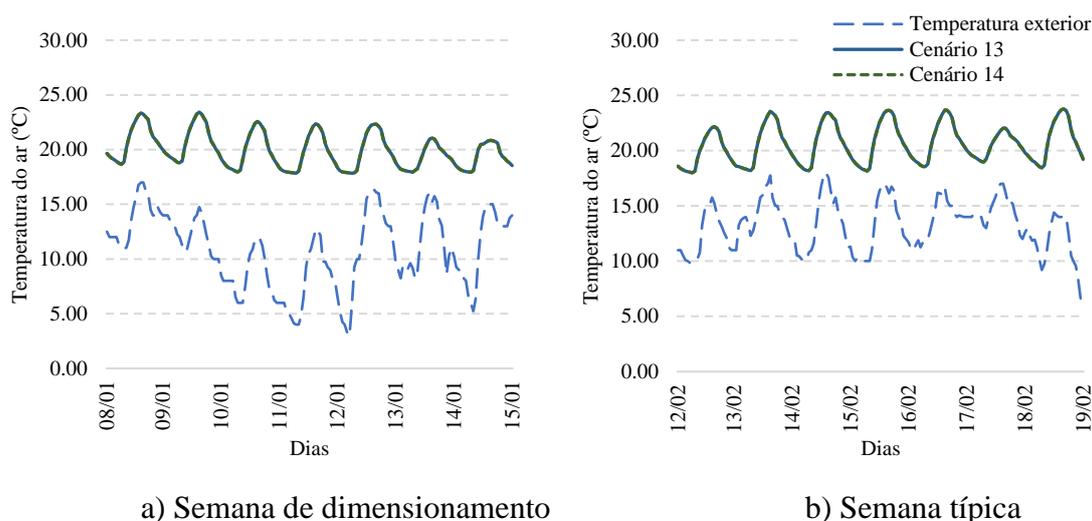


Figura 4.17 – Variação da temperatura interior para a estação de aquecimento nas semanas de estudo, considerando o efeito do ar-condicionado (Clima Csa – Faro)

Como vemos neste subcapítulo, ao nível global, o ar-condicionado funcionando sempre que o compartimento do edifício esteja ocupado garante uma redução das temperaturas máximas no verão e mantém acima do limite a temperatura interior no inverno.

Contudo, este pressuposto não contribui, principalmente nas semanas de dimensionamento na estação de arrefecimento, para que a temperatura não exceda os 25°C em determinados dias, apesar de contribuir para a redução da temperatura média semanal e permitir que neste ponto os modelos estudados apresentem resultados satisfatórios e de acordo com os limites sugeridos, no que diz respeito à temperatura média semanal.

4.3.4 Análise ao consumo energético de sistemas de ar-condicionado

As diferentes análises realizadas até então, como parte integrante do processo iterativo, levam a definir as necessidades da utilização de sistemas de arrefecimento ou de aquecimento.

Posto isto, o presente subcapítulo tem como objetivo perceber a influência do funcionamento dos sistemas de ar-condicionado sempre que não sejam cumpridos os valores limite da temperatura interior dos compartimentos.

Isto é, neste estudo comparativo para além de serem considerados os cenários 13 e 7 do subcapítulo anterior, para a estação de aquecimento e arrefecimento, respetivamente, de acordo com os pressupostos assumidos atrás, serão também considerados os mesmos cenários, mas onde os sistemas de ar-condicionado entram em funcionamento sempre que as temperaturas interiores estejam fora do intervalo de conforto, independente da ocupação do espaço, legendados nas figuras seguintes como cenários 13* e 7*.

Para melhor compreensão, devemos ter em consideração os períodos de ocupação dos compartimentos analisados, no Quadro 4.5 serão indicados em percentagem os períodos de ocupação para o quarto 3 e para a sala de esta do piso 0.

Quadro 4.5 – Percentagem (%) de ocupação dos compartimentos analisados

Horas	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
Quarto 3	100	100	100	100	100	100	100	50	25	0	0	0	0	0	0	25	75
Sala de estar P0	0	0	0	0	0	0	25	100	100	25	0	50	100	100	30	0	0

Com esta análise, para além de ser garantido que a temperatura interior se encontra abaixo dos 25°C no verão e acima dos 18°C no inverno, maximiza-se o consumo energético dos sistemas de ar-condicionado, percebendo-se quais as necessidades anuais de arrefecimento e de aquecimento.

4.3.4.1 Clima Csb – Coimbra

Como verificado, existe uma melhoria significativa nas temperaturas máximas registadas na semana de dimensionamento no verão. Sendo limitada a temperatura máxima a 25°C, por imposição do funcionamento do ar-condicionado, a amplitude térmica do Cenário 7* é também reduzida para aproximadamente 4°C, perfazendo uma média semanal de 23.39°C, como apresentado na Figura 4.18.

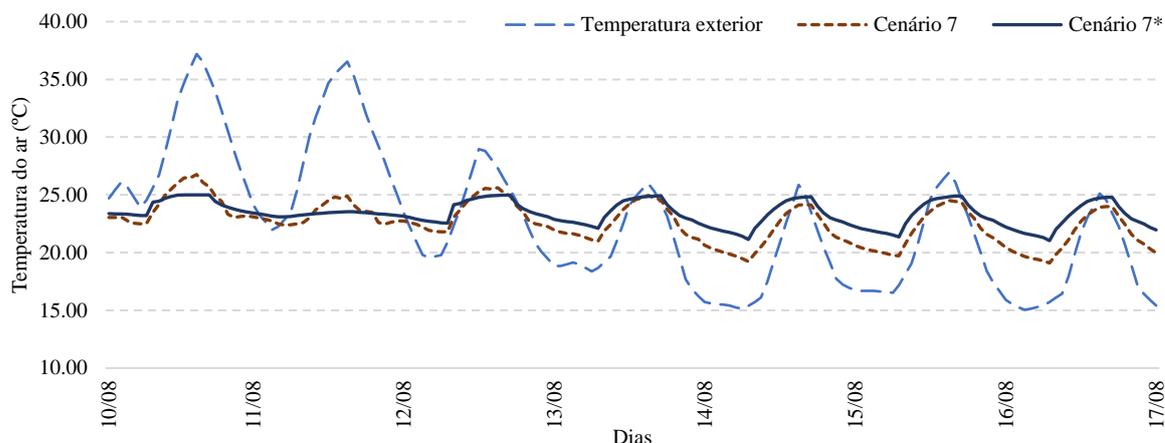


Figura 4.18 – Variação da temperatura interior na semana de dimensionamento no verão, considerando o efeito do ar-condicionado (Clima Csb – Coimbra)

De maneira que se entendam as considerações assumidas neste subcapítulo, a Figura 4.19 pretende demonstrar o efeito do sistema de arrefecimento ao longo deste processo iterativo no quarto 3, cuja ocupação é máxima entre as 0 e as 7 horas.

Importa relembrar que o cenário 5 não considera nenhum sistema de ar-condicionado, o cenário 7 tem em conta este sistema quando o compartimento está ocupado e quando a temperatura for superior ao limite de conforto e o cenário 7* não tem em conta o período de ocupação e o ar-condicionado é ativado sempre que a temperatura seja superior aos 25°C.

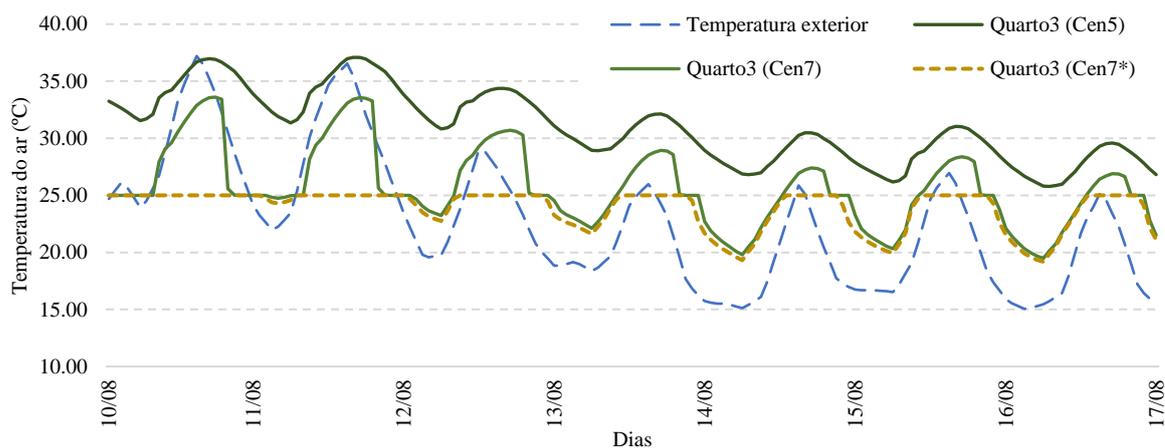


Figura 4.19 – Variação da temperatura interior no quarto 3 na semana de dimensionamento no verão, nas diferentes fases do processo iterativo (Clima Csb – Coimbra)

Como vemos, a boa exposição e a considerável área envidraçada do quarto 3 não contribui para que o comportamento térmico passivo das soluções indicadas seja suficiente para que se cumpram os limites de conforto. No cenário 5 as temperaturas são superiores aos 25°C e torna-se imperativo a utilização de sistemas de arrefecimento. Posto isto, nos cenários 7 e 7* a temperatura de conforto está sempre assegurada pelo funcionamento do ar-condicionado e garante sempre as condições de conforto para os seus ocupantes.

Do mesmo modo, na estação de aquecimento, o sistema de ar-condicionado tem um impacto positivo em manter a temperatura acima do limite dos 18°C, Figura 4.20.

No inverno não é tão representativo o funcionamento do ar-condicionado sempre que a temperatura interior dos compartimentos for inferior ao limite estipulado, cenário 13*, apesar de haver uma melhoria significativa da temperatura interior verifica-se que neste cenário as temperaturas mínimas são superiores aos 18°C na semana de dimensionamento, concluindo assim que a utilização dos sistemas de aquecimento é suficiente quando apenas os compartimentos são ocupados e simultaneamente apresentam uma temperatura interior inferior a 18°C.

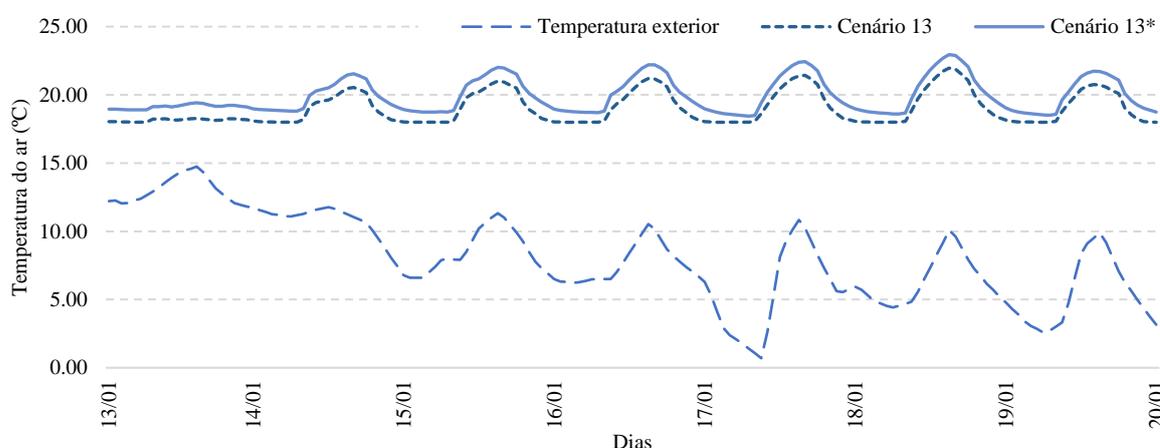


Figura 4.20 – Variação da temperatura interior na semana de dimensionamento no inverno, considerando o efeito do ar-condicionado (Clima Csb – Coimbra)

Contudo, analisando as curvas de temperatura do Quarto 3, no cenário 10, 13 e 13*, no inverno, verificamos que o período de ocupação coincide com o período em que a temperatura interior é inferior aos 18°C, Figura 4.21.

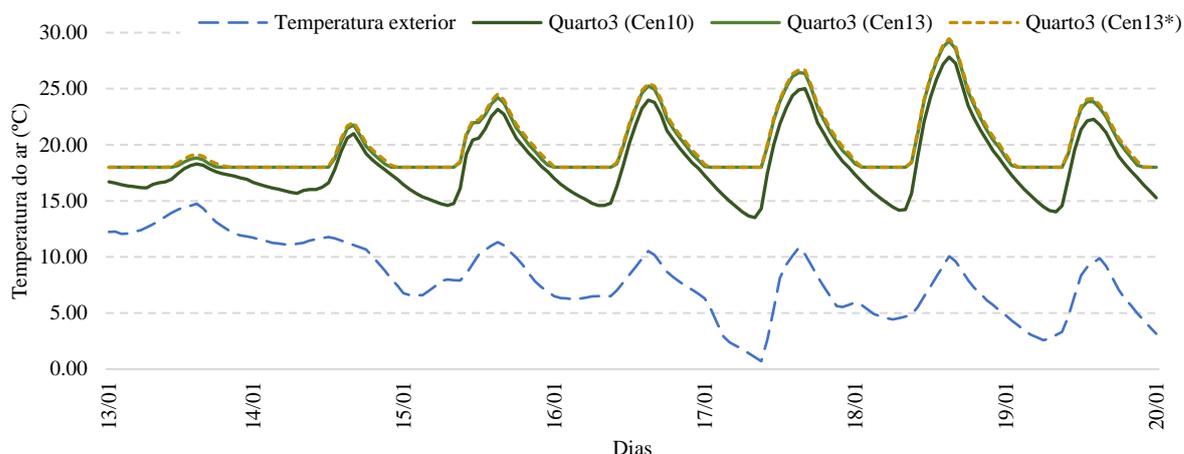


Figura 4.21 – Variação da temperatura interior no quarto 3 na semana de dimensionamento no inverno, nas diferentes fases do processo iterativo (Clima Csb – Coimbra)

De qualquer modo, constatamos que as soluções passivas, assumidas para o cenário 10, não são suficientes para garantir o cumprimento da temperatura de conforto, principalmente durante a noite, daí a necessidade de sistemas de aquecimento para o clima Csb.

4.3.3.2 Clima Csa – Faro

À semelhança da análise realizada, nas mesmas circunstâncias, para o edifício em Coimbra, o resultado obtido para o edifício em Faro mostra também, como esperado, uma melhoria nas temperaturas máximas verificadas no interior da habitação. A Figura 4.22 demonstra que no cenário 7* a temperatura também não excede os 25°C.

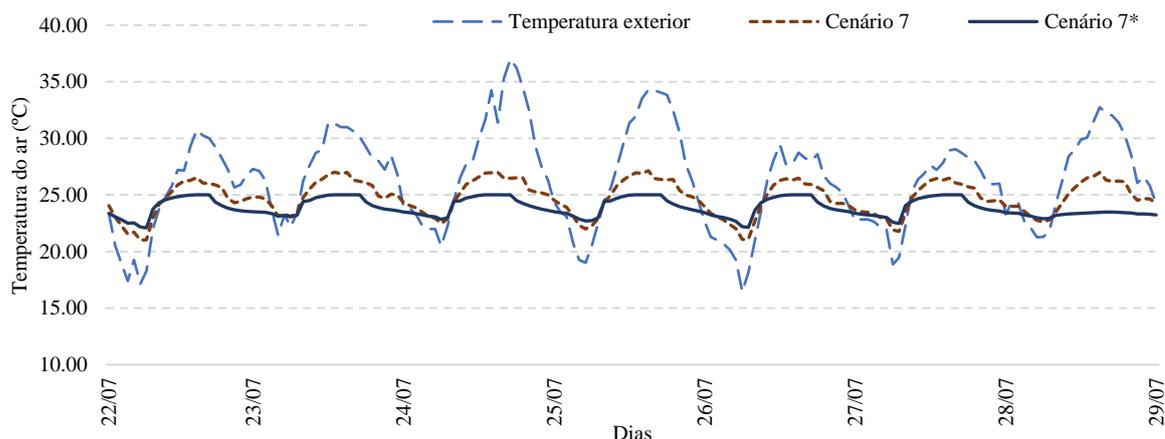


Figura 4.22 – Variação da temperatura interior na semana de dimensionamento no verão, considerando o efeito do ar-condicionado (Clima Csa – Faro)

Aqui verifica-se novamente uma uniformização do desenvolvimento da curva de temperatura, com uma redução da amplitude térmica na semana de dimensionamento para cerca de 3°C, registando-se uma temperatura mínima de 22.08°C.

Neste caso, a análise da temperatura interior do compartimento será realizada para sala de estar do piso 0, que, de certo modo, não apresenta uma grande exposição solar.

Contudo, como apresentado na Figura 4.23, no cenário 5 são registados valores muito superiores aos 25°C, justificando também a necessidade de incluir na análise sistemas de arrefecimento.

Este compartimento tem, segundo o modelo estudado, ocupação máxima das 7 às 9 horas e das 19 às 21 horas, sendo estes períodos perceptíveis na análise do cenário 7, onde vemos por dia dois patamares de 25°C, que correspondem à utilização do ar-condicionado aquando da ocupação do espaço.

No entanto, comparando com o cenário 7*, para que seja garantida ao longo do dia a temperatura de conforto, o sistema de arrefecimento deve funcionar praticamente a toda a hora do dia, na semana de dimensionamento no verão.

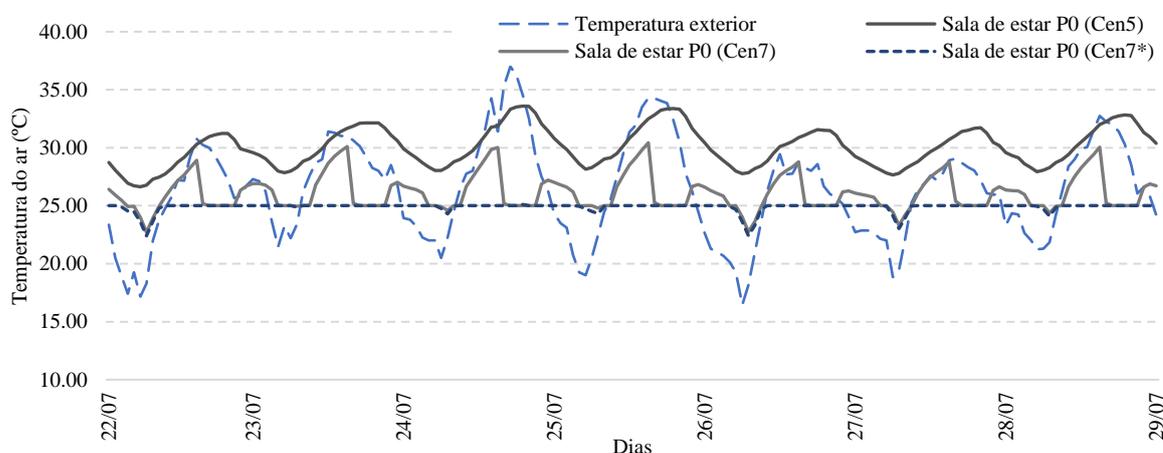


Figura 4.23 – Variação da temperatura interior na sala de esta do piso 0 na semana de dimensionamento no verão, nas diferentes fases do processo iterativo (Clima Csa – Faro)

Para a estação de aquecimento, como ilustra a Figura 4.24, as conclusões retiradas desta análise são as mesmas que para a respetiva situação no clima Csb: há também uma melhoria da temperatura interior, cumprindo-se os limites indicados, e, de forma geral, não é tão notório o impacto do funcionamento do ar-condicionado.

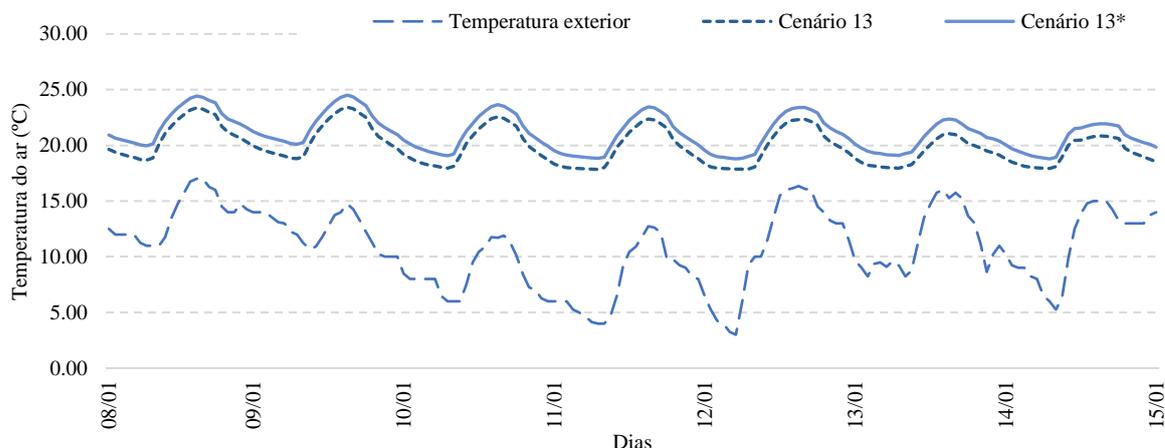


Figura 4.24 – Variação da temperatura interior na semana de dimensionamento no inverno, considerando o efeito do ar-condicionado (Clima Csa – Faro)

No seguimento da análise à semana de dimensionamento no inverno para o clima Csa, Figura 4.25, analisando agora o comportamento térmico da sala de estar do piso 0, é possível validar que a necessidade de aquecimento do compartimento do edifício, nesta estação do ano, coincide com o período de ocupação das 19 às 21 horas. Não havendo, portanto, uma diferença significativa entre os cenários 13 e 13*.

No entanto, à semelhança do que temos verificado, serão sempre necessários sistemas de aquecimento para que em determinados dias sejam garantidas temperaturas mínimas superiores aos 18°C.

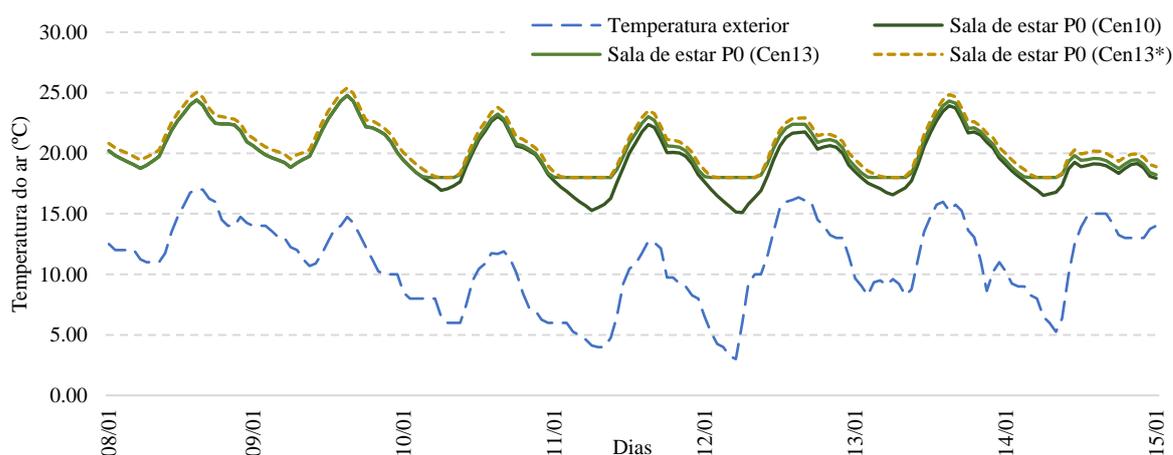


Figura 4.25 – Variação da temperatura interior na sala de esta do piso 0 na semana de dimensionamento no inverno, nas diferentes fases do processo iterativo (Clima Csa – Faro)

Resumidamente, as necessidades de arrefecimento e aquecimento são notoriamente distintas ao longo do estudo.

Na estação de arrefecimento o ar-condicionado tem um papel fundamental na limitação das temperaturas máximas verificadas, e apesar de sempre que é ativado garantir a temperatura máxima de conforto de 25°C, o seu funcionamento independentemente da ocupação dos espaços é mais eficiente na análise global da temperatura máxima verificada no edifício.

Como inicialmente foi verificado que os edifícios teriam melhor comportamento passivo no inverno, do ponto de vista da garantia da temperatura de conforto, o desempenho do ar-condicionado na estação de aquecimento é menos relevante muito embora seja necessário limitar nas semanas de dimensionamento, principalmente, a temperatura mínima verificada aos 18°C.

Como complemento a esta análise, as figuras seguintes ilustram as necessidades anuais de energia dos sistemas de arrefecimento e de aquecimento para os dois climas em estudo e para os cenários tratados neste subcapítulo.

Na primeira, Figura 4.26, a importância de recorrer ao ar-condicionado para o edifício em Coimbra é repartida entre as alturas mais críticas no verão e no inverno, para a condição normal de utilização, nas quais o consumo é muito semelhante. Na estação de arrefecimento, nos meses de abril a setembro são necessários 759.98 Wh/m² e na estação de aquecimento, nos meses de outubro a março, são necessários 753.71 Wh/m², perfazendo um total de 1513.70 Wh/(m²a).

Para a condição de utilização máxima, ou seja, quando o ar-condicionado é ativado sempre que a temperatura de conforto esteja fora do intervalo admitido, verifica-se um aumento do consumo de energia no verão e uma redução no inverno. Esta redução na estação de aquecimento deve-se ao pressuposto considerado: da mesma forma que o funcionamento do ar-condicionado está associado aquando dos limites de temperatura não são cumpridos, a utilização dos dispositivos de proteção da envolvente envidraçada segue o mesmo critério, o que leva a uma necessidade menor de energia para repor a temperatura mínima nos compartimentos do edifício. Por exemplo, na condição normal de utilização, no inverno, num quarto os dispositivos de proteção só seriam ativados aquando da ocupação do compartimento e quando a temperatura de conforto for inferior aos 18°C, na condição de utilização máxima, o critério da ocupação não é colocado e por isso os dispositivos de proteção entram em funcionamento mais cedo, reduzindo as perdas de energia para o exterior.

Nesta condição de utilização máxima, verifica-se uma necessidade de 1405.12 Wh/m² no verão e 468.00 Wh/m² no inverno, o que dá um total de 1873.12 Wh/(m²a).

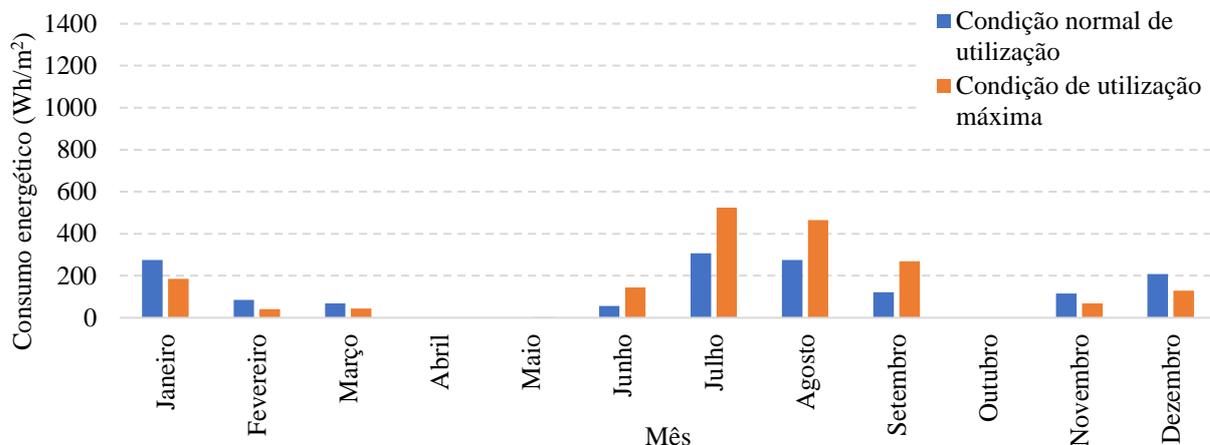


Figura 4.26 – Consumo energético anual (Clima Csb - Coimbra)

Para o edifício em Faro destaca-se a estação de arrefecimento em comparação com a estação de aquecimento, nas diferentes condições de utilização. Como ilustrado na Figura 4.27, os meses de julho e agosto têm um impacto grande no consumo energético ao longo do ano.

Na condição normal de utilização verifica-se um consumo de 1898.80 Wh/m² no verão e 293.48 Wh/m² no inverno, sendo o total anual de 2192.28 Wh/(m²a).

Na condição de utilização máxima, no verão são consumidos 3526.98 Wh/m² e no inverno apenas 170.54 Wh/m², o que leva a um consumo anual de 3697.52 Wh/(m²a).

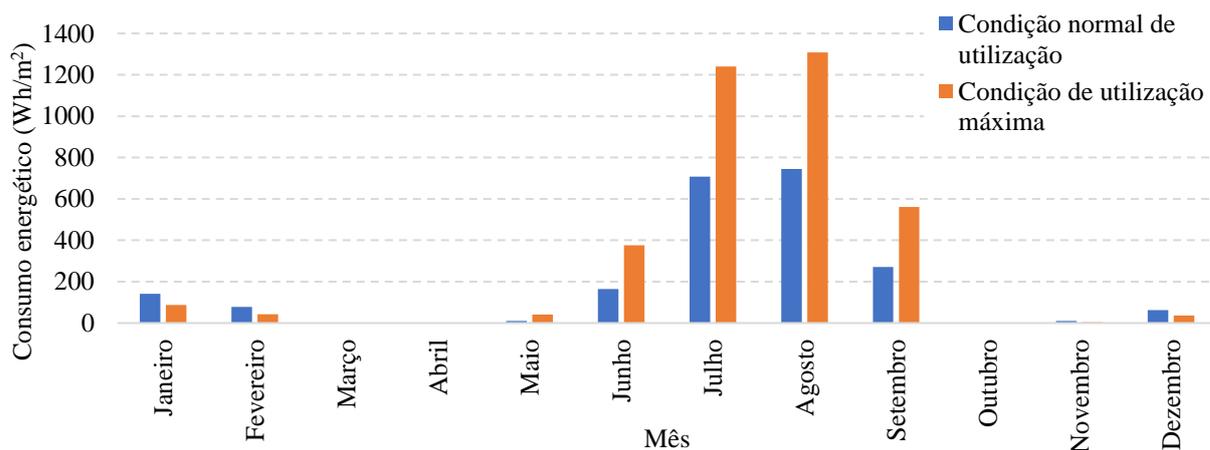


Figura 4.27 – Consumo energético anual (Clima Csa - Faro)

Em suma, as necessidades energéticas verificadas para a estação de arrefecimento e para a estação de aquecimento são muito inferiores ao limite imposto na norma da *PassivHouse*

(15000 Wh/(m²a), para cada estação), o que nos leva a concluir, após este processo iterativo e nas várias análises realizadas, que o contributo das soluções passivas associado a um conjunto de boas práticas de obtenção e redução de ganhos energéticos é importante na redução das necessidades energéticas de sistemas de arrefecimento e de aquecimento.

Contudo, garantido uma temperatura de conforto entre os 18°C e os 25°C torna-se imperativo recorrer a estes sistemas, consoante a altura do ano e a ocupação normal dos compartimentos, por forma a melhorar o comportamento térmico global dos edifícios analisados.

4.4 Análise de ciclo de vida

Por forma a avaliar os impactes ambientais das soluções definidas, relacionados com os materiais considerados nas duas soluções, realizou-se uma análise comparativa de ciclo de vida (ACV) para um período de vida útil dos edifícios de 50 anos, de acordo com as normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006.

Através de alguns indicadores de impactes ambientais apresentados no Quadro 4.6, como por exemplo: o potencial de acidificação (AP), o aquecimento global (GWP) e o potencial de criação de ozono fotoquímico (POCP); conclui-se que o edifício em Coimbra tem um impacto ambiental inferior ao edifício de Faro, destacando-se, principalmente, pelo menor consumo de matéria-prima na solução estrutural.

Quadro 4.6 – Indicadores de impactes ambientais considerados

Indicadores de impactes ambientais	Coimbra	Faro
Potencial de acidificação (AP) [kg SO ₂ eq.]	128.71	162.38
Aquecimento global (GWP) [kg CO ₂ eq.]	39920.00	52390.00
Potencial de criação de ozono (POCP) [kg eteno eq.]	10.55	15.17

Desta análise conclui-se também, na generalidade, que as taxas de reciclagem utilizadas em fim-de-vida são de 80% para a estrutura metálica e todos os materiais de isolamento, 70% para o betão e 20% para o OSB. O que ressalva a importância da conceção estrutural, particularmente, na fase inicial de projeto, tendo em consideração a localização dos edifícios e as ações atuantes.

5 Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões

O desenvolvimento tecnológico e sustentável é também apoiado pela importância dos setores da indústria e da construção, que caminham lado a lado na definição de novos conceitos e de novas soluções alternativas. Este percurso, suportado pelas Diretivas Europeias, segue no caminho da transição energética, com o princípio da substituição dos combustíveis fósseis por energia proveniente de fontes renováveis, sendo desta forma que pretende, principalmente, garantir a médio e longo prazo a sustentabilidade ambiental, económica e social.

As exigências relativas à eficiência energética dos edifícios são, portanto, consequência deste conjunto de medidas. Contudo, antes de definir um futuro, é importante olhar ao passado, e, nesse sentido, valorizar e analisar as soluções que estiveram na base da resolução dos problemas que ao longo dos anos foram sendo atenuados. Neste âmbito, é notório o papel dos princípios da arquitetura vernacular portuguesa, que devem constar nos princípios do desenvolvimento da construção e da arquitetura.

A utilização de soluções passivas, com vista ao desenvolvimento de edifícios mais eficientes, associada à construção metálica e aos seus princípios de sustentabilidade, são meios determinantes para que a construção assuma um papel preponderante no cumprimento das metas definidas.

Os pressupostos admitidos e a metodologia de análise seguida nesta dissertação têm como objetivo garantir estes critérios, assim como demonstrar a viabilidade de soluções em estrutura metálica para edifícios de habitação e a importância das soluções passivas na redução dos gastos com sistemas de climatização.

No que se refere ao pré-dimensionamento estrutural, partindo de uma solução sem contraventamentos, seria expectável o aumento das secções das colunas para o edifício mais exposto à ação do vento, nesta análise aquele que está localizado em Faro. Não tendo sido consideradas outras ações relevantes de carácter local, como por exemplo a ação sísmica e não sendo a ação da neve condicionante nos dois casos, conclui-se que, numa primeira abordagem ao dimensionamento estrutural, a ação do vento é determinante na definição das secções das colunas, assim como a sobrecarga de utilização na definição das secções das vigas. No entanto, os resultados obtidos tendo em conta a arquitetura do edifício assim como o mesmo modelo

estrutural, mostram a importância da conceção arquitetónica e estrutural de acordo com a localização do edifício.

Respetivamente ao desempenho energético dos edifícios, o processo iterativo e o estudo paramétrico seguido nesta análise foram definidos de acordo com o objetivo proposto: a definição de soluções passivas tendo em vista a redução dos gastos energéticos em sistemas de aquecimento e arrefecimento. A abordagem inicial, após a definição da envolvente exterior, definiu qual a estação do ano mais relevante para o dimensionamento do comportamento térmico dos edifícios e, de forma geral, constatou-se que a estação de arrefecimento, nos períodos mais críticos do verão, é aquela que carece de maior atenção e que influenciará a determinação das soluções passivas.

Para o edifício em Coimbra, clima Csb, na semana de dimensionamento no verão, a adoção de soluções passivas permitiu, em média, a redução de 2°C da temperatura máxima verificada em relação à primeira iteração. Considerando o uso normal de sistemas de arrefecimento verificou-se, em média, uma redução de 5°C em relação à situação inicial e uma redução de 3°C em relação à média de temperatura máxima verificada para os cenários do estudo paramétrico.

Para o mesmo período do ano, no clima Csa, o edifício em Faro apresenta resultados semelhantes. Em média, verifica-se uma redução de aproximadamente 2°C da temperatura máxima verificada em relação à primeira iteração, demonstrando a importância das soluções de sombreamento consideradas e da ventilação natural nos períodos em que a temperatura exterior é mais baixa. Posteriormente, com a utilização de sistemas de ar-condicionado, em relação à situação inicial, a média de temperatura máxima verificada apresenta uma redução de sensivelmente 4°C, enquanto em relação ao estudo paramétrico a redução de temperatura ronda os 2°C.

Na estação de aquecimento, nos dois climas estudados, não existe grande diferença entre a situação inicial e a média dos resultados obtidos no estudo paramétrico, comprovando a necessidade de uma abordagem mais atenta à estação de arrefecimento. No entanto, verifica-se que a maximização dos ganhos energéticos durante o dia tem um papel importante no aumento da média da temperatura máxima verificada, o que contribui de forma geral para o aumento da temperatura média ao longo do dia nos dois edifícios. Contudo, durante a noite, as perdas de calor têm de ser combatidas através do recurso a sistemas de aquecimento para manter a temperatura interior acima do limite de conforto, e, nestes cenários, verifica-se em média um aumento da temperatura mínima de 2.50°C para o edifício de Coimbra e de aproximadamente 1.50°C para o edifício em Faro.

Em suma, após esta análise, é notório o papel das soluções passivas, nomeadamente, os dispositivos de sombreamento e a proteção dos vãos envidraçados, na redução da temperatura máxima verificada nos edifícios durante o verão, tanto para o clima Csb como para o clima Csa. Contudo, verifica-se sempre a necessidade de recorrer a sistemas de climatização ao longo de todo o ano, maioritariamente, nos períodos mais críticos de cada estação, por forma a cumprir os limites da temperatura interior de conforto. Porém, a adoção de soluções passivas e de boas práticas de utilização dos edifícios permitem que as necessidades de arrefecimento e aquecimento sejam baixas, em comparação com os valores sugeridos na norma *Passivhouse*, o que demonstra a importância destas soluções na eficiência energética dos edifícios e na redução dos custos associados aos sistemas de climatização.

5.2 Trabalhos futuros

Os temas da sustentabilidade, da transição energética e da garantia da eficiência energética dos edifícios têm tido, nos últimos tempos, um grande impacto na sociedade e no desenvolvimento da tecnologia, e devem ser, por isso, alvo de estudo constante, com o objetivo de consciencializar e sensibilizar a sociedade civil para amenizar os problemas de futuro.

Independentemente das normas ou dos regulamentos seguidos, importa garantir condições de habitabilidade nos edifícios em Portugal. E é neste ponto que devem convergir as diferentes abordagens ao tema, o que torna importante a adoção da melhor estratégia para a conceção arquitetónica dos edifícios.

Numa primeira fase, seria relevante definir os conceitos e as soluções adotadas nos edifícios em cada região do nosso país, adaptando-as à arquitetura contemporânea e servindo de base, por exemplo, às revisões dos Planos Diretores Municipais. Desta forma, o balanço entre a arquitetura vernacular e a arquitetura contemporânea poderia ser garantido na fase inicial de projeto, levando à consideração de soluções passivas no projeto de edifícios, inseridas no contexto regional.

A segunda fase passaria por definir uma análise mais pormenorizada consoante a região do território nacional, e, nesse âmbito, perceber a convergência das diferentes abordagens na definição do desempenho energético dos edifícios. Esta análise permitiria uma melhoria dos regulamentos nacionais, em conformidade com as Diretivas Europeias, no sentido do desenvolvimento de soluções mais eficientes.

Por fim, e de forma genérica, seria pertinente perceber, também, o impacto da indústria no setor da construção e a influência da mesma na sustentabilidade das soluções desenvolvidas, compreendendo a influência dos processos de fabrico na definição dos produtos da construção.

Referências bibliográficas

ADENE – Agência para a energia, Agência Portuguesa do Ambiente, EPAL (2018). “Ficha 6.a – Intervenções na envolvente opaca do edifício”. Casa Eficiente 2020, Catálogo de soluções técnicas. Portugal.

ADENE – Agência para a energia, consulmark (2017). “Estudo de mercado no âmbito das campanhas de sensibilização e de promoção da eficiência energética na Habitação Particular”, Relatório Final. Lisboa, Portugal.

ADENE – Agência para a energia, DGEG – Direção-Geral de Energia e Geologia (2020). “Guia SCE – Indicadores de Desempenho Energético (REH)”. Portugal.

Associação Passivhaus Portugal – PHPT (2019). “Manifesto passive house para todos”. Ílhavo, Portugal.

Associação Passivhaus Portugal – PHPT (2019). “Reivindicar a norma Passivhaus”. Ílhavo, Portugal.

CEN (2009). Norma Portuguesa NP EN 1990, Eurocódigo 0 – Bases para o projeto de estruturas. IPQ, Portugal.

CEN (2009). Norma Portuguesa NP EN 1991-1-1, Eurocódigo 1, Parte 1-1 – Ações gerais – Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios. IPQ, Portugal.

CEN (2009). Norma Portuguesa NP EN 1991-1-3, Eurocódigo 1, Parte 1-3 – Ações gerais – Ação da neve. IPQ, Portugal.

CEN (2010). Norma Portuguesa NP EN 1991-1-4, Eurocódigo 1, Parte 1-4 – Ações gerais – Ação do vento. IPQ, Portugal.

CEN (2010). Norma Portuguesa NP EN 1993-1-1, Eurocódigo 3, Parte 1-1 – Projeto de estruturas de aço: Regras gerais e regras para edifícios. IPQ, Lisboa, Portugal.

CEN (2010). Norma Portuguesa NP EN 1993-1-8, Eurocódigo 3, Parte 1-8 – Projeto de estruturas de aço: Projeto de ligações. IPQ, Portugal.

Correia da Silva, J. J., Sirgado, J. (2015). “Arquitetura Vernácula, Arquitetura Bioclimática e Eficiência Energética”. Livro de Atas do Seminário reVer: “Contributos da arquitetura vernácula portuguesa para a sustentabilidade do ambiente construído”. Porto, Portugal.

Craveiro, A., Lopes, A. G., Santos, P., Simões da Silva, L. (2011). “Ventilação e Eficiência Energética em Edifícios Residenciais”. VIII Congresso de Construção Metálica e Mista. ISISE e CICC, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, ADAI LAETA, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra. Guimarães, Portugal.

Diretiva Europeia 2010/31/EU (2010). Jornal Oficial da União Europeia: Diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de maio de 2010 relativa ao “Desempenho Energético de Edifícios”. Bruxelas, Bélgica.

Diretiva Europeia 2012/27/EU (2012). Jornal Oficial da União Europeia: Diretiva 2012/27/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de outubro de 2012 relativa à “Eficiência Energética”. Bruxelas, Bélgica.

Diretiva Europeia 2018/844/EU (2018). Jornal Oficial da União Europeia: Diretiva 2018/844/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018, que altera a Diretiva 2010/31/EU e a Diretiva 2012/27/EU. Bruxelas, Bélgica.

Fernandes, J., Mateus, R., Bragança, L., Pimenta, C. (2015). “O Contributo dos Materiais Vernáculos para Sustentabilidade do Ambiente Construído”. Livro de Atas do Seminário reVer: “Contributos da arquitetura vernácula portuguesa para a sustentabilidade do ambiente construído”. Porto, Portugal.

Fernandes, J., Mateus, R., Gervásio, H. (2018). “Estratégias de arrefecimento passivo da arquitetura vernácula do sul do país”. Edifícios e Energia – Sustentabilidade a dois ritmos, N.º119. Universidade do Minho, Portugal.

Fernandes, J., Pimenta, C., Mateus, R., Bragança, L., Silva, S. (2015). “A Influência das Estratégias Vernáculas de Adaptação ao Clima no Comportamento Térmico dos Edifícios – Beira Alta e Alentejo”. Livro de Atas do Seminário reVer: “Contributos da arquitetura vernácula portuguesa para a sustentabilidade do ambiente construído”. Porto, Portugal.

Ferreira, Bárbara Rita Almeida N. S. (2016). “Edifícios com Consumo Energético Quase Nulo”. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, Portugal.

Geletka, Vladimir e Sedláková, Anna (2012). “Shape of Buildings and Energy Consumption”. Politechniki Krakowskiej, Krakow, Polska. Czasopismo Techniczne, 2-B/2012, Issue 3, Year 109.

Gonçalves, H., Graça, João Mariz (2004). “Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal”. Departamento de Energias Renováveis – INETI, ISBN 972-8268-34-3. Lisboa, Portugal.

ISO 14040:2006 (2006), Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework

ISO 14044:2006 (2006), Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines

Jaspart, Jean-Pierre e Weynand, Klaus (2016). “Design of Joints in Steel and Composite Structures”. Eurocode Design Manuals, European Convention for Constructional Steelwork (ECCS) e Ernst & Sohn.

Martins, C., Santos, P., Rosa, N., Simões da Silva, L. (2017). “Edifícios com Estrutura Leve em Aço Enformado a Frio (Lsf): Vantagens e Desvantagens do Sistema”. XI Congresso de Construção Metálica e Mista, ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

Mendonça, Paulo (2015). “Vantagens da Utilização de Materiais Naturais ou Pouco Transformados”. Livro de Atas do Seminário reVer: “Contributos da arquitetura vernácula portuguesa para a sustentabilidade do ambiente construído”. Porto, Portugal.

Monteiro, Andreia Cristiana de Oliveira (2011). “A Arquitetura Bioclimática – Experiência e Aplicação em Portugal”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Arquitetura da Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

Leal, Rúben Alves (2015). “Construção Modular em LSF – Estudo do Comportamento Térmico Passivo”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

Portaria n.º 379-A/2015 (2015). “Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) – Requisitos de conceção para edifícios novos e intervenções”. Diário da República, 1ª série – N.º207 – 22 de outubro de 2015. Lisboa, Portugal.

Rosa, N., Costa, J. J., Santos, P., Gervásio, H. (2017). “Desempenho Térmico de um Sistema de Ventilação com Permutador de Calor Solo-Ar”. XI Congresso de Construção Metálica e Mista, ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra. ADAI LAETA, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.

Santos, P., Simões da Silva, L., Ungureanu, V. (2012). “Energy Efficiency of Light-Weight Steel-Framed Buildings”. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS) – Technical Committee 14 – Sustainability & Eco-Efficiency of Steel Construction, N.º129, 1st Edition.

Simões da Silva, L., Gervásio, H. (2007). “Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas: Métodos Avançados”. CMM – Construção Metálica e Mista, 1^a Edição. Coimbra, Portugal.

Simões, Rui A. D. (2014). “Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas”. CMM – Construção Metálica e Mista, 3^a Edição. Coimbra, Portugal.

Silvestre, N., Pires, J., Santos, A. (2013). “Manual de Conceção de Estruturas e Edifícios em LSF Light Steel Framing”. CMM – Construção Metálica e Mista, 1^a Edição. Coimbra, Portugal.

ADENE@ (2021). <https://www.adene.pt/edificios/>, “Eficiência Energética nos Edifícios” (Página Internet Oficial). Lisboa, Portugal.

AMORIM@ (2021). <https://www.amorimcorkinsulation.com/produtos/>, “Aglomerado de Cortiça Expandida” (Página Internet Oficial). Portugal.

ANCV@ (2021). <https://www.greenroofs.pt/>, ANCV – Associação Nacional de Coberturas Verdes (Página Internet Oficial). Portugal.

Conselho Europeu@ (2021). <https://www.consilium.europa.eu/pt/#>, Conselho da União Europeia (Página Internet Oficial). Bruxelas, Bélgica.

Ecotecnologias@ (2021). https://ecotecnologias.org/?page_id=561, “Telhados Verdes – Conceito”, (Página Internet Oficial). Rio Grande do Sul, Brasil.

Futureng@ (2021). <http://www.futureng.pt/construcao-modular>, “Construção Modular”, Futureng – Projetos e Construção Civil, Lda. (Página Internet Oficial). São João da Talha, Portugal

Futureng@ (2021). <http://www.futureng.pt/portfolio/futureng>, “Portfólio Futureng, Galeria de obras”, Futureng – Projetos e Construção Civil, Lda. (Página Internet Oficial). São João da Talha, Portugal

IPMA@ (2021). <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima>, “Normais Climatológicas” (Página Internet Oficial). Lisboa, Portugal.

ITECONS@ (2021), <https://www.itecons.uc.pt/services/projects>, “Projeto: RiceHUSK+ - Compósitos Cimentícios com Casca de Arroz para Soluções Pré-Fabricadas de Painéis Multicamada e Barreiras Acústicas”. (Página Internet Oficial). Coimbra, Portugal.

Passivhaus@ (2021). <http://www.passivhaus.pt/projects>, “Passive Houses em Certificação Habitação Pagal, Água Longa – Santo Tirso”, Associação Passivhaus Portugal – PHPT (Página Internet Oficial). Ílhavo, Portugal.

Sistema de Certificação Energética@ (2021). <https://www.sce.pt/>, “Certificar é Valorizar, Certificação Energética dos Edifícios” (Página Internet Oficial). Lisboa, Portugal.

TERRACO®@ (2021). <https://www.terraco-eifs.com/>, “Terraco EIFS – Exterior Insulation Finishing Systems” (Página Internet Oficial).

União Europeia@ (2021). https://europa.eu/european-union/index_pt, (Página Internet Oficial). Bruxelas, Bélgica.

Anexos

Anexo A – Definição das ações

- Resumo da Ação da Neve de acordo com a NP EN 1991-1-3

	Coimbra	Faro
Altitude média considerada [m]	193.00	80.00
Topografia	Normal	Exposta ao vento
Coefficiente de exposição, C_e	1.00	0.80
Coefficiente térmico, C_t	1.00	1.00
Coefficiente de forma para a carga da neve, μ_1	0.80	0.80
Coefficiente dependente da zona, C_z	0.20	0.10
Valores caraterísticos da carga da neve ao nível do solo, s_k [kN/m ²]	0.23	0.10
Carga de neve em coberturas, s [kN/m ²]	0.18	0.07

- Resumo da Ação do Vento de acordo com a NP EN 1991-1-4

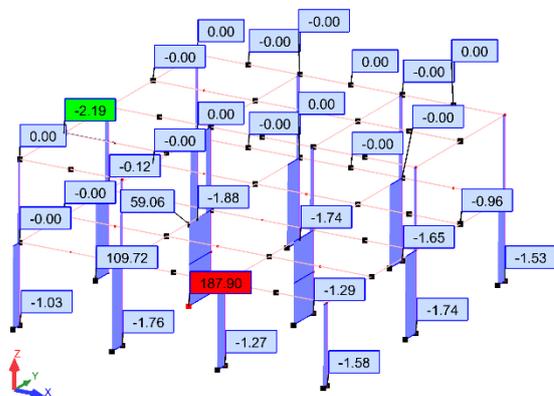
	Coimbra	Faro
Coefficiente de direção, C_{dir}	1.00	1.00
Coefficiente de sazão, C_{dir}	1.00	1.00
Valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$ [m/s]	27.00	30.00
Valor de referência da velocidade do vento, v_b [m/s]	27.00	30.00

	Coimbra	Faro
Categoria de terreno	IV	0
Comprimento de rugosidade, z_0 [m]	1.00	0.003
Altura mínima [m]	10.00	1.00
$z_{0,II}$ [m]	0.05	0.05
z_{max} [m]	200.00	200.00
Altura acima do nível do solo [m]	6.00	6.00
Coefficiente de terreno, k_r	0.23	0.16
Coefficiente de rugosidade, $c_r(z)$	0.54	1.19
Coefficiente de orografia, $c_0(z)$	1.00	1.00
Coefficiente de turbulência, k_I	1.00	1.00
Intensidade de turbulência, $I_v(z)$	0.43	0.13
Pressão dinâmica de pico, $q_p(z)$ [kN/m ²]	0.54	1.52

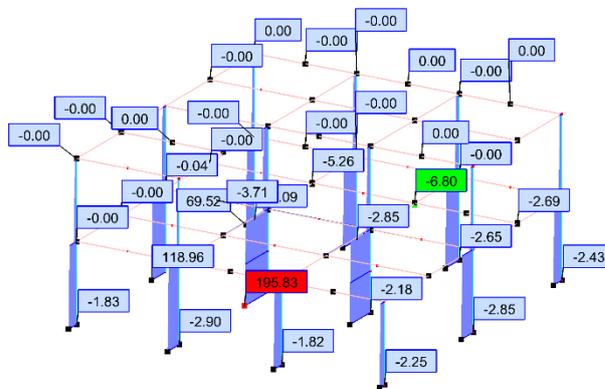
Valores de pressão assumidos por zona [kN/m ²]	Coimbra	Faro
Zona A	-0.75	-2.13
Zona B	-0.54	-1.52
Zona D	0.55	1.57
Zona E	-0.31	-0.87

Anexo B – Envolvente de esforços

- Esforço axial [kN]

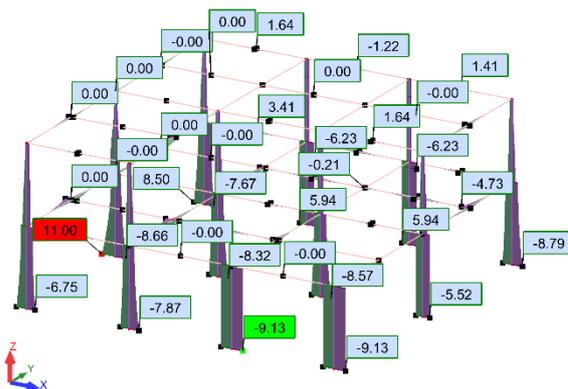


a) Coimbra

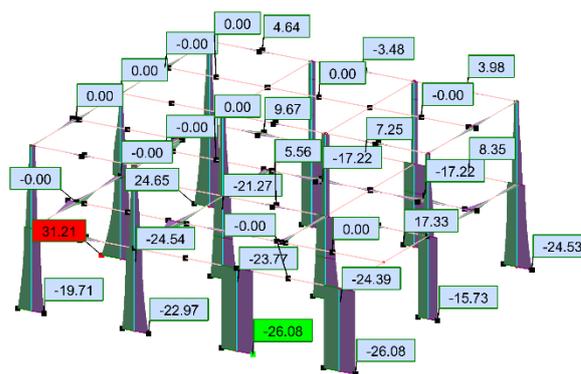


b) Faro

- Esforço transverso y [kN]

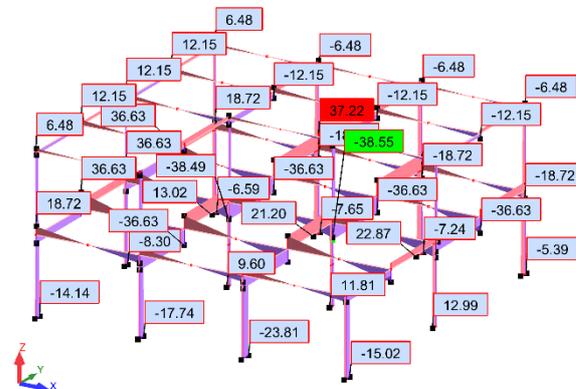


a) Coimbra

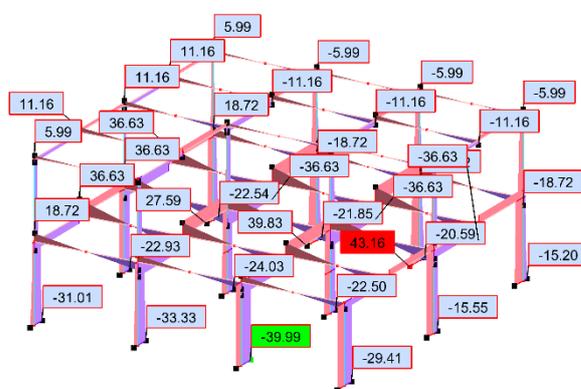


b) Faro

- Esforço transverso z [kN]

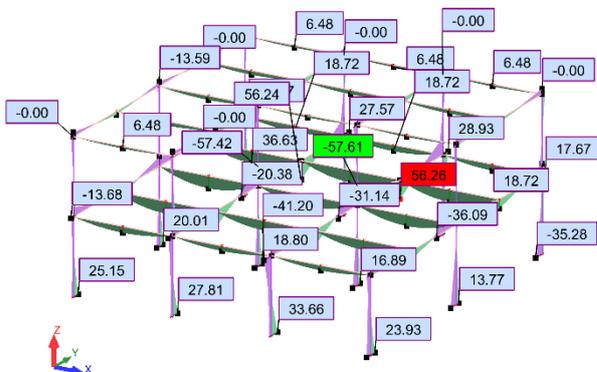


a) Coimbra

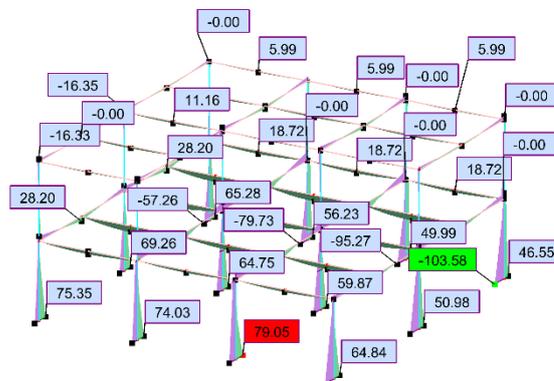


b) Faro

• Momento fletor y-y [kN.m]

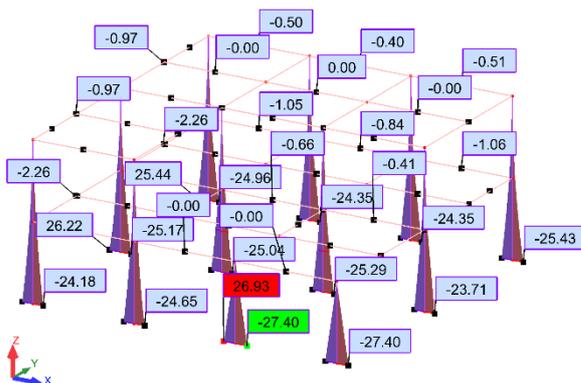


a) Coimbra

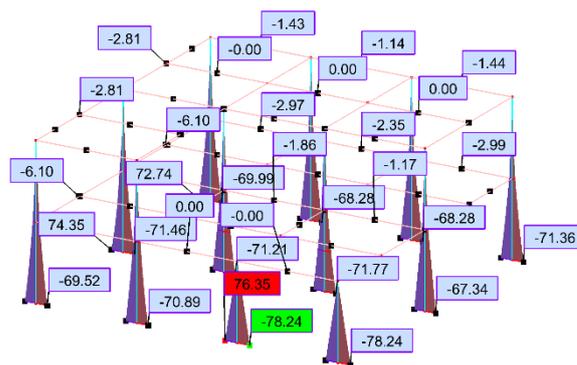


b) Faro

• Momento fletor z-z [kN.m]



a) Coimbra



b) Faro

Anexo C – Composição da envolvente exterior opaca

- Clima Csb – Edifício de Coimbra

Parede exterior			
Material	Esp. [mm]	Cama da	U [W/(m ² .°C)]
Argamassa de revestimento	10.0	Exterior	0.234
EPS	70.0	Intermédia	
Air Gap	50.0		
OSB	11.0		
Rock Wool	41.4		
Air Gap	114.0		
Rock Wool	41.4	Interior	
OSB	11.0		
Gypsum plasterboard	13.0		
Espessura total [mm]			

Parede interior			
Material	Esp. [mm]	Cama da	U [W/(m ² .°C)]
Gypsum plasterboard	13.0	Exterior	0.631
Stone Wool	11.0	Intermédia	
Air gap	40.0		
OSB	11.0		
Gypsum plasterboard	13.0	Interior	
Espessura total [mm]		88.0	

Telhado			
Material	Esp. [mm]	Cama da	U [W/(m ² .°C)]
Inertes	100.0	Exterior	0.251
Gravilha	50.0	Intermédia	
Tela asfáltica	10.0		
XPS	70.0		
Laje de betão	160.0		
Chapa perfilada	1.2		
Air gap	255.0		
Stone Wool	40.0		
Gypsum plasterboard	13.0		
Espessura total [mm]			

Pavimento interior				
Material	Esp. [mm]	Cama da	U [W/(m ² .°C)]	
Acabamento em madeira	19.1	Superior	0.255	
XPS	70.0	Intermédia		
Laje de betão	160.0			
Chapa perfilada	1.2			
Air gap	255.0			
Stone Wool	40.0			Inferior
Gypsum plasterboard	13.0			
Espessura total [mm]				

Pavimento exterior				
Material	Esp. [mm]	Cama da	U [W/(m ² .°C)]	
Acabamento em madeira	19.1	Superior	0.214	
XPS	70.0	Intermédia		
Laje de betão	160.0			
Chapa perfilada	1.2			
Air gap	255.0			
Stone Wool	70.6			Inferior
Gypsum plasterboard	13.0			
Espessura total [mm]				

Pavimento piso térreo				
Material	Esp. [mm]	Cama da	U [W/(m ² .°C)]	
Acabamento em madeira	19.1	Superior	0.421	
Air gap	50.0	Intermédia		
XPS	50.0			
Tela asfáltica	10.0			
Laje de betão	200.0			
Gravilha	50.0			Inferior
Espessura total [mm]				379.1

• Clima Csa – Edifício de Faro

Parede exterior			
Material	Esp. [mm]	Cama da	U [W/(m ² .°C)]
Argamassa de revestimento	10.0	Exterior	0.304
EPS	30.0	Intermédia	
Air Gap	50.0		
OSB	11.0		
Rock Wool	41.4		
Air Gap	114.0		
Rock Wool	41.4		
OSB	11.0	Exterior	
Gypsum plasterboard	13.0		
Espessura total [mm]			

Parede interior			
Material	Esp. [mm]	Cama da	U [W/(m ² .°C)]
Gypsum plasterboard	15.0	Exterior	0.510
Stone Wool	60.0	Intermédia	
Gypsum plasterboard	15.0	Interior	
Espessura total [mm]			90.0

Telhado			
Material	Esp. [mm]	Cama da	U [W/(m ² .°C)]
Inertes	100.0	Exterior	0.355
Gravilha	50.0	Intermédia	
Tela asfáltica	10.0		
XPS	30.0		
Laje de betão	160.0		
Chapa perfilada	1.2		
Air gap	255.0		
Stone Wool	40.0		
Gypsum plasterboard	13.0	Exterior	
Espessura total [mm]			

Pavimento interior				
Material	Esp. [mm]	Cama da	U [W/(m ² .°C)]	
Acabamento em madeira	19.1	Superior	0.364	
XPS	30.0	Intermédia		
Laje de betão	160.0			
Chapa perfilada	1.2			
Air gap	255.0			
Stone Wool	40.0			
Gypsum plasterboard	13.0			Inferior
Espessura total [mm]				

Pavimento exterior				
Material	Esp. [mm]	Cama da	U [W/(m ² .°C)]	
Acabamento em madeira	19.1	Superior	0.413	
XPS	30.0	Intermédia		
Laje de betão	160.0			
Chapa perfilada	1.2			
Air gap	255.0			
Stone Wool	30.0			
Gypsum plasterboard	13.0			Inferior
Espessura total [mm]				

Pavimento piso térreo				
Material	Esp. [mm]	Cama da	U [W/(m ² .°C)]	
Acabamento em madeira	19.1	Superior	0.421	
Air gap	50.0	Intermédia		
XPS	50.0			
Tela asfáltica	10.0			
Laje de betão	200.0			
Gravilha	50.0			Inferior
Espessura total [mm]				

Anexo D – Resumo da análise do comportamento térmico

- Clima Csb – Edifício de Coimbra

Semana de dimensionamento no verão

Envolvente	Temperatura exterior (°C)	Pré-dimensionamento		Estudo paramétrico							
		It. 0	It. 1	Cen. 1	Cen. 2	Cen. 3	Cen. 4	Cen. 5	Cen. 6	Cen. 7	Cen. 7*
		Temperatura do ar (°C)									
Valores máximos	37.20	31.84	32.36	30.35	30.61	29.97	30.72	29.69	27.40	26.77	25.00
Valores mínimos	15.05	23.06	23.91	21.56	21.70	21.08	21.76	20.98	19.21	19.10	21.04
Amplitude térmica	22.15	8.77	8.45	8.79	8.91	8.88	8.96	8.71	8.19	7.67	3.96
Valores médios	22.76	27.06	27.63	25.97	26.17	25.65	26.25	25.49	23.24	22.60	23.39

Semana típica no verão

Envolvente	Temperatura exterior (°C)	Pré-dimensionamento		Estudo paramétrico							
		It. 0	It. 1	Cen. 1	Cen. 2	Cen. 3	Cen. 4	Cen. 5	Cen. 6	Cen. 7	Cen. 7*
		Temperatura do ar (°C)									
Valores máximos	27.15	26.74	27.93	26.45	26.70	25.79	26.79	25.66	25.15	24.35	24.86
Valores mínimos	14.10	22.78	22.25	19.68	19.72	19.06	19.75	19.02	18.83	18.76	20.89
Amplitude térmica	13.05	3.97	5.68	6.77	6.97	6.74	7.04	6.64	6.32	5.59	3.97
Valores médios	20.24	24.73	24.96	23.13	23.29	22.44	23.35	22.35	21.94	21.63	22.98

Semana de dimensionamento no inverno

Envolvente	Temperatura exterior (°C)	Pré-dimensionamento		Estudo paramétrico							
		It. 0	It. 1	Cen. 8	Cen. 9	Cen. 10	Cen. 11	Cen. 12	Cen. 13	Cen. 14	Cen. 13*
		Temperatura do ar (°C)									
Valores máximos	14.75	17.96	21.07	21.14	20.08	21.14	20.08	17.11	21.96	21.96	22.96
Valores mínimos	0.70	14.34	15.50	15.62	15.26	15.62	15.26	10.77	18.00	18.00	18.44
Amplitude térmica	14.05	3.62	5.57	5.52	4.82	5.52	4.82	6.34	3.96	3.96	4.51
Valores médios	8.14	16.37	17.99	18.06	17.61	18.06	17.61	14.32	19.00	19.00	19.91

Semana típica no inverno

Envolvente	Temperatura exterior (°C)	Pré-dimensionamento		Estudo paramétrico							
		It. 0	It. 1	Cen. 8	Cen. 9	Cen. 10	Cen. 11	Cen. 12	Cen. 13	Cen. 14	Cen. 13*
		Temperatura do ar (°C)									
Valores máximos	16.60	19.66	22.23	22.28	21.54	22.28	21.54	20.01	22.54	22.54	23.54
Valores mínimos	3.18	15.40	16.20	16.32	15.94	16.32	15.94	11.54	18.00	18.00	18.58
Amplitude térmica	13.43	4.26	6.02	5.95	5.60	5.95	5.60	8.47	4.54	4.54	4.95
Valores médios	10.46	17.23	18.51	18.58	18.18	18.58	18.18	15.39	19.16	19.16	20.16

- Clima Csa – Edifício de Faro

Semana de dimensionamento no verão

Envolvente	Temperatura exterior (°C)	Pré-dimensionamento		Estudo paramétrico							
		It. 0	It. 1	Cen. 1	Cen. 2	Cen. 3	Cen. 4	Cen. 5	Cen. 6	Cen. 7	Cen. 7*
		Temperatura do ar (°C)									
Valores máximos	37.00	29.40	31.10	29.24	29.43	29.07	29.53	28.96	27.15	27.13	25.00
Valores mínimos	16.45	24.21	24.55	22.60	22.69	22.53	22.72	22.48	21.02	21.01	22.08
Amplitude térmica	20.55	5.19	6.55	6.64	6.74	6.54	6.80	6.47	6.13	6.13	2.92
Valores médios	26.28	26.74	27.81	26.70	26.82	26.57	26.87	26.50	24.77	24.76	23.88

Semana típica no verão

Envolvente	Temperatura exterior (°C)	Pré-dimensionamento		Estudo paramétrico							
		It. 0	It. 1	Cen. 1	Cen. 2	Cen. 3	Cen. 4	Cen. 5	Cen. 6	Cen. 7	Cen. 7*
		Temperatura do ar (°C)									
Valores máximos	29.15	28.03	29.68	27.62	27.85	27.22	27.87	27.15	26.27	26.23	25.00
Valores mínimos	16.75	22.45	23.27	20.93	21.06	20.67	21.09	20.51	20.02	19.97	21.46
Amplitude térmica	12.40	5.58	6.40	6.69	6.79	6.55	6.78	6.64	6.26	6.27	3.54
Valores médios	23.14	25.43	26.45	24.73	24.90	24.47	24.94	24.36	23.48	23.43	23.54

Semana de dimensionamento no inverno

Envolvente	Temperatura exterior (°C)	Pré-dimensionamento		Estudo paramétrico							
		It. 0	It. 1	Cen. 8	Cen. 9	Cen. 10	Cen. 11	Cen. 12	Cen. 13	Cen. 14	Cen. 13*
		Temperatura do ar (°C)									
Valores máximos	17.00	21.41	23.37	23.43	22.42	23.43	22.42	21.67	23.43	23.43	24.51
Valores mínimos	3.00	15.27	16.49	16.60	16.15	16.60	16.15	12.80	17.84	17.84	18.79
Amplitude térmica	14.00	6.14	6.88	6.83	6.27	6.83	6.27	8.87	5.59	5.59	5.72
Valores médios	10.86	18.27	19.59	19.68	19.03	19.68	19.03	17.05	19.95	19.95	21.11

Semana típica no inverno

Envolvente	Temperatura exterior (°C)	Pré-dimensionamento		Estudo paramétrico							
		It. 0	It. 1	Cen. 8	Cen. 9	Cen. 10	Cen. 11	Cen. 12	Cen. 13	Cen. 14	Cen. 13*
		Temperatura do ar (°C)									
Valores máximos	18.00	21.91	23.72	23.78	22.36	23.78	22.36	22.12	23.77	23.77	24.91
Valores mínimos	6.15	16.87	17.62	17.72	17.35	17.72	17.35	15.31	18.00	18.00	19.20
Amplitude térmica	11.85	5.04	6.10	6.06	5.00	6.06	5.00	6.82	5.77	5.77	5.71
Valores médios	13.20	19.60	20.52	20.60	19.75	20.60	19.75	18.48	20.60	20.60	21.85

Anexo E – Resultados da Análise de Ciclo de Vida

- Edifício de Coimbra

	Total	Construção	Fim-de-vida	Reciclagem
Depleção abiótica (ADP elementos) [kg Sb eq.]	0.26	0.28	0.00	-0.02
Depleção abiótica (ADP fóssil) [MJ]	566300.00	587000.00	33900.00	-54600.00
Potencial de acidificação (AP) [kg SO ₂ eq.]	128.71	131.00	8.71	-11.00
Potencial de eutrofização (EP) [kg fósforo eq.]	17.46	16.10	2.18	-0.83
Ecotoxicidade Aquática de Água Doce. (FAETP inf.) [Kg DCB eq.]	866.60	801.00	12.50	53.10
Aquecimento global (GWP) [kg CO ₂ eq.]	39920.00	40800.00	4780.00	-5660.00
Aquecimento global (GWP), excluindo carbono biogénico [kg CO ₂ eq.]	50980.00	54500.00	2120.00	-5640.00
Potencial de toxicidade humana (HTP inf.) [Kg DCB eq.]	1605025.50	1350000.00	25.50	255000.00
Ecotoxicidade Aquática Marinha. (MAETP inf.) [Kg DCB eq.]	2328300.00	2870000.00	-617000.00	75300.00
Destruição da camada de ozono (ODP, estado estacionário) [kg R ₁₁ eq.]	0.00	0.00	0.00	0.00
Potencial de criação de ozono fotoquímico (POCP) [kg eteno eq.]	10.55	13.10	0.05	-2.60
Ecotoxicidade terrestre (TETP inf.) [kg DCB eq.]	292.53	233.00	52.20	7.33

- Edifício de Faro

	Total	Construção	Fim-de-vida	Reciclagem
Depleção abiótica (ADP elementos) [kg Sb eq.]	0.2594	0.281	0.0011	-0.0227
Depleção abiótica (ADP fóssil) [MJ]	695100.00	735000.00	36200.00	-76100.00
Potencial de acidificação (AP) [kg SO ₂ eq.]	162.38	168.00	9.78	-15.40
Potencial de eutrofização (EP) [kg fósforo eq.]	20.01	18.90	2.26	-1.15
Ecotoxicidade Aquática de Água Doce. (FAETP inf.) [Kg DCB eq.]	1237.30	1150.00	13.20	74.10
Aquecimento global (GWP) [kg CO ₂ eq.]	52390.00	55600.00	4680.00	-7890.00
Aquecimento global (GWP), excluindo carbono biogénico [kg CO ₂ eq.]	62340.00	67900.00	2310.00	-7870.00
Potencial de toxicidade humana (HTP inf.) [Kg DCB eq.]	2616043.50	2260000.00	43.50	356000.00
Ecotoxicidade Aquática Marinha. (MAETP inf.) [Kg DCB eq.]	3220000.00	3620000.00	-505000.00	105000.00
Destruição da camada de ozono (ODP, estado estacionário) [kg R ₁₁ eq.]	0.00	0.00	0.00	0.00
Potencial de criação de ozono fotoquímico (POCP) [kg eteno eq.]	15.17	18.70	0.09	-3.62
Ecotoxicidade terrestre (TETP inf.) [kg DCB eq.]	319.80	257.00	52.60	10.20