



NOVA
NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

SALVADOR THIRAN CARDOSO DE MENEZES

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM EDIFÍCIO DE CONSTRUÇÃO VERNÁCULA

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa

Outubro, 2024

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM EDIFÍCIO DE CONSTRUÇÃO VERNÁCULA

SALVADOR THIRAN CARDOSO DE MENEZES
Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Orientador: Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar,
Professor Associado, Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Daniel Aelenei, Professor Associado,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade

Arguente: Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Asso-
ciada,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade

Vogal: Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar, Professor Associ-
ado,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa
Outubro, 2024

Análise do Comportamento Térmico de um Edifício de Construção Vernácula

Copyright © SALVADOR THIRAN CARDOSO DE MENEZES, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

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

Aos meus Pais, Isabel e António Vasco

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de exprimir o agradecimento ao orientador, Professor Doutor Luís Baltazar, pela oportunidade, desafio e confiança depositada em mim, por me lançar o desafio da realização desta temática na dissertação. O apoio prestado ao longo desta dissertação, bem como os conselhos e orientação vocacional prestada ao longo do percurso académico, possibilitou a realização deste ciclo que agora termina.

Gostaria ainda de agradecer aos restantes docentes da NOVA FCT, que foram fulcrais para o meu desenvolvimento como aluno, engenheiro civil e humano, que pelos desafios naturais da vida académica me obrigaram a desenvolver conhecimentos e competências que me tornaram uma pessoa mais completa.

Aos coordenadores e colegas dos Programas de Apoio Edifícios + Sustentáveis II e Eficiência Energética em Edifícios da Administração Pública Central, pela oportunidade de participar em três dos maiores programas de eficiência energética já realizados em Portugal, bem como por fazerem crescer o meu interesse por esta temática.

Aos meus pais, que se conheceram nesta faculdade, a quem dedico esta dissertação, deixo o meu maior agradecimento, por serem o meu maior exemplo e por me procurarem proporcionar sempre as condições ideais para me desenvolver plenamente e ainda mais relevante por me terem transmitido os valores que me definem. Aos meus irmãos, avós e restante família, deixo igualmente o meu obrigado por sempre me terem acompanhado e estimulado o meu espírito curioso com muito carinho.

Aos meus grandes amigos, a família que escolhi, tenho de agradecer pelas incontáveis memórias, risos e desabafos, em especial ao António Santos, Filipe Mourão, José Durão, João Pratas, Ana Vouga, Francisco R. Magalhães, João Levita, Hernâni Marques e Maria Pimenta. E aos amigos que a faculdade me deu, Gonçalo Almeida, Miguel B. Ribeiro, Luís Costa e Silva, Manuel Ferreira, Francisco P. Amaral, André Francisco e Evandro Ferreira.

Por fim, gostaria ainda de agradecer à Academia Kolmachine, aos seus treinadores de Kickboxing e aos meus parceiros de treino, que muito me inspiram e me levam a desafiar-me diariamente.

*“É pela arte que o génio de cada raça se patenteia,
que a autonomia nacional de cada povo se revela
na sua audácia mental, e se afirma, não só pela
sua especial compreensão da natureza, da vida e do
universo, mas pelo trabalho coletivo da comunidade,
na literatura, na arquitetura, na música, na pintura,
na indústria e no comércio.”*
(Ramalho Ortigão, O Culto da Arte em Portugal)

RESUMO

No enquadramento da Agenda 2030 e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Assembleia Geral das Nações Unidas, urge a necessidades de olhar para os problemas que o mundo atual atravessa e procurar soluções que contribuam para a consecução destes objetivos. Sendo o setor residencial um dos maiores consumidores de energia final, é importante utilizar e promover soluções que combatam a baixa eficiência energética do parque edificado nacional e adaptar a legislação nacional ao contexto em que se insere, de modo a orientar as entidades envolvidas para práticas que vão ao encontro da concretização dos ODS.

A presente legislação térmica em Portugal, mostra ser muito rígida no que se refere a práticas vernáculas e à sua integração na construção atual, mesmo que esta apresente soluções construtivas que melhorem as condições de conforto interior e minimizem o consumo energético associado à climatização dos edifícios. Em adição a este problema, considera-se que a integração das ferramentas de simulação dinâmica e a criação de perfis de utilização são passos importantes a seguir para a evolução da regulamentação dos edifícios habitacionais em Portugal, estratégias utilizadas na presente dissertação.

Desse modo, foi realizado um levantamento das estratégias bioclimáticas que integram a construção vernácula, as práticas utilizadas na construção em terra em Portugal e o levantamento bibliográfico relativo à regulamentação térmica em Portugal.

Neste contexto, é explorado em detalhe um caso de estudo com recurso à ferramenta de simulação dinâmica, *Energy Plus*, para a obtenção e consequente análise de resultados.

A análise dos resultados obtidos permite concluir que a taipa, tanto na versão regulamentar quanto não regulamentar, apresenta um desempenho energético superior à solução ETICS, com menores necessidades de aquecimento e arrefecimento, devido à sua elevada inércia térmica. A taipa não regulamentar também mostrou ser uma alternativa viável, sugerindo que a regulamentação pode ser ajustada para permitir espessuras inferiores a 60 cm sem comprometer o conforto térmico. A integração de estratégias bioclimáticas, como a ventilação noturna, mostrou-se eficaz na redução das necessidades energéticas, reforçando a viabilidade da taipa como uma solução sustentável e eficiente para a construção.

Palavras chave: Taipa, Inércia Térmica, Estratégias Bioclimáticas, EnergyPlus, Regulamentação Térmica.

ABSTRACT

Within the framework of the 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals (SDGs) established by the United Nations General Assembly, it is imperative to address the challenges facing the world today and seek solutions that are in line with these goals. Given that the residential sector is one of the largest consumers of final energy, it is crucial to use and promote solutions that address the low energy efficiency of the national building stock and adapt national legislation to the context in which it is inserted, to guide the entities involved towards practices that meet the achievement of the SDGs.

The current thermal legislation in Portugal seems to be very rigid concerning vernacular practices and their integration into modern construction, even if it presents constructive solutions that improve indoor comfort conditions and minimize the energy consumption associated with air conditioning in buildings. In addition to this issue, it is considered important to integrate dynamic simulation tools and the creation of usage profiles are steps to be followed for the evolution of thermal regulations in Portugal for residential buildings, strategies utilized in this dissertation.

Thus, a survey was carried out of the bioclimatic strategies that integrate vernacular construction, the practices used in earthen construction in Portugal, and a bibliographic review regarding thermal regulations in Portugal was conducted.

In this context, a case study is explored in detail using the dynamic simulation tool, EnergyPlus, to obtain and consequently analyse results.

The analysis of the results allows to conclude that rammed earth, both in its regulated and non-regulated forms, demonstrates superior energy performance compared to the ETICS solution, with lower heating and cooling demands due to its high thermal inertia. The non-regulated rammed earth also proved to be a viable alternative, suggesting that regulations could be adjusted to allow for wall thicknesses below 60 cm without compromising thermal comfort. The integration of bioclimatic strategies, such as nighttime ventilation, was effective in reducing energy needs, further reinforcing the feasibility of rammed earth as a sustainable and efficient construction solution.

Keywords: Rammed Earth, Thermal Inertia, Bioclimatic Strategies, EnergyPlus, Thermal Regulations.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	XI
ABSTRACT	XIII
ÍNDICE	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XIX
ÍNDICE DE TABELAS	XXI
ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XXIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
2. CONSTRUÇÃO VERNÁCULA E TÉRMICA DE EDIFÍCIOS	5
2.1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE TÉRMICA DE EDIFÍCIOS.....	5
2.1.1. <i>Noções Gerais de Transmissão de Calor</i>	5
2.1.2. <i>Condutibilidade Térmica</i>	7
2.1.3. <i>Resistência Térmica Total</i>	7
2.1.4. <i>Coefficiente de Transmissão Térmica</i>	8
2.1.5. <i>Inércia Térmica</i>	8
2.1.6. <i>Conforto Térmico</i>	12
2.2. ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS NA CONSTRUÇÃO VERNÁCULA	14
2.2.1. <i>Inércia Térmica e Higroscópica</i>	18
2.2.2. <i>Traçado Urbano</i>	19
2.2.3. <i>Orientação Preferencial</i>	20
2.2.4. <i>Vãos</i>	21
2.2.5. <i>Cores</i>	21
2.2.6. <i>Ventilação</i>	21
2.2.7. <i>Pátios e Vegetação</i>	22
2.2.8. <i>Considerações Finais</i>	22
2.3. CONSTRUÇÃO EM TERRA EM PORTUGAL	23
2.3.1. <i>Terra como material de construção</i>	23
2.3.2. <i>Taipa Vernácula</i>	26
2.3.3. <i>Fases de Construção de uma Parede de Taipa</i>	27
2.4. REGULAMENTAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS EM PORTUGAL	32
2.4.1. <i>Considerações iniciais</i>	32

2.4.2.	<i>Diretiva do Desempenho Energético de Edifícios</i>	33
2.4.3.	<i>Metodologia SCE</i>	35
2.4.4.	<i>Quantificação de Consumos e Necessidades de Energia</i>	37
2.4.5.	<i>Normas e Regulamentos sobre Construção em Terra</i>	38
3.	METODOLOGIA	40
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	40
3.2.	CONTEXTO CLIMÁTICO.....	41
3.2.1.	<i>Dados Climáticos</i>	41
3.2.2.	<i>Localização</i>	42
3.3.	MODELAÇÃO GEOMÉTRICA E CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO	44
3.3.1.	<i>Arquitetura</i>	44
3.3.2.	<i>Soluções Construtivas</i>	45
3.3.3.	<i>Elementos Verticais</i>	45
3.3.4.	<i>Elementos Horizontais</i>	48
3.4.	MODELAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	49
3.4.1.	<i>Dados de Entrada</i>	50
3.4.2.	<i>Simulações</i>	51
3.4.3.	<i>Dados de Saída</i>	52
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	55
4.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	55
4.2.	CONDIÇÕES CLIMÁTICAS EXTERIORES	56
4.2.1.	<i>Temperatura Exterior</i>	56
4.2.2.	<i>Humidade Relativa Exterior</i>	59
4.3.	TEMPERATURA INTERIOR.....	62
4.3.1.	<i>Dia de Temperatura Máxima</i>	65
4.3.2.	<i>Variação da Temperatura Interior</i>	67
4.3.3.	<i>Distribuição Horária das Temperaturas</i>	67
4.3.4.	<i>Desempenho da Inércia Térmica</i>	68
4.3.5.	<i>Eficácia das Tecnologias Solares Passivas</i>	68
4.3.6.	<i>Temperaturas Interiores Médias Diárias</i>	69
4.3.7.	<i>Análise da Inércia Térmica</i>	71
4.4.	HUMIDADE RELATIVA INTERIOR	73
4.4.1.	<i>Variação Anual da Humidade Relativa Interior</i>	74
4.4.2.	<i>Humidade Relativa Interior Média Mensal</i>	78
4.4.3.	<i>Humidade Relativa Interior Média Diária</i>	80
4.4.4.	<i>Influência do Clima na Inércia Higroscópica da Taipa</i>	81
4.4.5.	<i>Comparação entre R e NR em Taipa</i>	82
4.4.6.	<i>Estratégias de Ventilação Noturna</i>	83
4.4.7.	<i>Impacto do Ar Condicionado</i>	83
4.4.8.	<i>Considerações Finais</i>	83
4.5.	GANHOS E PERDAS DE CALOR DAS ENVOLVENTES OPACAS	84
4.6.	NECESSIDADES DE AQUECIMENTO E ARREFECIMENTO	90
4.6.1.	<i>Comparação das Necessidades de Aquecimento em Évora</i>	90
4.6.2.	<i>Comparação das Necessidades de Arrefecimento em Évora</i>	91
4.6.3.	<i>Necessidades Totais Anuais em Évora</i>	92
4.6.4.	<i>Comparação das Necessidades de Aquecimento em Faro</i>	93
4.6.5.	<i>Comparação das Necessidades de Arrefecimento em Faro</i>	94
4.6.6.	<i>Necessidades Totais Anuais em Faro</i>	95
4.6.7.	<i>Considerações Finais</i>	95

5.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	99
5.1.	CONCLUSÃO	99
5.2.	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE UM EDIFÍCIO.....	5
FIGURA 2.2 - AMORTECIMENTO TÉRMICO E DESFASAMENTO TEMPORAL.....	10
FIGURA 2.3 - PIRÂMIDE DE PRIORIDADES NA CONCEÇÃO DE EDIFÍCIOS.....	17
FIGURA 2.4 - CARTA BIOCLIMÁTICA DE BARUCH GIVONI.....	18
FIGURA 2.5 - CIRCULAÇÃO DE AR EM DIFERENTES PERÍODOS DO DIA.....	20
FIGURA 2.6 - EXEMPLO DE ABERTURA PARA PROMOÇÃO DA VENTILAÇÃO NATURAL.....	22
FIGURA 2.7 - PATRIMÓNIO EM TERRA A) DA UNIÃO EUROPEIA; B) E DE PORTUGAL CONTINENTAL.....	25
FIGURA 2.8 - DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS PRINCIPAIS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS EM TERRA CRUA, EM PORTUGAL CONTINENTAL.....	26
FIGURA 2.9 - COMPOSIÇÃO DOS TAIPAIS PARA EXECUÇÃO DA TAIPA.....	29
FIGURA 3.1 - PLANTA DO EDIFÍCIO.....	44
FIGURA 3.2 - PORMENOR DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS A) SOLUÇÃO CONVENCIONAL; B) TAIPA.....	48
FIGURA 4.1 - TEMPERATURAS EXTERIORES MÉDIAS MENS AIS DE ÉVORA E FARO.....	56
FIGURA 4.2 - TEMPERATURAS EXTERIORES MÉDIAS SEMANAIS DE ÉVORA E FARO.....	57
FIGURA 4.3 - TEMPERATURAS EXTERIORES MÉDIAS DIÁRIAS DE ÉVORA E FARO.....	58
FIGURA 4.4 - DADOS DIÁRIOS DA HR EM ÉVORA.....	59
FIGURA 4.5 - DADOS DIÁRIOS DA HR EM FARO.....	60
FIGURA 4.6 - DADOS SEMANAIS DA HR EM ÉVORA E FARO.....	61
FIGURA 4.7 - EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS NO DIA DE MAIOR CALOR – ETICS.....	65
FIGURA 4.8 - EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS NO DIA DE MAIOR CALOR – TAIPA.....	66
FIGURA 4.9 - TEMPERATURAS MÉDIAS DIÁRIAS EXTERIORES E INTERIORES EM ÉVORA.....	69
FIGURA 4.10 - TEMPERATURAS MÉDIAS DIÁRIAS EXTERIORES E INTERIORES EM FARO.....	70
FIGURA 4.11 - DADOS MENS AIS DA HUMIDADE RELATIVA DE ÉVORA.....	78
FIGURA 4.12 - DADOS MENS AIS DA HUMIDADE RELATIVA DE FARO.....	79
FIGURA 4.13 - DADOS DIÁRIOS DAS HUMIDADES RELATIVAS DE ÉVORA.....	80
FIGURA 4.14 - DADOS DIÁRIOS DAS HUMIDADES RELATIVAS DE FARO.....	81
FIGURA 4.15 - GANHOS DE CALOR PELA ENVOLVENTE OPACA EM ÉVORA ETICS.....	84
FIGURA 4.16 - GANHOS DE CALOR PELA ENVOLVENTE OPACA EM ÉVORA TAIPA.....	85
FIGURA 4.17 - PERDAS DE CALOR PELA ENVOLVENTE OPACA EM ÉVORA ETICS.....	86
FIGURA 4.18 - PERDAS DE CALOR PELA ENVOLVENTE OPACA EM ÉVORA TAIPA.....	87
FIGURA 4.19 - GANHOS DE CALOR PELA ENVOLVENTE OPACA EM FARO ETICS.....	87
FIGURA 4.20 - GANHOS DE CALOR PELA ENVOLVENTE OPACA EM FARO TAIPA.....	88
FIGURA 4.21 - PERDAS DE CALOR PELA ENVOLVENTE OPACA EM FARO ETICS.....	89
FIGURA 4.22 - PERDAS DE CALOR PELA ENVOLVENTE OPACA EM FARO TAIPA.....	89
FIGURA 4.23 - NECESSIDADES DE AQUECIMENTO EM ÉVORA.....	91
FIGURA 4.24 - NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO EM ÉVORA.....	91
FIGURA 4.25 - NECESSIDADES DE TOTAIS EM ÉVORA.....	92
FIGURA 4.26 - NECESSIDADES DE AQUECIMENTO EM FARO.....	93
FIGURA 4.27 - NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO EM FARO.....	94

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1 - RESISTÊNCIAS TÉRMICAS SUPERFICIAIS.	8
TABELA 2.2 - COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA SUPERFICIAIS MÁXIMOS DOS ELEMENTOS DA ENVOLVENTE OPACA DOS EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO — PORTUGAL CONTINENTAL.	36
TABELA 3.1 - CRITÉRIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA ZONA CLIMÁTICA DE INVERNO.	42
TABELA 3.2 - CRITÉRIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA ZONA CLIMÁTICA DE VERÃO.	42
TABELA 3.3 - VALORES DOS CRITÉRIOS DE DETERMINAÇÃO DAS ZONA CLIMÁTICAS.	43
TABELA 3.4 - TABELA DE ÁREAS ÚTEIS.	45
TABELA 3.5 - CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO DA ENVOLVENTE OPACA VERTICAL.	47
TABELA 3.6 - CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO DA ENVOLVENTE OPACA HORIZONTAL.	48
TABELA 4.1 - RESUMO DE SIMULAÇÕES TÉRMICAS: INTERVALOS DE TEMPERATURA E DIAS CORRESPONDENTES. .	63
TABELA 4.2 - ANÁLISE DA INÉRCIA TÉRMICA: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO .	72
TABELA 4.3 - RESUMO DE SIMULAÇÕES HIGROMÉTRICAS: INTERVALOS DE HUMIDADE RELATIVA E DIAS CORRESPONDENTES.	75

ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ADENE	Agência para a Energia
AECO	Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações
ARSO	African Organization for Standardization
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BTC	Blocos de Terra Prensada
CEE	Comunidade Económica Europeia
CEN	European Committee for Standardization
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research
CTAC	Centre of Territory Environment and Construction
DEE	Desempenho Energético do Edifício
DEE	Desempenho Energético dos Edifícios
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
DIN	Instituto Alemão para Normatização
EED	Energy Efficiency Directive
EN	European Standard
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EPS	Poliestireno expandido
ETICS	External Thermal Insulation Composite System
GD	Graus-Dias
HR	Humidade Relativa
ISISE	Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering
ISO	International Organization for Standardization
IWEC	ASHRAE International Weather for Energy Calculations
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NUTS	Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos
nZEB	Nearly Zero Energy Building
NZS	Standards New Zealand
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
RED	Renewable Energy Directive
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RGEU	Regulamento Geral das Edificações Urbanas
RQSCE	Regulamento da Qualidade dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética
UE	União Europeia

XPS Poliestireno Extrudido

Siglas das Simulações:

AC	Ar Condicionado
NR	Não Regulamentar
NRAC	Não Regulamentar com Ar Condicionado
PS	Pala de Sombreamento
PSAC	Pala de Sombreamento com Ar Condicionado
R	Regulamentar
RAC	Regulamentar com Ar Condicionado
VN	Ventilação Noturna

1.1. Enquadramento e Motivação

A revolução industrial na Europa marcou um ponto de viragem na história da construção, introduzindo materiais industrializados como o vidro, o aço e alguns tipos de cimento. Esta transformação tecnológica levou a um êxodo rural para as cidades, onde a procura por melhores oportunidades económicas resultou no esquecimento dos saberes vernáculos e das técnicas de construção tradicionais. A proliferação de novos materiais e de tecnologias modernas, como o betão armado, na primeira metade do séc.XX, e o surgimento de sistemas mecânicos para climatização ambiente e águas quentes sanitárias, visava criar espaços de habitação mais funcionais e padronizados, respondendo às exigências de uma população que ansiava por melhores condições de higiene e conforto nos edifícios. No entanto, estas inovações também aumentaram significativamente os gastos energéticos [1].

O uso cada vez mais difundido da climatização mecânica, alicerçado na crença de que as reservas de combustíveis fósseis eram inesgotáveis, resultou numa dependência crescente deste recurso para a produção de energia. A arquitetura moderna, caracterizada pelo uso de soluções construtivas com baixa resistência térmica, tornou os edifícios sensíveis às variações do ambiente exterior, aumentando a dependência dos sistemas de climatização mecânica. Consequentemente, cerca de 40% da energia final consumida na União Europeia é destinada ao aquecimento e arrefecimento de edifícios, tendo um impacto significativo no ambiente.

Em resposta a esta problemática, a Diretiva da União Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD – em inglês *Energy Performance of Buildings Directive*) – foi inicialmente aprovada em 2002, tendo sido subsequentemente atualizada em 2010 e 2018 para refletir as novas metas de eficiência energética e de sustentabilidade [2, 3, 4]. A EPBD tem como objetivo alterar este paradigma e mitigar os impactos ambientais associados à indústria da construção. Para alcançar a eficiência energética desejada, a última revisão da Diretiva enfatiza a promoção de edifícios com necessidades energéticas quase nulas, conhecidos como (nZEB – em inglês *Nearly Zero-Energy Buildings*). Esta abordagem reflete uma preocupação crescente com o conforto no interior dos edifícios e a eficiência energética.

A integração dos conhecimentos da arquitetura vernácula, bem como das suas estratégias bioclimáticas, na arquitetura moderna, implica uma abordagem ponderada e holística. Isto requer que os arquitetos e engenheiros considerem as características únicas de um lugar enquanto incorporam princípios e tecnologias contemporâneas na conceção. A construção em terra, e nomeadamente a taipa, apresenta características que vão ao encontro das preocupações ambientais, do conforto térmico e da eficiência energética defendidas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e pela legislação atual, designadamente o Regulamento de Desempenho dos Edifícios de Habitação (REH) [5].

Contudo, observa-se que a legislação em Portugal tem evoluído lentamente no sentido de reintegrar práticas vernáculas na construção moderna, mesmo quando estas soluções demonstram melhorias significativas nas condições de conforto interior e na minimização do consumo energético associado à climatização dos edifícios. Esta dissertação pretende evidenciar a necessidade de uma evolução legislativa que permita uma maior integração das técnicas de construção em terra, como a taipa, reconhecendo os seus benefícios em termos de conforto higrotérmico e de eficiência energética.

Um caminho promissor para essa integração é a utilização da simulação dinâmica, que permite avaliar diferentes cenários em localizações variadas, comparar soluções construtivas e incluir perfis de utilização. Ferramentas de simulação dinâmica como o *EnergyPlus* são essenciais neste processo, proporcionando uma análise detalhada do desempenho térmico e energético dos edifícios de habitação. O *EnergyPlus* é um programa de simulação energética e térmica, que permite modelar com precisão as trocas de calor, o fluxo de ar e os ganhos solares, entre outros fatores, oferecendo aos engenheiros e arquitetos uma ferramenta robusta para a otimização das estratégias de conceção e construção sustentável.

A legislação da térmica de edifícios de habitação em Portugal teve início com o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) nos anos 90 e evoluiu consideravelmente ao longo das décadas. Apesar dessa evolução, a regulamentação ainda apresenta lacunas, particularmente na abordagem de soluções de construção em terra, como a taipa. A recente revisão da legislação, embora demonstre uma certa flexibilidade, continua a não estar totalmente adaptada a este tipo de construção, negligenciando o efeito significativo da inércia térmica.

A construção com terra em Portugal permanece insuficientemente regulamentada, sendo abordada apenas de forma recomendatória. Este facto é problemático, considerando a baixa eficiência energética e o fraco isolamento térmico do parque edificado nacional.

A taipa, com a sua elevada inércia térmica e grande higroscopicidade, e outras estratégias bioclimáticas podem desempenhar um papel fundamental na melhoria da eficiência térmica e energética, proporcionando melhores condições de conforto interior e reduzindo as necessidades de energia para a climatização dos edifícios. Tornar os regulamentos mais eco-eficientes integrando estratégias bioclimáticas é crucial, uma vez que os edifícios, expostos ao ambiente exterior pelas suas envolventes opacas e translúcidas, dependem fortemente das características das soluções construtivas devido às trocas de calor que ocorrem através destas superfícies.

1.2. Objetivos e Metodologia

O objetivo desta dissertação é avaliar o comportamento térmico e energético da envolvente opaca vertical em taipa, solução vernácula, mas que recentemente tem também sido utilizada em arquitetura contemporânea em Portugal e no Mundo, comparando-o com uma solução convencional de tijolo furado com isolamento térmico pelo exterior (ETICS - *External Thermal Insulation Composite System*). Através desta análise, pretende-se compreender como a utilização da taipa, por simulação dinâmica, pode melhorar o conforto interior e a eficiência energética das habitações. A simulação dinâmica, utilizando ferramentas como o EnergyPlus, permite avaliar diferentes cenários em diversas localizações, comparar soluções construtivas e incorporar perfis de utilização, oferecendo uma visão detalhada do desempenho térmico e energético dos edifícios.

A presente dissertação pretende não só demonstrar a necessidade de uma evolução legislativa que permita uma maior integração das técnicas de construção em terra, mas também evidenciar como estas soluções, aliadas a tecnologias de simulação avançadas, podem contribuir para um futuro mais sustentável e eficiente em termos energéticos.

Para cumprir com os objetivos delineados, utilizou-se a ferramenta de simulação dinâmica EnergyPlus, permitindo uma análise detalhada do comportamento térmico e energético de um edifício sob duas soluções construtivas distintas, localizadas em duas cidades diferentes.

Inicialmente, foram criados modelos detalhados do edifício em estudo, considerando duas soluções construtivas distintas para a envolvente opaca vertical, uma utilizando taipa, solução vernácula e outra utilizando alvenaria de tijolo furado com isolamento térmico pelo exterior, solução convencional. Estes modelos foram implementados no EnergyPlus, considerando as propriedades térmicas dos materiais e as características geométricas do edifício.

Foi desenvolvido um perfil de utilização que se procurou que fosse realista para o edifício, baseado em padrões comuns de ocupação e permanência dos habitantes. O perfil inclui horários de ocupação, atividades internas, e a utilização de sistemas de climatização, permitindo uma representação fidedigna das condições reais de utilização do edifício.

As simulações iniciais foram realizadas para cada uma das soluções construtivas, em ambas as cidades selecionadas. Estas simulações serviram como base de referência para as análises subsequentes, fornecendo dados preliminares sobre o desempenho térmico e energético do edifício. Posteriormente, foram introduzidas alterações baseadas em estratégias bioclimáticas, como a utilização de palas de sombreamento horizontais fixas e estratégias de arrefecimento noturno. Estas alterações foram implementadas de forma incremental, permitindo avaliar o efeito combinado das diferentes estratégias sobre os outputs da simulação.

Por fim, os resultados foram interpretados à luz dos objetivos da dissertação a partir da comparação entre os resultados das duas soluções construtivas efetuada com base nos critérios estabelecidos.

1.3. Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a introdução, que inclui o enquadramento e motivação, os objetivos da pesquisa e a metodologia adotada para a realização do trabalho.

No Capítulo 2 é explorada a fundamentação teórica sobre construção vernácula e térmica de edifícios. Inicialmente, são discutidos os conceitos fundamentais de térmica de edifícios, seguidos por uma análise das estratégias bioclimáticas aplicadas na construção vernácula. De seguida, é abordada a construção em terra em Portugal, com foco especial na técnica da taipa, e por fim, é feita uma revisão da regulamentação térmica de edifícios de habitação no contexto português.

No Capítulo 3 é detalhada a metodologia adotada no estudo. Este capítulo inclui uma descrição do contexto climático das cidades selecionadas para o estudo de caso, a modelação geométrica do edifício e a caracterização das soluções construtivas adotadas.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados das simulações realizadas. Este capítulo aborda o impacto das condições exteriores no desempenho térmico das habitações, a análise das condições térmicas internas, a variação da humidade relativa interior, os ganhos e perdas de calor através das envolventes opacas e as necessidades de aquecimento e arrefecimento das diferentes soluções construtivas. São comparados os desempenhos das soluções em taipa e em alvenaria de tijolo com isolamento exterior.

No Capítulo 5 estão expostas as conclusões do trabalho. Este capítulo também oferece sugestões para futuras investigações e possíveis melhorias na regulamentação térmica de edifícios em Portugal, incentivando a integração de estratégias bioclimáticas e técnicas de construção vernácula nas práticas modernas.

CONSTRUÇÃO VERNÁCULA E TÉRMICA DE EDIFÍCIOS

2.1. Conceitos Fundamentais de Térmica de Edifícios

A compreensão dos princípios básicos de transmissão de calor e dos conceitos relacionados desempenha um papel essencial na avaliação do desempenho energético de edifícios. Neste capítulo, são exploradas as noções gerais de mecanismos de transferência de calor. Além disso, são explicados conceitos fundamentais que são cruciais para o entendimento da térmica em edifícios, tais como a resistência térmica total, o coeficiente de transmissão térmica, a inércia térmica e o conforto térmico.

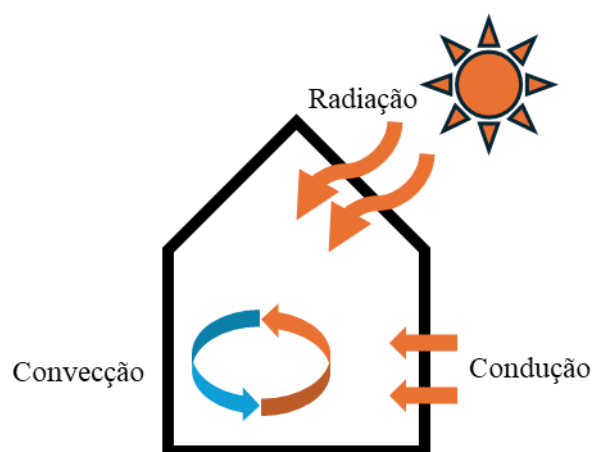


Figura 2.1 - Transferência de calor de um edifício (Adaptado de [6]).

2.1.1. Noções Gerais de Transmissão de Calor

O processo em que ocorrem trocas térmicas entre dois corpos a diferentes temperaturas é conhecido como transferência de calor. Durante esse processo, o calor flui do corpo mais quente para o mais frio até que o equilíbrio seja alcançado.

Para entender os conceitos fundamentais sobre a térmica de edifícios é importante conhecer os conceitos fundamentais no estudo da termodinâmica de edifícios. Estes conceitos incluem a compreensão dos processos de radiação, que envolvem a transferência de calor por meio de ondas eletromagnéticas, a condução, que trata da transferência de calor através de materiais sólidos, e a convecção, que diz respeito à transferência de calor por meio de fluidos em movimento. Esses processos são fundamentais para analisar como se processam as trocas de calor entre os edifícios e o ambiente circundante.

Na convecção a variação da temperatura das moléculas está associada ao movimento dessas mesmas partículas, uma vez que a alteração da sua temperatura cria variações da massa volúmica sendo assim criados os mecanismos de convecção, movimentos que não são compatíveis com comportamento dos corpos sólidos.

Corpos com temperatura maior correspondem a corpos com um estado maior de agitação molecular, disso resulta um maior afastamento molecular, que é tanto maior quanto maior é o agitação das moléculas. Acontecendo isto, o número de moléculas por unidade de volume decresce, o que significa a diminuição da massa volúmica, o que conseqüentemente leva ao ascender do ar quente por impulsão [6].

O fluxo de calor por convecção é dado pela lei do arrefecimento de Newton, representada na Equação 2.1:

$$q_{conv} = h_c * (T_1 - T_2) \quad (2.1)$$

Em que:

q_{conv} – fluxo de calor por convecção [W/m^2];

h_c – condutância térmica por convecção [$W/m^2 * K$];

T_1 – temperatura da superfície 1 [K];

T_2 – temperatura da superfície 2 [K].

A radiação é transmissão de calor sobre a forma de ondas eletromagnéticas através de gases e de sólidos semitransparentes em que a absorção é fraca. Todos os corpos com temperaturas superiores a 0 Kelvin emitem radiação eletromagnética, e esta é propagada à velocidade da luz [6].

A Equação 2.2, equação do fluxo de calor por radiação é dado pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$q_r = \varepsilon * \sigma * (T_s^4 - T_{env}^4) \quad (2.2)$$

Em que:

q_r – fluxo de calor por radiação [W/m^2];

ε – emissividade da superfície [m^2];

σ – constante de Stefan-Boltzmann [$5,67 * 10^{-8} W/m^2 * K^4$];

T_s – temperatura absoluta da superfície emissora [K];

T_{env} – temperatura absoluta da superfície envolvente [K].

Podendo ocorrer em corpos sólidos e em fluídos, a condução corresponde à transferência de energia entre moléculas adjacentes com temperaturas diferentes. A maiores temperaturas corresponde um maior estado de agitação das moléculas. Entre duas zonas com estados de agitação diferente, isto é, temperaturas diferentes, o calor flui do corpo com temperatura mais elevada para o corpo com temperatura mais baixa, até se atingir um equilíbrio global [1].

O fluxo de calor entre dois corpos por condução pode ser definido pela Lei de Fourier, como a quantidade de calor transferido por unidade de área e que é quantificado pela Equação 2.3:

$$q_{cond} = \frac{Q}{A} \quad (2.3)$$

Em que:

q_{cond} – fluxo de calor por condução [W/m²];

Q – quantidade de calor [W];

A – área perpendicular ao sentido do fluxo através da qual ocorre a transmissão de calor [m²].

2.1.2. Condutibilidade Térmica

A condução térmica é influenciada pelas propriedades dos materiais envolvidos, como a condutibilidade térmica, que descreve a capacidade de um material conduzir calor. Compreender como os materiais de construção conduzem o calor é essencial para garantir que os edifícios sejam eficientes em termos energéticos e proporcionem um ambiente interior confortável.

Através da aplicação de materiais de isolamento com baixa condutibilidade térmica, é possível reduzir a capacidade de condução térmica nos elementos construtivos, minimizando assim as perdas de calor durante o inverno e o ganho de calor indesejado durante o verão. Isso contribui para a eficiência energética dos edifícios e para a criação de ambientes internos com temperaturas mais estáveis e confortáveis.

2.1.3. Resistência Térmica Total

A determinação da resistência térmica total de um elemento opaco, operando em regime permanente, segue os parâmetros estabelecidos pela Norma EN ISO 6946 [7]. A resistência térmica total, nesse contexto, é calculada como a soma das resistências térmicas de todas as camadas que compõem o elemento opaco, bem como das resistências térmicas superficiais correspondentes [8].

Para elementos que apresentem uma condição de fronteira externa, o cálculo da resistência térmica total deve ser conduzido com base na Equação 2.4:

$$R_{tot} = R_{si} + \sum_j R_j + R_{se} \quad (2.4)$$

Em que:

R_{tot} – Resistência térmica total [(m²·°C)/W];

R_{si} – Resistência térmica superficial interior [(m²·°C)/W];

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior [(m²·°C)/W];

R_j – Resistência térmica da camada j [(m²·°C)/W].

Ao calcular a resistência térmica total de um elemento, é essencial considerar as resistências térmicas superficiais, as quais variam de acordo com a direção do fluxo de calor e sua posição. Essas variações estão detalhadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Resistências térmicas superficiais [8].

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial [(m ² ·°C)/W]	
	Interior (Rsi)	Exterior (Rse)
Horizontal	0,13	0,04
Ascendente	0,10	
Descendente	0,17	

2.1.4. Coeficiente de Transmissão Térmica

Conforme estabelecido no Manual do Sistema de Certificação Energética (SCE), o coeficiente de transmissão térmica (U) representa o parâmetro que quantifica a transferência de calor através de um elemento construtivo sob condições de regime permanente [8]. A sua determinação é realizada por meio da metodologia simplificada, conforme estipulado pela Norma EN ISO 6946 e os seus valores podem ser consultados no ITE50 [7], [9].

O cálculo do valor de U para elementos compostos por um ou mais materiais, com camadas de espessura uniforme, é efetuado de acordo com a Equação 2.5:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (2.5)$$

2.1.5. Inércia Térmica

A massa térmica que um edifício consegue absorver, armazenar e libertar progressivamente calor, dependem das diferenças de temperatura de proximidade imediata dos elementos e da massa volúmica da solução construtiva. A inércia térmica, que está diretamente relacionada com a massa térmica é um conceito essencial na compreensão do comportamento térmico dos edifícios.

A quantidade de calor que um material pode armazenar depende de várias características,

incluindo o peso volúmico do material, ρ , e o seu calor específico, c_p , enquanto a capacidade de transferência de calor é influenciada pela condutibilidade térmica do material, λ . Quanto maior o peso volúmico e o calor específico de um material, maior será a sua capacidade de armazenamento de calor. A condutibilidade térmica varia de forma inversamente proporcional ao peso volúmico, e logo, quanto maior a condutibilidade térmica, menor a inércia térmica do elemento.

Embora o conceito de inércia térmica seja utilizado por diversos autores, não existe uma definição universalmente aceite. O dicionário Merriam Webster, define inércia térmica como o grau de lentidão com que a temperatura de um corpo se ajusta à temperatura do ambiente circundante, levando em consideração propriedades como a capacidade de absorção, o calor específico, a condutividade térmica, dimensões e outros fatores [10]. No entanto, esta definição é considerada incompleta, uma vez que não aborda a capacidade de armazenamento da energia térmica acumulada.

A inércia térmica pode ser compreendida como a resposta tardia e gradual das temperaturas internas de edifícios de grande massa térmica às mudanças de temperatura no ambiente externo. Este fenómeno complexo é influenciado por vários fatores, incluindo o clima regional, o isolamento térmico das envolventes e o uso do edifício. Edifícios com elevada massa térmica requerem mais tempo para atingir as condições de aquecimento ou arrefecimento desejadas, o que pode não ser vantajoso para edifícios de uso intermitente [11].

A inércia térmica pode ainda ser definida como a capacidade dos elementos de construção de amortecer e desfasar o fluxo de calor que os atravessa. E está diretamente relacionada com a difusibilidade térmica e varia proporcionalmente com a massa dos elementos, ou seja, quanto maior a massa volúmica, maior será a inércia térmica.

A difusibilidade térmica (α) é um parâmetro fundamental que pode ser calculado utilizando a Equação 2.6:

$$\alpha = \frac{k}{\rho * c_p} \quad (2.6)$$

Em que:

k – condutibilidade térmica do material [W/m·°C];

ρ – peso volúmico [Kg/m³];

c_p – calor específico do material [Kcal/Kg·°C].

Dois conceitos importantes para compreender a inércia térmica são o atraso temporal (ou desfasamento temporal), representado por ϕ , e o amortecimento térmico, representado por μ . Esses conceitos estão intrinsecamente ligados à inércia térmica e têm implicações significativas na resposta térmica dos edifícios.

O atraso temporal corresponde à diferença de tempo entre o pico máximo de temperatura da superfície exterior e o pico máximo da temperatura da superfície interior. Quanto maior for esse intervalo de tempo em horas, maior será o atraso temporal e, conseqüentemente, maior será a inércia térmica do elemento (Figura 2.2).

Por outro lado, o amortecimento térmico diz respeito à capacidade de um elemento de construção de atenuar as flutuações de temperatura. Em edifícios com inércia térmica elevada, o amortecimento térmico reduz o impacto das variações de temperatura exterior nas condições interiores, resultando numa temperatura máxima na superfície interior inferior à da superfície exterior. Esse efeito é particularmente notável quando se considera uma parede com massa infinita, onde ocorre uma atenuação total do fluxo de calor, minimizando o impacto das condições exteriores no ambiente interior.

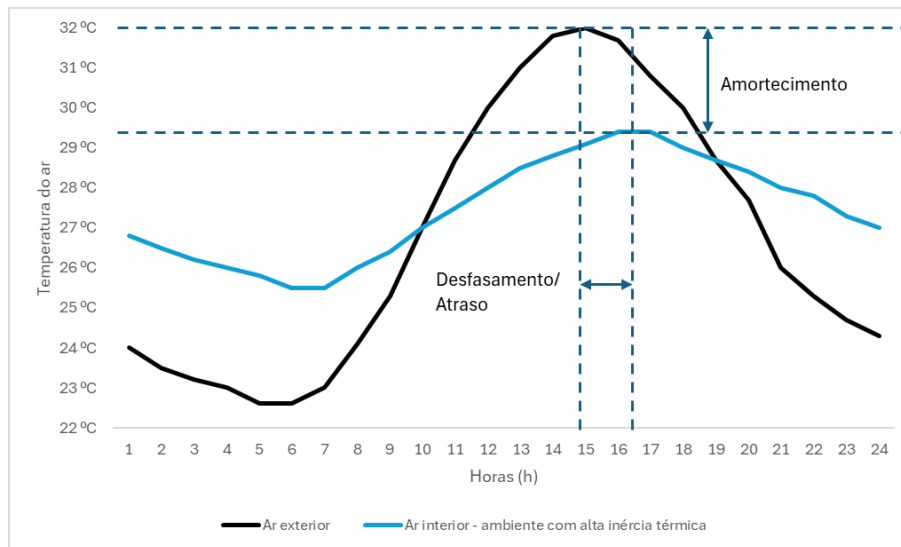


Figura 2.2 - Amortecimento térmico e desfasamento temporal (Adaptado de [12]).

Os valores dos fatores de amortecimento térmico (μ) e de desfasamento temporal (φ) podem ser obtidos em tabelas ou quantificados a partir das Equações 2.7 e 2.8:

$$\mu = e^{-l \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \cdot t}}} = e^{-\frac{l}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{t} \cdot (\lambda \cdot \rho \cdot c_p)}} \quad (2.7)$$

$$\varphi = \frac{l}{2} \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi \cdot \alpha}} = \frac{l}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi} \cdot (\lambda \cdot \rho \cdot c_p)} \quad (2.8)$$

Em que:

l – espessura do elemento [m];

t – período da onda de temperatura [h];

α – difusibilidade térmica [m²/h];

λ – condutibilidade térmica do material [W/m·°C];

ρ – massa volúmica [Kg/m³];

c_p – calor específico do material [Kcal/Kg·°C].

A inércia térmica, como explicada anteriormente, é fundamental para entender como os

edifícios respondem às variações de temperatura e mantêm o conforto térmico. No entanto, para efeitos práticos de avaliação do desempenho energético dos edifícios, a inércia térmica é quantificada de outro modo.

Conforme estabelecido no Manual do Sistema de Certificação Energética (SCE), a inércia térmica interna representa a capacidade de armazenamento de calor dos elementos construtivos e varia de acordo com a massa superficial útil por metro quadrado da área interna do pavimento (I_t) [8]. A sua determinação é realizada utilizando a Equação 2.9:

$$I_t = \frac{\sum_i M_{si} \times r_i \times S_i}{A_p} \quad (2.9)$$

Em que:

I_t – Massa superficial útil por metro quadrado de área interior útil de pavimento [Kg/m²];

M_{si} – Massa superficial útil do elemento i [Kg/m²];

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

S_i – Área da superfície interior do elemento i [m²];

A_p – Área interior útil de pavimento [m²].

Este conceito é classificado em diferentes categorias, com base no valor de I_t , para avaliação do desempenho energético dos edifícios. A classificação é definida da seguinte forma:

Inércia Térmica Fraca: Quando I_t é menor que 150 Kg/m².

Inércia Térmica Média: Quando I_t está na faixa entre 150 e 400 Kg/m².

Inércia Térmica Forte: Quando I_t é maior que 400 Kg/m².

Esta classificação permite avaliar e categorizar os elementos de construção com base na sua capacidade de armazenamento de calor, desempenhando um papel fundamental na análise do desempenho térmico dos edifícios no contexto da certificação energética.

Contudo, esta definição revela-se limitada para os edifícios em terra construídos em Portugal. Conforme o ITE54 [13], que estabelece os coeficientes de transmissão térmica de elementos opacos da envolvente de edifícios antigos, a massa superficial para edifícios com paredes simples de taipa e espessuras de 0,40 m atinge 750 kg/m², praticamente o dobro do valor mínimo para edifícios com inércia térmica forte (400 kg/m²), conforme definido no Manual SCE. E em situações com paredes de taipa com espessura de 60 centímetros, o valor da massa superficial aumenta para 1130 kg/m², quase triplicando o valor supramencionado [13].

A importância da inércia térmica em regiões onde a estação de arrefecimento é proeminente é destacada por estudos como o realizado em São Pedro de Atacama, no nordeste do Chile, localizado num planalto elevado no deserto da Cordilheira dos Andes [14]. Este estudo conclui que habitações construídas em terra, como as analisadas em adobe e taipa, são mais adequadas devido ao significativo amortecimento térmico e extenso desfasamento temporal. Os resultados indicam que essas habitações são avaliadas nesses aspetos como sendo três a quatro vezes superiores às construídas em betão e madeira. Para o edifício simulado em taipa,

observou-se um desfasamento temporal máximo superior a 14 horas e um amortecimento térmico máximo de 80%.

No contexto de Évora, um estudo sobre a arquitetura vernácula revela que as variações de temperatura no interior das habitações apresentam pequenas flutuações, permanecendo praticamente constantes, enquanto no exterior há variações significativas [15]. Essa estabilidade interna é atribuída à elevada massa térmica das paredes exteriores em taipa, proporcionando um desfasamento térmico prolongado. Embora o estudo não avalie diretamente o desfasamento temporal, outro estudo é referido, indicando atrasos térmicos de até 10 horas para edifícios com paredes exteriores em taipa de 25 cm [16]. Considerando que as paredes exteriores no caso em análise possuíam uma espessura de 100 cm, Fernandes [17] considera razoável depreender que o desfasamento térmico será superior a 10 horas, uma conclusão que se espera aproximar dos valores numéricos calculados na presente dissertação. No entanto, com a utilização de elementos de cobertura convencionais compatíveis com a solução em taipa prevê-se que o efeito do atraso térmico seja extremamente atenuado.

2.1.6. Conforto Térmico

2.1.6.1. Fatores que Influenciam o Conforto Térmico

O conforto térmico é definido como o estado de espírito que exprime satisfação com o ambiente térmico. A percepção de conforto no interior das habitações é um parâmetro subjetivo que depende das características físicas, fisiológicas e de fatores externos.

O metabolismo, que engloba as reações bioquímicas responsáveis pela manutenção da temperatura do corpo humano em torno de 36,5°C, desempenha um papel fundamental nesse contexto. Pode ser compreendido como o consumo energético necessário para manter o corpo nessas condições de equilíbrio. A sensação de calor ou frio está intrinsecamente ligada à relação entre o metabolismo e as variações de temperatura do corpo em relação ao ambiente circundante. Além disso, a sensação de conforto também é influenciada pela uniformidade das condições ambientais, incluindo a temperatura das superfícies, a distribuição da temperatura e a presença de correntes de ar [6].

2.1.6.2. Características Físicas

As características físicas abrangem uma série de fatores essenciais, incluindo a temperatura do ar, a humidade relativa e a velocidade do ar, que desempenham um papel fundamental na determinação do conforto térmico [18]. Além desses fatores principais, outros parâmetros também são considerados, tais como a temperatura do ponto de orvalho, a temperatura de bolbo húmido, a temperatura radiante, a temperatura operativa e a temperatura efetiva.

A temperatura do ar é um dos fatores mais cruciais e facilmente mensuráveis para avaliar as condições de conforto térmico. É influenciada pelas condições ambientais e é medida com recurso a um termómetro.

A humidade relativa, por sua vez, indica a capacidade do ar de conter vapor de água em relação à quantidade máxima que pode reter a uma determinada temperatura. Desempenha um papel significativo nas trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente, especialmente através do mecanismo de evaporação na transpiração. As condições de humidade relativa média dentro da zona de conforto é considerada entre o 30% e os 60% de humidade relativa [19].

A velocidade do ar é outro parâmetro de importância, uma vez que afeta a transferência de calor por convecção entre o corpo humano e o ambiente. Um aumento na velocidade do ar aumenta as perdas de calor por convecção. Geralmente, consideram-se valores próximos de 0,1 m/s, que indicam que o ar tem pouco movimento. No entanto, se a velocidade do ar for excessivamente alta, pode criar correntes de ar que causam desconforto localizado.

2.1.6.3. Características Fisiológicas

As características fisiológicas englobam uma série de elementos, incluindo a idade, o sexo e as características morfológicas individuais de cada pessoa. Por outro lado, os fatores externos compreendem a atividade realizada e a resistência térmica do vestuário utilizado. No corpo humano, ocorrem reações complexas que normalmente mantêm a temperatura interna em torno de 36,5°C, um fenómeno conhecido como metabolismo, que pode ser compreendido como consumo energético.

A idade pode impactar as preferências térmicas, uma vez que o metabolismo das pessoas mais idosas é mais lento, afetando a percepção do conforto térmico. No que diz respeito ao género, é comum que as pessoas do género feminino prefiram ambientes com temperaturas mais elevadas, possivelmente devido à resistência térmica do vestuário [20].

2.1.6.4. Fatores externos

Nos fatores externos, incluem-se a atividade metabólica e a resistência do vestuário. Relativamente à atividade metabólica, durante a realização de uma atividade, o corpo humano gera calor, cuja intensidade varia conforme o tipo de atividade, sendo dissipado por meio de mecanismos de trocas térmicas entre o corpo e o ambiente. Por outro lado, o vestuário desempenha um papel crucial na proteção do corpo, controlando as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente, influenciando assim a sensação de conforto térmico. O conforto térmico é dependente da influência destes fatores no balanço térmico dos habitantes [19].

2.1.6.5. Conforto Térmico no Interior do Edifício

O conforto térmico, embora subjetivo, é uma busca constante do ser humano, que procura não apenas aprimorar as suas condições de bem-estar, mas também quantificar esse conceito.

A medição do conforto térmico desempenha um papel crucial na promoção do bem-estar e da saúde dos ocupantes, assegurando que as condições interiores das habitações sejam ideais.

Em 1970, Poul Ole Fanger [21] introduziu uma modificação significativa na avaliação do conforto térmico ao desenvolver o modelo PMV-PPD. Esse modelo utiliza dois indicadores, o Predicted Mean Vote (PMV) e o Predicted Percentage of Dissatisfied People (PPD), para avaliar o ambiente térmico. Considerando variáveis como temperatura do ar, humidade relativa e velocidade do ar, o PMV e o PPD determinam o nível de satisfação dos ocupantes em relação à temperatura interna.

As pesquisas de Fanger [21], realizadas em câmaras climáticas com parâmetros ambientais e pessoais, abrangendo fatores como metabolismo e resistência térmica do vestuário, procuraram identificar se os indivíduos se sentiam em neutralidade térmica. Isto é, se não havia a necessidade de adicionar ou remover calor do ambiente e se não sentiam desconforto térmico localizado. O trabalho de Fanger foi crucial para a compreensão das interações entre as pessoas e o ambiente, estabelecendo uma base sólida para a avaliação do conforto térmico em edifícios [21].

Ao nível do estudo do conforto térmico, é ainda relevante referir o conforto adaptativo que se destaca como uma abordagem que reconhece a capacidade das pessoas se adaptarem às condições térmicas do ambiente que as envolvem, visto que o conforto humano não é uma realidade estática. Para prolongar conhecimentos sobre o modelo adaptativo, considerando as especificidades do caso português, sugere-se a leitura do trabalho de investigação do LNEC, TPI65 – Desenvolvimento de um Modelo Adaptativo para Definição das Condições de Conforto Térmico, conduzido por Luís Matias [22].

Além desses modelos e abordagens, as simulações dinâmicas, como as realizadas em ferramentas como o EnergyPlus, são cruciais para compreender o comportamento térmico dos edifícios em diferentes condições. Estas simulações permitem modelar detalhadamente o edifício, considerando as suas características construtivas, materiais utilizados, orientação solar. Possibilitando simular a influência da inércia térmica e a avaliação do conforto térmico em diferentes situações climáticas.

No contexto da legislação portuguesa atual, há uma necessidade crescente de incorporar essas metodologias dinâmicas na avaliação do conforto térmico de edifícios de habitação, considerando as características específicas do clima e da construção em Portugal, bem como do modo de habitar os edifícios pelos portugueses. A regulamentação vigente, com uma metodologia de cálculo estática, pode beneficiar de abordagens mais dinâmicas para promover ambientes interiores mais saudáveis e eficientes energeticamente. Tal abordagem já é exigida para edifícios de serviços, e seria benéfico estender essa prática também aos edifícios habitacionais.

2.2. Estratégias Bioclimáticas na Construção Vernácula

Fundamentada na repetição e na evolução contínua ao longo de diversas gerações, a arquitetura vernácula reflete um período em que o ser humano se ajustava às limitações dos re-

curso disponíveis, procurando otimizá-los ao máximo. Portanto, a análise da arquitetura vernácula e das estratégias bioclimáticas associadas a esse estilo de construção é revestido de elevada importância.

No século XVIII, com o início da Revolução Industrial na Europa, ocorreu o êxodo rural, levando a um rápido declínio do conhecimento e da experiência associados à arquitetura vernácula. A população migrou para as cidades devido ao processo de industrialização e urbanização em crescimento.

Dois séculos mais tarde, o Movimento Modernista representou uma ruptura significativa com a arquitetura vernácula. Este movimento introduziu materiais industrializados, como o vidro, o aço e o cimento. Esses materiais industrializados permitiram que a arquitetura adotasse uma estética universal, aplicável em qualquer contexto geográfico e associados à concepção de um Homem universal.

Conseqüentemente, a arquitetura vernácula foi gradualmente esquecida, muitas vezes sendo associada a culturas tradicionais, consideradas por alguns como antiquadas e economicamente desfavorecidas. Esse processo levou à substituição progressiva da arquitetura vernácula por modelos arquitetônicos progressistas que prometiam uma qualidade de vida superior [1].

O surgimento e a disseminação de sistemas mecânicos de climatização, juntamente com a descoberta de novas fontes de energia, impulsionaram o crescimento econômico de determinados países e promoveram a ampla disponibilidade de eletricidade. A arquitetura moderna, caracterizada pelo uso de materiais industrializados com baixa resistência térmica, tornou os edifícios sensíveis às variações do ambiente exterior, resultando numa significativa dependência dos sistemas de climatização mecânica [1].

O uso cada vez mais difundido da climatização mecânica, baseado na crença de que as reservas de combustíveis fósseis eram inesgotáveis, resultou na dependência desse recurso no sistema de produção de energia. No entanto, a crise petrolífera de 1973, desencadeada por fatores geopolíticos, revelou as vulnerabilidades na oferta global de energia e destacou os riscos associados à dependência dos combustíveis fósseis [1].

Esse cenário provocou um aumento significativo da preocupação com questões ecológicas e de sustentabilidade no mundo ocidental, levando os participantes no setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações (AECO) a repensar o paradigma da construção uniformizada e monótona, que tinha sido influenciado por figuras como Le Corbusier e Ludwig Mies van der Rohe. Esses arquitetos defendiam uma estética de "machine d'habiter" (máquina de habitar) e a utilização de materiais industrialmente produzidos [23].

O conceito de "machine d'habiter" de Le Corbusier visava revolucionar a arquitetura através da aplicação de princípios de funcionalidade e uniformização, com o objetivo de criar habitações de construção rápida e custos reduzidos. Esse conceito procurava solucionar os desafios habitacionais da era industrial e oferecer uma resposta eficaz para a habitação em massa [23].

Este arquiteto enfatizou a utilização de materiais e tecnologias modernas, como o betão armado e o aquecimento central, para criar espaços de habitação mais funcionais e padronizados. A visão de Le Corbusier da machine d'habiter foi influente na formação da arquitetura e

do planejamento urbano modernistas, embora também tenha sido criticada por dar prioridade à racionalidade em detrimento da experiência humana do espaço.

A ausência dessa relação entre a arquitetura e o lugar foi uma das razões para a rejeição do Movimento Modernista por parte dos cidadãos. Essa rejeição levou à necessidade de redefinir a arquitetura, tendo em conta o contexto vernáculo do passado [23].

A crescente consciência da necessidade de promover a construção sustentável tem reavivado a discussão sobre as vantagens dessa abordagem arquitetônica. Essa forma de construção é caracterizada pela relação entre o ser humano e o ambiente circundante, respeitando a necessidade fundamental de abrigo e harmonia com a natureza.

Essa filosofia reflete-se nas distintas abordagens regionais, que envolvem a utilização de materiais e técnicas diferentes para adaptar os edifícios às condições climáticas específicas, às estruturas familiares e às atividades econômicas locais. Essa diversidade regional e formas de habitar é resumida pelo conceito da mitologia romana do "Genius Loci," que faz referência ao espírito ou caráter único de um lugar. Este conceito frequentemente sugere que um local possui a sua própria atmosfera, identidade e história singulares, moldadas por diversos fatores, como geografia, clima, cultura e atividades humanas. No contexto da arquitetura, compreender o "Genius Loci" de um local é crucial para criar edifícios que estejam em sintonia com a sua envolvente e respeitem o contexto local [1].

A integração do "Genius Loci" na arquitetura moderna implica uma abordagem ponderada e holística. Isso requer que os arquitetos considerem as características únicas de um lugar enquanto incorporam princípios e tecnologias contemporâneas de concepção, incluindo a redução do consumo de energia e de recursos naturais.

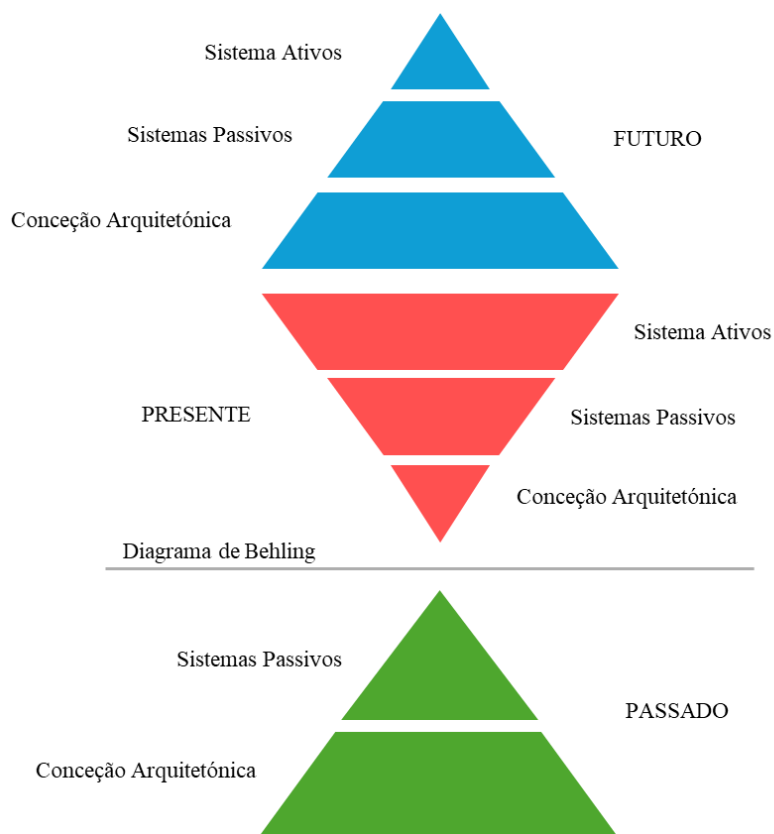


Figura 2.3 - Pirâmide de prioridades na concepção de edifícios (adaptado de [1]).

A Figura 2.3 representa a mudança de paradigma proposta por Stephan Behling [1], com uma adição feita por Fernandes, na qual se argumenta que a pirâmide representativa do futuro deveria inverter a ordem de prioridades estabelecida na concepção de edifícios. Nessa nova abordagem, destaca-se a importância da forma arquitetónica como prioridade em detrimento da dependência de sistemas ativos para controlar as condições de conforto interior, como ilustrado na pirâmide atual. O autor [1] também advoga que o futuro deveria buscar uma integração harmoniosa entre tradição e modernidade, permitindo a criação de uma estética arquitetónica que coexista de forma eficaz com a funcionalidade dos edifícios.

A arquitetura vernácula é caracterizada por ser uma forma de expressão formal desenvolvida em resposta a fatores geográficos, climáticos e económicos específicos de uma determinada região. As estratégias aplicadas na arquitetura vernácula consideram uma variedade de critérios, incluindo características geográficas, radiação solar, orientação, geometria, formato, materiais, entre outros, para se adaptar de forma harmoniosa ao seu ambiente local [1].

A arquitetura vernácula em Portugal abrange uma diversidade de formas e materiais que incorporam várias estratégias para mitigar os efeitos do clima. Entre essas estratégias, destacam-se aquelas relacionadas com a aplicação de concepção passiva e a eficiência energética dos edifícios, o que vai de encontro com a mudança de paradigma que se pode verificar nas diretrizes europeias e nacionais que estão descritas com maior detalhe no capítulo Regulamentação Térmica de Edifícios em Portugal.

A carta bioclimática de Baruch Givoni [24] condensa, num diagrama psicrométrico (Figura 2.4), as estratégias bioclimáticas recomendadas para cada tipo específico de clima, visando otimizar o conforto térmico das construções. Os parâmetros climáticos destacados nestes gráficos incluem a temperatura de bolbo seco e húmido, a humidade relativa e o conteúdo de humidade no ar. Diferentes manchas na carta indicam climas distintos, associados a estratégias bioclimáticas apropriadas para otimizar o desempenho dos edifícios sob análise.

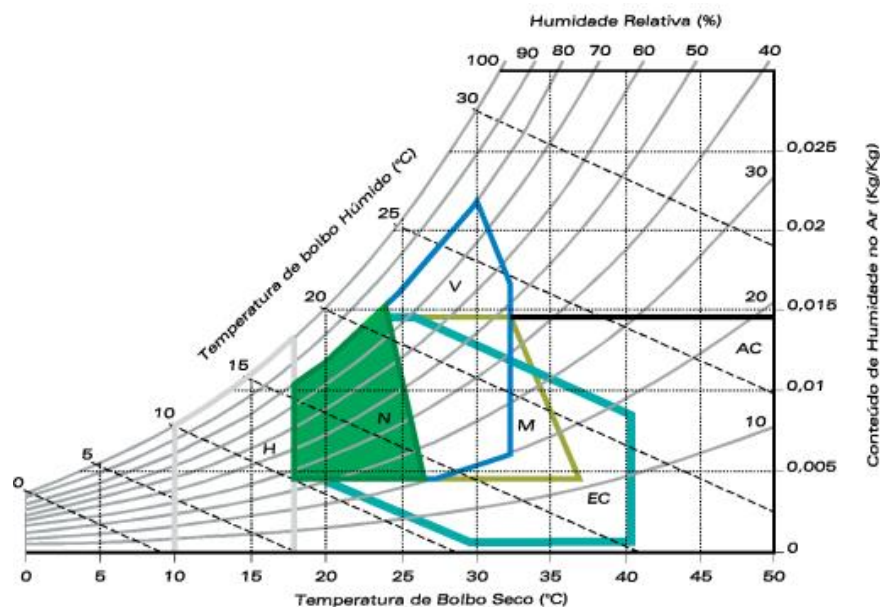


Figura 2.4 - Carta bioclimática de Baruch Givoni [24].

As estratégias utilizadas na construção solar passiva mencionadas mais à frente estão particularmente ligadas às zonas onde a arquitetura vernácula em taipa é mais comum em Portugal, abrangendo as regiões designadas pela letra M, que compreendem o Alentejo e o Algarve. Esta é uma região onde é importante promover o arrefecimento por radiação [24].

2.2.1. Inércia Térmica e Higroscópica

A inércia térmica, como já foi referido anteriormente, pode ser definida como a capacidade de um edifício com uma massa térmica considerável atrasar e suavizar as flutuações no fluxo de calor. Elementos de construção de elevada massa contribuem para a elevada inércia térmica dos edifícios incluem as amplas paredes construídas em taipa e os tetos abobadados. Estes elementos desempenham um papel fundamental no amortecimento das variações de temperatura externa, mantendo assim uma temperatura interna dos edifícios mais estável.

Como já foi referido no capítulo anterior, alguns estudos indicam que a elevada inércia térmica é responsável por reduzir significativamente as flutuações de temperatura, mantendo-as praticamente constantes. Isso ocorre porque a massa térmica substancial da envolvente do edifício retarda a transferência de calor, resultando em atrasos térmicos significativos [11].

O controlo da humidade relativa no interior dos edifícios depende da inércia higroscópica dos materiais, que é a capacidade de certos materiais adsorverem e libertarem humidade. Produtos como alguns tipos de rebocos de terra podem ter fraca inércia térmica, mas desempenham um papel relevante no controlo do teor de humidade do ar interior. No caso das habitações com paredes em taipa e revestimento à base de terra, também é relevante destacar a elevada inércia higroscópica, que é responsável pelo bom comportamento do edifício na regulação da humidade. Isto porque as paredes de taipa têm uma notável capacidade de adsorção e desadsorção de vapor de água. Este fenómeno é atribuído à elevada higroscopicidade dos materiais argilosos, possibilitando que as paredes de terra desempenhem o papel de reguladores passivos de humidade. Foram conduzidos estudos em edifícios com estas condições, localizados na região sul de Portugal que apresentam diferenças de humidade significativas, variando entre valores mínimos de 20% no exterior e máximos de 95%, enquanto no interior se mantinham entre os 40% e 60% [25]. Além disso, os rebocos de terra destacam-se por apresentarem uma higroscopicidade superior à de outros revestimentos convencionais, como o gesso ou a cal, devido à sua capacidade de captar e libertar vapor de água conforme as variações de temperatura e humidade relativa do ambiente envolvente [26]. Esta maior higroscopicidade resulta da presença de minerais argilosos que adsorvem e libertam partículas de vapor, contribuindo para uma regulação higrométrica eficaz. A sua capacidade de adsorção e libertação de humidade é tão elevada que mesmo rebocos de espessura comum (1 a 2 cm), conseguem responder de forma eficiente aos ciclos diários de humidificação e secagem de uma habitação [26].

Além do efeito da elevada inércia térmica e higroscópica, é relevante analisar o impacto combinado de outras estratégias passivas que são comumente aplicadas em edifícios de construção vernácula semelhantes e que também podem influenciar o desempenho térmico das habitações.

2.2.2. Traçado Urbano

Nas região sul de Portugal, mais precisamente no Alentejo e Algarve, as vilas e cidades são notáveis pela presença de um traçado compacto e irregular com grande número de ruas estreitas que se interligam formando pátios urbanos. Esse padrão de planeamento urbano possibilita que os edifícios com mais de um piso ofereçam sombra uns aos outros, reduzindo assim os ganhos solares pela envolvente do edifício e tem também como objetivo reduzir a intensidade de ventos fortes, contribuindo para um ambiente mais fresco [25].

Devido à notável inércia térmica das paredes das habitações construídas em taipa e do pavimento das estreitas ruas, as temperaturas destas superfícies durante as manhãs mantêm-se mais baixas do que a temperatura do ar. Esse fenómeno ocorre devido à maior densidade do ar frio, que tende a permanecer nas ruas estreitas, desde que não haja vento (Figura 2.5). O planeamento urbano compacto, predominante na região do Alentejo e do Algarve, reduz o número de superfícies expostas à radiação solar, permitindo que os edifícios façam sombra uns aos outros. Isso, por sua vez, reduz os ganhos solares na envolvente dos edifícios [15].

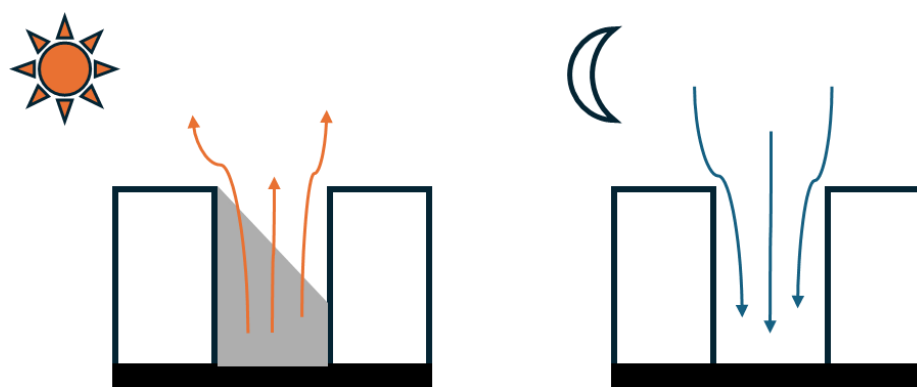


Figura 2.5 - Circulação de ar em diferentes períodos do dia [15].

Estas estratégias urbanas revelam-se particularmente eficientes em climas onde a estação de arrefecimento é dominante, como é o caso destas regiões. No entanto, esta mesma característica que se revela vantajosa nos meses mais quentes, pode ser prejudicial durante o inverno. A manutenção de ruas frias por períodos prolongados resulta num ambiente urbano menos confortável, o que é particularmente desvantajoso em regiões onde a estação de aquecimento é predominante, já que limita a exposição ao sol e dificulta o aquecimento natural das superfícies.

2.2.3. Orientação Preferencial

As tecnologias solares passivas como a seleção da orientação preferencial das fachadas principais, o dimensionamento adequado das portas e janelas e possíveis dispositivos de sombreamento são algumas das estratégias para aproveitamento da energia solar para melhoria das condições de conforto.

A orientação adequada dos edifícios desempenha um papel importante na otimização dos ganhos solares durante o inverno e na minimização do sobreaquecimento durante o verão. As habitações são geralmente orientadas de modo a maximizar o aproveitamento da luz natural e a utilização do aquecimento ou arrefecimento solar passivo [24].

A orientação preferencial das habitações é norte-sul, tirando partido das variações da altura do sol ao longo do ano. Para além disso, a compartimentação interna deve também ser planeada em função desta orientação, assegurando a comunicação entre compartimentos servidos por fachadas opostas, o que permite uma melhor circulação de ar e contribui para o conforto térmico do edifício. As alturas mínimas do sol ocorrem a este ao amanhecer e a oeste ao entardecer, com a altura máxima por volta do meio-dia quando o sol se encontra a sul, no hemisfério norte. Por outro lado, a orientação este-oeste não é tão vantajosa, uma vez que, embora proporcione ganhos solares positivos nas primeiras e últimas horas do dia no inverno, resulta em ganhos excessivos durante o verão. Ao adotar uma orientação das fachadas voltadas a sul, e aproveitando a maior elevação do sol durante os verões quentes, é possível implementar eficazes estratégias de sombreamento para controlar a radiação solar, como alpendres com vegetação de folha caduca. Isso permite reduzir a exposição ao sol no verão, sem comprometer o

aproveitamento solar no inverno, uma vez que o sol nessa estação se encontra a uma menor altura no céu [6].

2.2.4. Vãos

As janelas são concebidas com dimensões adequadas à área do compartimento que servem e à orientação da fachada. Para além de otimizar a entrada de luz natural, estas dimensões são pensadas para controlar os ganhos solares, evitando sobreaquecimento no verão e maximizando a entrada de calor no inverno. As janelas, frequentemente recuadas em relação ao plano da fachada, permitem que a verga e as ombreiras desempenhem um papel crucial como elementos de sombreamento, contribuindo para a regulação térmica dos espaços habitacionais, em conformidade com a orientação preferencial dos edifícios [24].

2.2.5. Cores

A escolha de cores claras, associadas à região Sul de Portugal, é uma estratégia eficaz na arquitetura vernácula para controlar o ganho de calor solar durante os períodos quentes do ano. A utilização de cores claras na envolvente dos edifícios, comumente observada nas paredes caiadas a branco, tem como finalidade refletir a radiação solar incidente. Essa prática ajuda a reduzir a absorção de calor pela superfície do edifício, contribuindo assim para manter as temperaturas internas em níveis mais confortáveis e minimizando a necessidade de sistemas de arrefecimento ativos.

2.2.6. Ventilação

A ventilação noturna pode ser caracterizada como uma abordagem indireta e convectiva que utiliza a circulação de ar para melhorar as condições de conforto nas habitações durante o período de arrefecimento. Visa, além da renovação do ar interior, o arrefecimento dos elementos estruturais do edifício, contribuindo para a redução das temperaturas internas. Essa estratégia de ventilação noturna é implementada para proporcionar um ambiente mais confortável aos ocupantes. Especialmente em regiões onde as temperaturas diurnas podem ser elevadas e as noites mais frescas, oferecem uma oportunidade para arrefecer o interior do edifício.

Nalguns edifícios, é possível encontrar aberturas estrategicamente integradas nas janelas ou portas com o objetivo de promover a circulação de ar e facilitar o arrefecimento noturno das habitações (Figura 2.6). Essas aberturas são projetadas para auxiliar na supressão das cargas térmicas acumuladas durante o dia, contribuindo para a renovação do ar interior e para a redução das temperaturas internas durante as noites mais frescas. Essa estratégia de ventilação natural é comumente aplicada em edifícios de construção vernácula para melhorar o conforto térmico dos ocupantes.



Figura 2.6 - Exemplo de abertura para promoção da ventilação natural [27].

Outros elementos associados à ventilação e à arquitetura vernácula incluem as chaminés, que se destacam como características distintivas tanto no Alentejo como no Algarve. Este detalhe arquitetónico adquire, ao longo do Alentejo, uma intenção decorativa, evoluindo até representar, no Algarve, a parte mais bela e nobre do edifício, caracterizada por formas de torres, cúpulas e requintados rendilhados [28].

2.2.7. Pátios e Vegetação

A presença de pátios em habitações proporciona um espaço privado exterior que permite a criação de um microclima próximo à residência. Quando esses pátios são ajardinados com vegetação, as plantas proporcionam sombra ao chão do pátio e às paredes do edifício, gerando um efeito de arrefecimento por meio da evapotranspiração das plantas. Além disso, nalgumas habitações, a presença de uma fonte de água colabora ainda mais no processo de arrefecimento evaporativo.

É importante notar que a presença de vegetação e de uma fonte de água contribui para a formação de um microclima no pátio, reduzindo o efeito de ilha de calor local. Isso ocorre porque o ar, mais húmido e, conseqüentemente, mais denso, tende a permanecer no pátio pela manhã, até ser aquecido pela radiação solar. Essas estratégias são comuns na arquitetura vernácula e têm o objetivo de melhorar o conforto térmico dos espaços exteriores e interiores das habitações [17].

2.2.8. Considerações Finais

A combinação dessas estratégias tem demonstrado, em diversos estudos, ser eficaz na obtenção de condições de conforto no interior das habitações durante os períodos de verão [29]. Essas estratégias têm uma longa tradição de uso devido à sua comprovada eficácia na mitigação dos efeitos do clima.

Em várias pesquisas, observou-se que elementos como a elevada inércia térmica, a orientação solar adequada, dispositivos de sombreamento e a organização apropriada das divisões

ligada à orientação preferencial do edifício desempenham papéis fundamentais na manutenção das temperaturas internas do ar dentro dos padrões de conforto [30].

Muitos estudos têm destacado a necessidade de reintegrar estratégias bioclimáticas, como as utilizadas na construção vernácula, nas habitações contemporâneas devido à sua simplicidade e pragmatismo. Essas estratégias são recursos ativos que podem ser empregados para alcançar simultaneamente condições de conforto térmico e reduzir o consumo energético [29, 30].

É fundamental que se atribua prioridade aos edifícios que adotam estratégias passivas para controlar a temperatura e a humidade relativa no interior das habitações. A utilização de sistemas mecânicos deve ser restrita ao papel de sistemas de apoio, apenas quando as estratégias bioclimáticas não conseguem por si só proporcionar as condições de conforto desejadas aos ocupantes. Esta abordagem não apenas promove a eficiência energética, mas também contribui para a criação de ambientes interiores mais sustentáveis e confortáveis para os habitantes [17].

É importante notar que, embora os edifícios em estudo apresentem vantagens notáveis, como o efeito da inércia térmica que lhes permite manter condições de elevado conforto em grande parte do ano, os elementos opacos verticais desses edifícios nem sempre estão em conformidade com a regulamentação térmica nacional, especialmente em relação aos coeficientes de transmissão térmica. Os profissionais AECO ligados à construção em terra argumentam que os regulamentos térmicos vigentes, mesmo com as revisões regulamentares mais recentes de 2020, são demasiado restritivos, pois não consideram plenamente os princípios passivos subjacentes à conceção desses edifícios mantendo o foco nos coeficientes de transmissão térmica e ignorando o efeito da inércia térmica em soluções construtivas como a taipa [29].

2.3. Construção em Terra em Portugal

2.3.1. Terra como material de construção

Apesar de o Homem Primitivo usar argamassas de terra para revestir os troncos com que construía os seus abrigos, as primeiras construções em terra datam de cerca de 8000 a 10000 anos atrás e coincidem com o surgimento das primeiras sociedades agrícolas. A necessidade de abrigar populações em crescimento levou à construção de habitações. Foram descobertas habitações construídas em adobe no Turquemenistão, que remontam a 8000 anos atrás, sugerindo que construções semelhantes podem ter existido até 1000 anos antes desse período. Esse desenvolvimento coincide com o período da pré-história recente [31].

Há vários exemplos de edifícios em terra com mais de 1000 anos que chegaram ao século XXI, incluindo partes da Grande Muralha da China, que têm 3000 anos e que foram construídos com taipa [31].

A utilização ao longo de milénios deste tipo de construção é representativa da sua viabilidade. Embora a terra não seja um material de construção predominante na maioria dos países

industrializados, o Departamento de Energia dos Estados Unidos Energia dos Estados Unidos estimou que em 2008 mais de metade da população mundial habitaria em casas construídas com terra não cozida, no entanto, este tipo de construção também existe em países industrializados [32].

Na civilização ocidental, a construção com terra crua historicamente sofreu uma conotação negativa, considerada menos prestigiosa em comparação com a construção em pedra, especialmente durante o período da civilização romana. No entanto, o uso de terra crua na construção era comum em praticamente toda a Europa até o advento da Revolução Industrial.

A industrialização trouxe consigo a introdução de materiais produzidos em massa e avanços tecnológicos, como o tijolo, vidro, cimento e aço. Essas inovações transformaram a abordagem à construção, uma vez que, até então, os materiais utilizados dependiam das disponibilidades locais.

Como mencionado anteriormente, a arquitetura moderna revolucionou completamente o paradigma da construção, introduzindo o uso generalizado de novos materiais. O alto consumo de energia associado à disseminação dos sistemas de climatização e à produção destes novos materiais resultou num aumento significativo do impacto ambiental da indústria da construção [1].

Compreendendo o impacto ambiental que o setor da construção tem tanto ao nível da emissão de gases de efeito de estufa, do consumo de matérias-primas não renováveis, da produção de resíduos, assim como o aumento de consumo energético surge a necessidade de alternativas para resolver estes problemas, o que fez aumentar a investigação científica associada à construção em terra. A agenda ecológica dos países mais desenvolvidos como os Estados Unidos da América ou a Austrália levou a que a construção em terra tenha aumentado nos últimos anos [31].

A construção em terra tem uma longa tradição em Portugal, sobretudo em regiões como o Alentejo, Algarve e a Beira Interior e Litoral, Figura 2.7b). A construção em terra em Portugal surge em regiões onde faltam bons afloramentos rochosos. A casa rural tem uma estreita dependência com os materiais de construção locais para criar paredes e estruturas de suporte de cargas [28].

A Figura 2.7a) apresenta um mapa do património em terra da União Europeia de 2011.

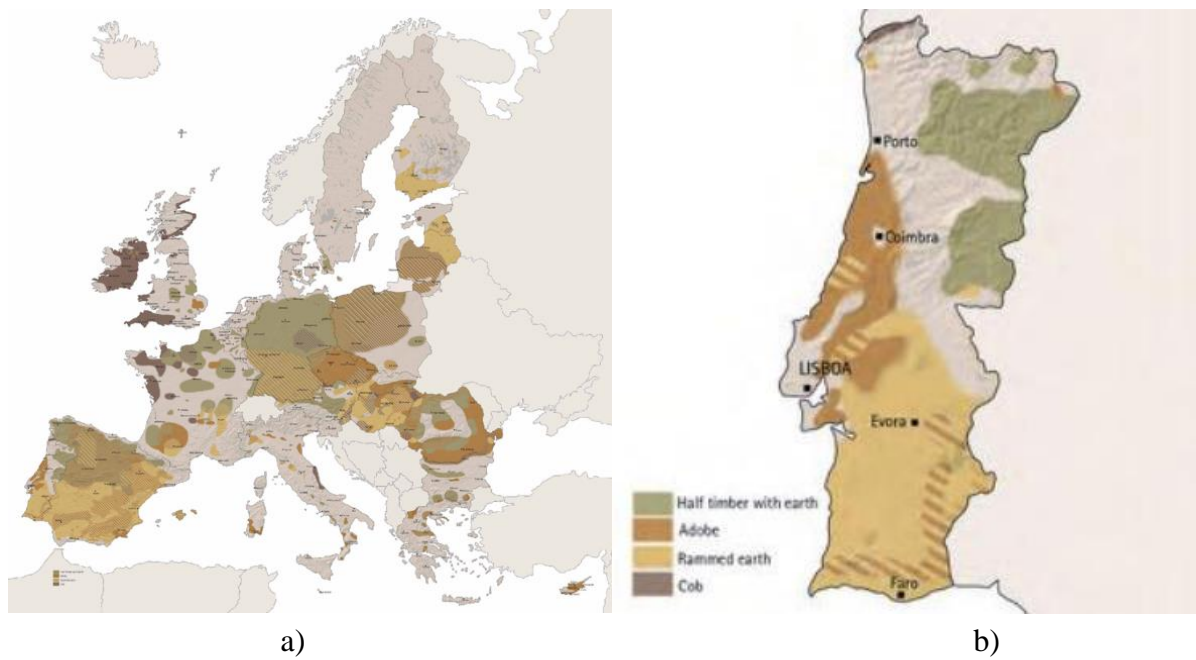


Figura 2.7 - Património em terra a) da União Europeia; b) e de Portugal Continental [33].

Ao analisar Portugal com maior detalhe, é possível mapear a prevalência dos diversos estilos de construção em terra, entre eles, a taipa (*rammed earth*), adobe (*adobe*) e tabique (*wattle and daub*).

A construção com materiais de terra crua, em particular a taipa e o adobe, é uma tradição que perdura há séculos em território português. Até aproximadamente a década de 1950, a técnica construtiva predominante no Baixo Alentejo e no sul do Alto Alentejo era a taipa, embora outras áreas da região alentejana também fizessem uso de adobe ou alvenaria de pedra. Testemunhos da utilização de terra crua na construção são ainda visíveis ao longo do vale do Tejo e em regiões mais a norte, como Aveiro, Bairrada, Mira e Castelo Branco.

O mapa da Figura 2.8 mostra com maior pormenor a distribuição dos três principais tipos de construção em terra crua utilizados em Portugal Continental.

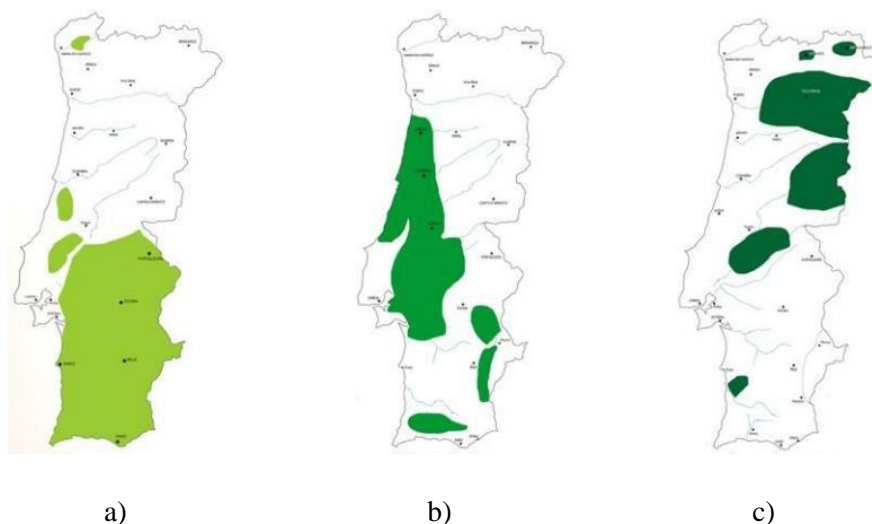


Figura 2.8 - Distribuição geográfica das principais soluções construtivas em terra crua, em Portugal Continental [34].

As técnicas de construção em terra crua mais comuns em Portugal são a taipa (a), o adobe (b) e o tabique (c).

A taipa, que será abordada de forma mais detalhada posteriormente, é o método de construção monolítica mais amplamente utilizado em Portugal. Este sistema foi introduzido na Europa pelos fenícios e assimilada em Portugal sob influência árabe. A taipa é caracterizada por ser a técnica que permite a construção de paredes autoportantes, envolvendo a compactação da terra entre moldes (taipais) através de maços, pilões ou pisões [35].

As dimensões dos adobes variam consideravelmente, desde as dimensões dos tijolos maciços tradicionais até tamanhos substancialmente maiores. As paredes internas são geralmente construídas com adobes a uma vez, enquanto nas construções em que o adobe é usado para paredes exteriores portantes, é comum utilizar adobes a uma vez e meia e a duas vezes [36].

O tabique, resulta do preenchimento de uma estrutura ligeira de prumos e encanstrado de madeira com uma argamassa de terra, resultando em paredes não portantes com uma reduzida espessura [36].

2.3.2. Taipa Vernácula

A taipa apresenta variantes na tipologia de construção da habitação rural, dependendo do tipo de terra utilizada, da tradição regional de construção ou do taifeiro, para além das particularidades locais.

- **Fundações**

Para dar início à construção das paredes de taipa, o primeiro passo envolve a extração da terra das fundações. Essa escavação serve para estabelecer as fundações, normalmente feitas

em pedra argamassada. A terra retirada desses caboucos é a matéria-prima utilizada para a construção das paredes de taipa [37].

A ampla utilização da pedra oferece duas vantagens significativas. Em primeiro lugar, como é um material sólido e compatível com a terra, a pedra garante uma ligação duradoura e coesa entre as fundações e as paredes de taipa. Por essas razões, a pedra não é apenas empregue nas fundações, mas também nos embasamentos, nas cintas estruturais que coroam as paredes de taipa e nos contrafortes [38].

O enchimento da escavação das fundações das habitações de taipa é tipicamente realizado com uma mistura de materiais locais, como a pedra, areia e argila, aos quais se junta tijolo e argamassa de cal elevando-se até cerca de 50 centímetros a 1 metro acima do nível do solo. Atualmente, esse embasamento é frequentemente construído em betão armado.

Por vezes, o embasamento é limitado apenas até ao piso térreo, o que é uma prática incorreta. Com o tempo, isso resulta na ascensão da humidade nas paredes por capilaridade e na penetração de humidade, levando a problemas de insalubridade, ao aparecimento de eflorescências e, em alguns casos, ao colapso das paredes.

Geralmente, na superfície de contacto entre o embasamento e a taipa, é aplicada uma camada impermeável, que poderá ser ardósia ou um material asfáltico. Isso evita o contacto direto da taipa com o solo, prevenindo a absorção de humidade na camada superior [36, 37].

- **Paredes**

A ampla variedade de tipologias de construção em taipa observada em todo o país reflete a diversidade resultante do conhecimento local, da adaptação ao meio ambiente e dos recursos disponíveis no contexto regional.

A estrutura monolítica das paredes de taipa é obtida através da compactação de grandes blocos de terra entre os taipais, geralmente com o auxílio da força humana e malhos ou maços. Este processo resulta na formação dos troços das paredes exteriores.

As paredes têm de conferir três funções distintas, são elas, a absorção e transmissão das solicitações mecânicas, a regulação térmica pela sua elevada inércia térmica e higroscópica e a regulação acústica pela sua elevada massa [37].

2.3.3. Fases de Construção de uma Parede de Taipa

- **Seleção e Preparação das Terras**

O solo utilizado na construção em terra é composto apenas pela sua fração mineral, excluindo a parte orgânica geralmente encontrada nas camadas superficiais. Esta fração consiste em partículas minerais, abrangendo argilas, siltes e frações superiores de material arenoso, que são combinados em diversas proporções. É crucial garantir que, ao selecionar e compactar o

solo, não haja presença de matéria orgânica, como ramos ou fragmentos de madeira. Isto devido ao fato de que esses elementos se podem encontrar deteriorados, criando condições propícias para o desenvolvimento de fungos [31, 39].

Nem todas as terras são adequadas para a construção de paredes de taipa, uma vez que requerem um equilíbrio entre a quantidade de argila, em menor quantidade, e areia, em maior quantidade. Na execução deste tipo de paredes, os solos classificados como areias argilosas, ou argilas arenosas, são os mais indicados.

Quando a terra é magra, há excesso de areia e a terra é pobre em argila, a coesão é reduzida, uma vez que é a argila que confere a coesão à parede. Nestes casos, é necessário adicionar aglomerantes, como argila ou cal.

Por outro lado, quando há excesso de argila, terras gordas, a parede pode retrair e desenvolver fissuras durante a secagem. Nesses casos, é importante adicionar areia e cascalho fino para reduzir o risco de fendilhação [37].

Se o solo não tem agregados grosseiros, pode existir necessidade de os adicionar, por exemplo, misturando outra terra. O traço necessário à boa execução da massa de taipa é determinado empiricamente na região, pela experiência antiga da aplicação do material. Segundo alguns autores, a granulometria ideal para a execução da taipa deverá respeitar alguns intervalos percentuais em relação às quantidades de cascalho, areia, siltes e argila.

Diversos estudos têm abordado as percentagens ideais para a construção de paredes de taipa, uma técnica que apresenta múltiplas variações. A literatura científica oferece orientações sobre as faixas percentuais recomendadas. Para alcançar um desempenho ótimo na edificação de paredes de taipa, a distribuição de agregados deve seguir os seguintes intervalos: argila (15-25%), areia (40-50%), silte (20-35%), cascalho (0-15%) [13]. Além disso, a percentagem ideal para o teor de água na mistura de taipa é entre 9,5% e 11,0%. É ainda recomendada uma prática sugerida por alguns autores que consiste na adição de cal aérea em pó à mistura de terra antes de ser utilizada nos taipais, para otimizar o desempenho do material [39].

- **Montagem e enchimento dos taipais**

Aos moldes, constituídos pelos taipais laterais e frontal, a comporta, unidos entre si por elementos de travamento, conforme mostrado na Figura 2.9, dá-se o nome de enchámeis. Os elementos de travamento laterais são as costeiras, na parte superior côvados e na base, agulhas.

Os enchámeis costumam ter dimensões entre 45 cm a 1 m de altura e 1 a 3 m de comprimento. A largura dos enchámeis corresponde à da parede, geralmente variando de 40 a 50 cm para edifícios de apenas um piso, aumentando para 0,70 a 0,90 m no piso térreo em casas com 2 pisos, e as dimensões, a forma e a espessura das paredes dependem dos taipais utilizados [37].

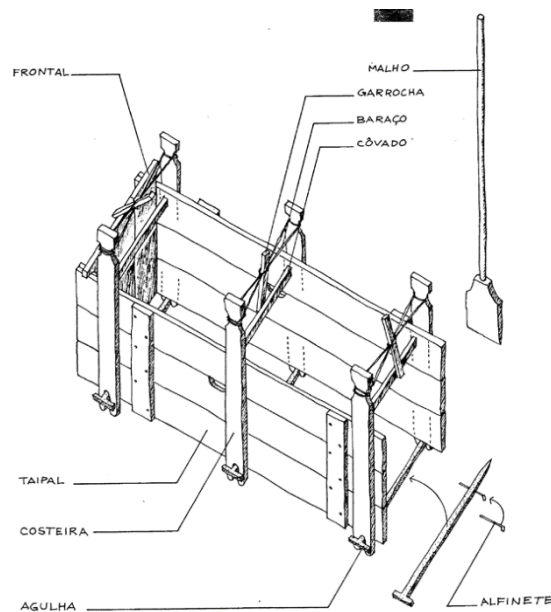


Figura 2.9 - Composição dos taipais para execução da taipa [37].

- **Compactação da terra**

Na etapa de compactação da mistura, a terra previamente humedecida e homogeneizada é vigorosamente compactada utilizando malhos, maços ou pilões. Existem três tipos de pilões: os de peso, os pneumáticos e os vibratórios. O taipal é preenchido com camadas de terra humedecida de aproximadamente 20 cm de altura. Durante esse processo, essas camadas reduzem para cerca de 10 cm, garantindo que ela adquira consistência adequada e não apresente vazios [37]. Este processo é repetido até que todo o volume seja preenchido [39].

- **Execução das fiadas**

Após o enchimento e compactação das sucessivas camadas de terra até completar o preenchimento do taipal, este é desmontado assim que o troço é finalizado. Em seguida, realiza-se a deslocamento lateral dos taipais para a realização de um novo troço. Utilizar mais do que um conjunto de moldes permite à construção avançar mais depressa. Após a conclusão de todo um anel, que corresponde ao perímetro do edifício, os taipais são deslocados para o nível superior [37].

Execução das juntas

As juntas entre taipais podem adotar diferentes orientações, sendo verticais ou inclinadas no mesmo nível e juntas horizontais entre níveis.

A execução das juntas envolve o uso de fiadas de tijoleira, pedra ou até cacos de telha argamassada. Nas juntas oblíquas, não é necessário realizar o travamento das camadas superiores por meio de juntas desencontradas. As fiadas sobrepostas nas juntas oblíquas ou inclinadas

são colocadas em sentido contrário. Em algumas situações, quando estas juntas não são horizontais, podem ser inclinadas para otimizar o travamento entre os blocos de taipa. Independentemente da forma, é fundamental que as juntas sejam sempre desencontradas [36, 37, 39].

Quanto às juntas horizontais entre taipais de níveis sucessivos, podem ser executadas sem a necessidade de qualquer material adicional, ou então, podem ser fortalecidas mediante a colocação prévia de camadas de argamassa de cal aérea, tijolos maciços tradicionais ou elementos de pedra delgados nas periferias dos taipais.

- **Execução dos cunhais**

Os cunhais, elementos estruturais cruciais nas paredes de taipa, são responsáveis por conferir estabilidade e resistência às extremidades das construções. Diversas soluções são aplicadas em construções de taipa para fortalecer os cunhais [37].

A sua execução envolve incluir o travamento dos blocos por cruzamento de blocos perpendiculares, o uso de pedras alongadas como cavilhas ou a utilização de tijolos maciços. Esses elementos são geralmente inseridos dentro do taipal para estabelecer uma ligação eficaz à estrutura de terra [40].

- **Reforços**

A capacidade de resistência da taipa a ações verticais (compressão) e ações horizontais (flexão e corte) é influenciada por diversos fatores, incluindo a continuidade das formas, distribuição simétrica dos elementos, ausência de pontos críticos de concentração de tensões, homogeneidade das propriedades mecânicas das paredes e dos materiais utilizados, rigidez, durabilidade e adequação da capacidade resistente aos esforços. Para ações verticais, adota-se uma tensão de segurança conservadora de 0,3 MPa. As ações horizontais, resultantes não apenas de sismos, mas também de elementos como telhados inclinados, arcos e abobadilhas, podem provocar deformações indesejadas [37].

Estudos sugerem que, para garantir resistência sísmica, a espessura da parede deve ser, no mínimo, 1/8 da altura da parede, uma prática tradicionalmente adotada para garantir segurança. Contudo, é possível adotar espessuras mais esbeltas, com uma relação de 1/10 ou mesmo 1/12, mantendo a taipa como estrutura portante [41]. Para reforçar a estabilidade e melhorar o desempenho dessas paredes, podem ser empregados contrafortes salientes, conhecidos como "gigantes", frequentemente construídos em alvenaria de pedra. A presença de gigantes pode indicar falta de fundações ou a existência de abóbadas e arcos no interior da edificação. Alternativamente, a cintagem com varões metálicos tracionados horizontalmente no interior de paredes resistentes paralelas é uma prática eficaz para proporcionar maior estabilidade e reforço lateral [36, 37]. Na fachada exterior, é comum encontrar contrafortes ou pilares de pedra incorporados para consolidar a parede [35].

- **Abertura de vãos para janelas e portas**

Em determinadas localidades, a prática tradicional previa a abertura de vãos apenas após a conclusão das paredes cegas. No entanto, tornou-se comum executá-los por negativo, revestindo os vãos com alvenaria de tijolo ou colocação de verga de madeira [37]. A observação nos vãos revela o emprego de vergas e ombreiras em pedra, quando disponíveis. Na ausência destas, opta-se pela aplicação de alvenaria de tijolo de burro ao redor dos vãos, substituindo a verga de madeira por arcos quase horizontais em tijolo de burro para uma melhor integração com a taipa [35]. Nos edifícios de taipa, os vãos eram frequentemente equipados com lintéis de madeira, pedra ou, mais recentemente, betão armado [36].

- **Tetos e coberturas**

Nas habitações que apresentam paredes de taipa, são comuns as coberturas com estrutura de madeira e revestimento de telha cerâmica, sendo frequentemente observados tetos em abóbada ou abobadilha. Destaca-se a importância da cobertura com telha cerâmica projetar-se além do plano das paredes para salvaguardar contra os efeitos danosos da água da chuva que escorre pelos paramentos no exterior da habitação [37]. Para mitigar as tensões provenientes do peso da estrutura de cobertura sobre as paredes, estas são fortalecidas na parte superior por um remate em madeira ou elementos de pedra. Este tipo de configuração construtiva, proporciona uma ampla proteção às paredes contra a chuva. Entretanto, essa abordagem também é aplicada em coberturas planas, como as típicas açoteias algarvias [36].

- **Revestimentos de piso**

A aplicação da terra nas habitações não se limita exclusivamente às paredes, estendendo-se também aos pavimentos. No interior destas casas, onde a luz natural ilumina as divisórias, os pavimentos são diversificados. Nas habitações mais simples, é comum encontrar pavimentos de terra batida. O processo de pavimentação consiste em aplicar uma camada de terra com aproximadamente 15 cm de espessura por toda a área da casa, humedecendo-a e compactando-a adequadamente com uma enxada até alcançar o acabamento desejado [38]. Em residências mais abastadas, opta-se por pavimentos compostos por baldosas, uma tijoleira fina de formato quadrangular, muitas vezes dispostas em padrão retangular em espinha de peixe. Além disso, ocasionalmente, seixos rolados são utilizados em áreas de maior circulação, como entrada e cozinha [40].

- **Revestimentos de paredes**

Os revestimentos exteriores em edifícios de taipa visam proporcionar proteção e durabilidade, podendo ser aplicados de diversas formas. Uma prática comum consiste na aplicação direta de caiação, que envolve a pintura com leite de cal em várias demãos cruzadas, utilizando uma brocha grossa. Como alternativa, para uma proteção mais eficaz, recorre-se a um reboco

composto por camadas múltiplas de argamassa à base de cal aérea, seguido de caição. Por razões económicas e estéticas, o revestimento pode ser aplicado apenas em áreas mais expostas como cunhais, socos e aros de vãos [36].

Em algumas situações, os edifícios podem prescindir de revestimento em toda a extensão [35]. As paredes interiores podem não apresentar qualquer tipo de revestimento, uma vez que estão abrigadas da chuva e do vento. No caso das paredes exteriores, a ausência de revestimento só ocorre em situações muito específicas, como na taipa militar, em que a terra é misturada com um ligante. Quando a taipa está mais exposta, torna-se essencial aplicar revestimento, pois a falta de manutenção resulta em desagregação significativa do paramento exterior [35].

Os revestimentos exteriores desempenham um papel crucial na prevenção da deterioração das paredes de taipa, protegendo-as das condições atmosféricas agressivas. Na ausência de revestimento, as paredes ficam sujeitas à erosão e deterioração. Tipicamente, o revestimento exterior é composto por um reboco à base de cal aérea e terra, com acabamentos simples e pintura por caição. Internamente, o revestimento pode variar, sendo possível aplicar um reboco apenas de terra, seguido de caição. Ao escolher revestimentos para edificações de taipa, é crucial evitar materiais pouco permeáveis ao vapor de água, como os à base de cimento. A taipa possui grande higroscopicidade ao vapor de água, absorvendo e libertando a humidade do ambiente. O uso de revestimentos impermeáveis pode impedir a secagem da humidade da taipa, levando a anomalias associadas às diferentes formas de manifestação de humidades. Recomenda-se, portanto, o uso de revestimentos à base de cal aérea, podendo envolver a adição de pozolanas ou terra [39].

A construção das paredes de taipa deve ser realizada preferencialmente na estação seca, permitindo que a estrutura seque adequadamente e adquira maior resistência. Após a construção, é comum deixar as paredes expostas durante algum tempo para permitir a secagem e estabilização dos materiais. Somente após esse período é aplicado o revestimento, como o reboco de cal e areia e/ou a caição direta. Essa etapa protege a parede contra a ação da água e deve ser realizada de forma sequencial nos paramentos da parede, começando pelo exterior para prevenir a penetração de humidade. Além disso, é essencial garantir uma manutenção regular, com reaplicação periódica de caição [37].

2.4. Regulamentação Térmica de Edifícios em Portugal

2.4.1. Considerações iniciais

A complexa conjuntura económica que confrontou a Europa a partir da década de 70 do século XX, decorrente da primeira crise do petróleo, desencadeou um acentuado encarecimento dos custos energéticos. Tal situação gerou uma preocupação latente no que concerne ao fornecimento de energia, de modo a atender às crescentes necessidades. Paralelamente, a população

ansiava por melhores condições de higiene e conforto nos edifícios, o que estimulou a formulação de estratégias para otimizar as condições térmicas.

Nesse contexto, a 6 de Fevereiro de 1990, foi promulgado em Portugal o Decreto-Lei n.º40/90, que aprovou o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). O objetivo primordial desse regulamento consistia em introduzir aspetos térmicos e energéticos nos projetos, visando melhorar as condições de conforto no interior dos edifícios sem implicar num incremento desmedido do consumo energético. O RCCTE estabeleceu requisitos mínimos para a envolvente dos edifícios e, apesar da sua primeira versão apresentar um nível de exigência pouco acentuado, incentivou o uso sistemático de isolamento térmico na construção. Além disso, merece destaque por ser o primeiro regulamento europeu a contemplar o conforto no período estival [42].

Posteriormente, em 1998, foi promulgado o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE). Este regulamento estipulou limites e restrições para a instalação e utilização de equipamentos e sistemas de climatização, objetivando garantir o conforto térmico dos edifícios, assegurando, simultaneamente, a eficiência energética e a preservação do meio ambiente [43].

2.4.2. Diretiva do Desempenho Energético de Edifícios

Apesar dos avanços proporcionados pelos regulamentos supracitados, os edifícios continuavam a não dispor de sistemas eficientes de aquecimento e arrefecimento. Essa ausência mantinha os consumos energéticos relativamente baixos, mas resultava em níveis de conforto térmico insuficientes para os ocupantes. Essa situação gerou uma crescente preocupação não apenas com o bem-estar dos utilizadores, mas também com a necessidade de melhorar a eficiência energética dos edifícios de forma sustentável. Em resposta a essa problemática, em 2002, a Comissão Europeia instituiu a Diretiva 2002/91/CE, também designada como Diretiva do Desempenho Energético de Edifícios (EPBD). Aprovada em 16 de dezembro de 2002, procurava aprimorar a eficiência energética dos edifícios, promovendo a integração de sistemas de climatização eficientes e reduzindo o consumo de energia no setor da construção [2].

A Diretiva EPBD estabeleceu uma metodologia de cálculo da eficiência energética dos edifícios, definindo requisitos mínimos a serem cumpridos, implementando, inclusive, a certificação energética dos edifícios por meio da emissão de certificados de desempenho energético e qualidade do ar interior, em diversas situações de transação e remodelação.

Em 2006, Portugal procedeu à transposição da Diretiva EPBD através do Decreto-Lei n.º 78/2006, instituindo o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios. Este sistema, responsável pela aplicação dos regulamentos térmicos, fornece informações aos consumidores sobre a qualidade térmica dos edifícios, mediante a emissão de certificados. Desde então, a aplicação do certificado de desempenho energético tornou-se obrigatória para todos os edifícios com licenciamento solicitado após essa data [44].

Em 2010, a Diretiva EPBD passou por uma revisão com o intuito de estabelecer requisitos mais rigorosos de desempenho energético para edifícios novos e sujeitos a reabilitação,

prevendo, inclusive, a meta de que todos os novos edifícios públicos deveriam ser edifícios com necessidades energéticas quase nulas (nZEB) até o ano de 2018, bem como todos os edifícios novos deveriam atingir esse mesmo patamar até 2020 [3].

Em 30 de novembro de 2013, o Decreto-Lei n.º 118/2013 foi implementado em Portugal, promovendo uma revisão do SCE e unificando os regulamentos térmicos ao criar o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). Esses novos regulamentos introduziram requisitos mais rigorosos para edifícios novos e sujeitos a reabilitação, assim como estabeleceram metas específicas para edifícios públicos e edifícios comerciais, com o objetivo de promover maior eficiência energética e conforto térmico.

No âmbito da Diretiva 2018/844/UE EPBD, houve uma atualização importante em relação à EPBD anterior (Diretiva 2010/31/UE). Esta revisão teve como objetivo estabelecer metas mais ambiciosas para a eficiência energética dos edifícios, incentivando a adoção de tecnologias avançadas e práticas de construção sustentáveis. A Diretiva 2018/844/UE também destacou a importância da digitalização no setor da construção, com a criação de sistemas de monitorização e controlo de edifícios, bem como o uso de tecnologias inteligentes para otimizar o consumo de energia [4].

Isso ocorre porque cerca de 40% da energia final consumida na União Europeia é destinada ao aquecimento e arrefecimento de edifícios, tendo um impacto significativo no ambiente. A Diretiva tem como objetivo alterar este paradigma e mitigar os impactes ambientais associados à indústria da construção. Para alcançar a eficiência energética desejada, a Diretiva enfatiza novamente a promoção de edifícios com necessidades energéticas quase nulas, os nZEB [4].

Neste contexto, enquadra-se implicitamente a construção vernácula e os seus princípios orientadores. A arquitetura vernácula frequentemente faz uso de materiais locais e sustentáveis, adota estratégias de conceção passiva e incorpora técnicas de construção sensíveis ao clima. Esses elementos contribuem intrinsecamente para a eficiência energética dos edifícios. O ênfase no conceito de edifícios nZEB alinha-se com a abordagem vernácula de otimização do desempenho do edifício dentro do contexto local, resultando na minimização do consumo de energia.

Como mencionado anteriormente, a UE tem estabelecido metas para reduzir o consumo de energia, o uso de matérias-primas e o excesso de produção de resíduos. A arquitetura vernácula oferece uma resposta eficaz a essas necessidades, utilizando princípios das tecnologias solares passivas, técnicas tradicionais e materiais locais. Além disso, as soluções arquitetónicas são adaptadas de forma específica para cada caso, considerando as características do território e do clima.

2.4.3. Metodologia SCE

A 7 de dezembro de 2020, foi promulgado o Decreto-Lei n.º 101-D/2020, o qual veio introduzir modificações ao Decreto-Lei n.º 118/2013 [45]. Este Decreto-Lei surge como resposta à necessidade de implementar medidas mais rigorosas para melhorar a eficiência energética dos edifícios, alinhando-se com as metas estabelecidas pela União Europeia para a redução do consumo de energia e das emissões de gases com efeito de estufa. O principal objetivo consistiu em impulsionar a transição para edifícios com necessidades energéticas quase nulas, os nZEB, sendo que a União Europeia promove atualmente a evolução para edifícios de energia positiva (PEB), que têm a capacidade de produzir mais energia do que aquela que consomem, incentivando o uso de fontes de energia renováveis e a adoção de soluções construtivas mais sustentáveis.

Os pontos 4 e 5 do artigo 4.º do Decreto-Lei n.º 101-D/2020 estabelecem que a avaliação do desempenho energético dos edifícios deve ser realizada por meio da metodologia de cálculo presente no Manual SCE [5].

O Decreto-Lei n.º 101-D/2020 constitui-se como uma legislação abrangente que define os requisitos aplicáveis à melhoria do desempenho energético dos edifícios, particularmente no que se refere aos edifícios novos, como contemplado no Artigo 6.º. Neste contexto, o ponto 9 do referido Artigo proporciona a possibilidade de estabelecer requisitos com base no conforto térmico ou no desempenho energético, permitindo, assim, uma abordagem mais flexível na busca pela eficiência energética e conforto dos ocupantes.

Outra legislação relevante foi o Decreto-Lei n.º 102/2021, publicado em agosto de 2021, que veio introduzir ajustes ao Decreto-Lei n.º 101-D/2020, no que diz respeito aos requisitos de desempenho energético e às metodologias de cálculo. Este decreto-lei teve como objetivo alinhar a legislação portuguesa com as diretrizes europeias mais recentes em matéria de eficiência energética e sustentabilidade na construção civil [46].

Além disso, várias portarias e despachos complementares foram emitidos ao longo do tempo para corrigir ou melhorar aspetos específicos da regulamentação térmica. Estas regulamentações adicionais, como a Portaria n.º 138-G/2021, a Portaria n.º 138-H/2021 e a Portaria n.º 138-I/2021, entre outras, visaram ajustar e detalhar os requisitos e procedimentos relacionados com a certificação energética, sistemas de climatização, renovação de ar e outras questões relevantes para o desempenho energético dos edifícios [47-49].

A Portaria n.º 138-I/2021, datada de 1 de julho, configura-se como uma regulamentação que estabelece os requisitos mínimos relativos ao desempenho energético relacionados com a envolvente dos edifícios (Tabela 2.2) e os sistemas técnicos, com a aplicação apropriada de acordo com o tipo de utilização e as respetivas características técnicas. Esses requisitos são minuciosamente descritos nos anexos I e II dessa mesma Portaria.

Tabela 2.2 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos dos elementos da envolvente opaca dos edifícios de habitação — Portugal Continental [8].

Portugal Continental		Zona Climática			
Tipo de Elemento		Condição fronteira	I1	I2	I3
Zona corrente da envolvente	Verticais	Exterior ou interior com $bztu > 0,7$	0,50	0,40	0,35
		Interior com $bztu \leq 0,7$	2,00	2,00	1,90
	Horizontais	Exterior ou interior com $bztu > 0,7$	0,40	0,35	0,30
		Interior com $bztu \leq 0,7$	1,65	1,30	1,20
Zona de PTP	Verticais	Exterior	0,90		
		Interior com $bztu > 0,7$	1,75	1,60	1,45
		Interior com $bztu \leq 0,7$	2,00	2,00	1,90
	Horizontais	Exterior	0,90		
		Interior com $bztu > 0,7$	1,25	1,00	0,90
		Interior com $bztu \leq 0,7$	1,65	1,30	1,20

No contexto desta Tabela, o parâmetro $bztu$, representa o coeficiente de redução de perdas de um determinado espaço não útil ou edifício adjacente. Este coeficiente é utilizado para avaliar a influência de espaços adjacentes não aquecidos ou edifícios contíguos na transmissão térmica através da envolvente opaca.

Dentro deste documento, são também mencionadas exceções aos requisitos mínimos da envolvente dos edifícios. No Anexo I da Portaria n.º 138-I/2021, ponto 1.2, alíneas b) e c), são apresentadas as isenções aplicáveis aos edifícios de habitação [49].

Na alínea b), é referido que os edifícios de habitação se encontram isentos do cumprimento dos requisitos relativos aos coeficientes de transmissão térmica superficiais da zona corrente da envolvente opaca, referidos na alínea a) do mesmo ponto, caso cumpram o conforto térmico, assegurado por um Perito Qualificado.

A alínea c), refere ainda que, para soluções de paredes de taipa ou similares, os elementos da envolvente corrente opaca devem apresentar um coeficiente de transmissão térmica superficial igual ou inferior a $1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Esta exceção é justificada pela elevada inércia térmica e higroscopicidade das paredes de taipa, características que contribuem significativamente para o conforto térmico no interior dos edifícios. A inércia térmica permite que as paredes armazenem calor durante o dia e o libertem durante a noite, estabilizando as variações de temperatura. A higroscopicidade contribui para a regulação da humidade relativa interior, absorvendo e libertando vapor de água conforme necessário.

Considerando os coeficientes de transmissão térmica indicados no ITE54, as paredes exteriores de taipa necessitam de apresentar uma espessura mínima de 60 centímetros para cumprir os requisitos mínimos regulamentares [13]. Contudo, esta espessura muitas vezes não se justifica em edifícios térreos. Considera-se que, apesar de a regulamentação ter demonstrado

certa flexibilidade na sua revisão mais recente ao abordar estes aspetos, ainda não está totalmente adaptada a este tipo de construção, negligenciando o significativo efeito da inércia térmica.

2.4.4. Quantificação de Consumos e Necessidades de Energia

A quantificação de consumos e necessidades de energia em edifícios de habitação é regida pelo SCE.

A metodologia para a quantificação de consumos e necessidades de energia baseia-se na análise de diversos parâmetros, considerando características específicas do edifício, tais como geometria, orientação, materiais de construção, sistemas de climatização e ventilação, entre outros. O processo é guiado pelo Manual SCE, que fornece orientações detalhadas sobre os métodos de cálculo e os critérios a serem seguidos [8].

A avaliação do Desempenho Energético do edifício assenta na determinação dos balanços de energia primária dos edifícios previsto e de referência e consiste na determinação das necessidades nominais de energia para aquecimento, arrefecimento, água quente sanitária e ventilação mecânica. Atualmente, o cálculo dessas necessidades em edifícios de habitação é realizado com recurso a software específico apenas para os sistemas de energia solar térmica e fotovoltaico. Para os restantes sistemas, é comum a utilização de uma folha de cálculo em Excel, desenvolvida pelo ITECONS [50], amplamente utilizada pelos peritos, embora a sua utilização não seja obrigatória. Este processo considera padrões de referência e coeficientes de transmissão térmica para os diferentes elementos construtivos.

A classificação final do edifício é expressa através de uma escala de eficiência energética, que vai de A+ (muito eficiente) a F (pouco eficiente) e determinada em função do rácio de classe energética, que resulta da relação entre as necessidades nominais de energia primária previstas e de referência. A cada classe energética corresponde um intervalo de valores do rácio de classe energética [8].

O foco da abordagem dos regulamentos nacionais para o conforto térmico dos edifícios concentra-se no aumento da resistência térmica das envolventes como método preferencial para reduzir as necessidades energéticas. Contudo, esses regulamentos muitas vezes simplificam a complexidade dinâmica das transferências de calor nas envolventes dos edifícios, especificando requisitos rígidos para valores de resistências térmicas e coeficientes de transmissão térmica. Esses parâmetros, embora sejam indicadores relevantes, não captam totalmente o comportamento dinâmico dessas transferências de calor [11].

Os métodos de quantificação do conforto térmico como o PMV, PPD e o conforto adaptativo com inclusão de perfis de utilização dos edifícios, bem como a análise através da simulação dinâmica, ferramenta utilizada nesta dissertação, estão ausentes na legislação nacional relativa aos edifícios de habitação, pelo que se considera que esta lacuna destaca a necessidade urgente de incorporar esses avanços nos futuros desenvolvimentos da regulamentação, a fim de assegurar uma abordagem mais abrangente e atualizada para garantir o conforto térmico nos edifícios habitacionais em Portugal. Enquanto os métodos simplificados oferecem uma visão

estática e simplificada do comportamento térmico, as simulações dinâmicas permitem modelar o edifício ao longo do tempo, considerando diversas variáveis que podem afetar o conforto térmico.

2.4.5. Normas e Regulamentos sobre Construção em Terra

A construção com terra em Portugal carece de regulamentação, tendo sido apenas abordada de forma recomendatória no documento "O Uso da Terra como Material de Construção" elaborado pelo LNEC em 1953, da autoria de Ruy Gomes e José Folque [51].

Mais recentemente, em 2014, o Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, o ISISE (*Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering*) e o C-TAC (*Centre of Territory Environment and Construction*) juntos publicaram um manual de boas práticas para a construção de habitações sustentáveis [52]. Este manual, que oferece soluções simples e económicas para a construção de habitações em terra tem como objetivo desenvolver tecnologias inovadoras para a autoconstrução sustentável de pequenos edifícios, especialmente em países em desenvolvimento, inclusive aqueles suscetíveis a riscos sísmicos. Abrangendo temas como a seleção do solo, produção de blocos de terra crua, construção de fundações, paredes e coberturas.

Contudo, alguns países têm normas e diretrizes específicas para esse tipo de construção. Destacam-se a Alemanha, Austrália, Estados Unidos da América, Peru e a Nova Zelândia como exemplos com regulamentações mais abrangentes. A Alemanha, por exemplo, introduziu a DIN18951 em 1951, que, no entanto, caiu em desuso em 1971 [52]. Só em 1999, foi substituído pelas regras para construção em terra, que são os primeiros regulamentos neste âmbito a serem publicados na União Europeia. Abrange várias diretrizes e normas, as DIN 18942 e DIN 18945 a DIN 18948. A primeira é relativa a materiais e produtos de terra, as seguintes são normas que definem requisitos, métodos de ensaio e certificação sobre blocos de terra (DIN 18945), argamassas de terra para alvenaria (DIN 18946), rebocos de terra (DIN 18947) e revestimentos de placas em terra crua (DIN 18948). Todos estes documentos tiveram as respetivas atualizações, sendo a mais recente de 2024 [53-57].

A Austrália destaca-se por dois documentos de grande importância: o Boletim 5 da CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research*) e o *Australian Earth Building Handbook*. O Boletim 5 aborda os requisitos e capacidades dos métodos de construção de paredes de taipa, adobe e BTC (blocos de terra prensada), adaptados às condições específicas da Austrália. Este documento fornece orientações essenciais para a construção de paredes de terra, considerando as particularidades do território australiano. O *Australian Earth Building Handbook*, embora não seja uma norma em si, estabelece princípios de boas práticas e diretrizes recomendadas para projetos de edifícios com cargas leves. Este manual concentra-se, principalmente, em estruturas de um ou dois pisos, com paredes e pavimentos de terra não cozida [58, 59].

Nos Estados Unidos da América, o estado do Novo México possui o *New Mexico Earthen Building Materials Code*, que trata as técnicas de taipa, alvenarias de adobe e BTC para

edifícios de até dois pisos, estipulando requisitos mínimos para construção com terra. No âmbito nacional, a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) introduziu posteriormente a regulamentação ASTM E2392/E2392M-23, um guia para a concepção de sistemas de construção com paredes de terra [60, 61].

Já a Nova Zelândia apresenta as normas mais completas sobre a construção em terra, nomeadamente em taipa, as Normas NZS 4297 a 4299, publicadas em 1998 e substituídas pelas versões atualizadas de 2020, fornecem diretrizes essenciais que integram a concepção de edifícios em terra, materiais e mão de obra para edifícios de terra e edifícios de terra que não exigem concepção [62-64].

Diversos países, incluindo o Brasil com a norma NBR 17014 para taipa de pilão, e a Espanha com o documento "*Bases para el Diseño y Construcción con Tapial*" do Ministério de Obras Públicas e Transportes, têm normas e princípios de boas práticas para construção. Além disso, a Índia, Peru, Zimbábue e a ARSO (*African Organization for Standardization*) representando 37 países africanos, também estabelecem regulamentos e padrões para orientar a construção de forma consistente e segura [65-67].

Considerando a experiência de outros países, Portugal poderia seguir essa trajetória, estabelecendo a sua própria regulamentação para a construção contemporânea em terra. Este processo envolveria a definição de diretrizes, normas de requisitos e procedimentos, métodos de ensaio e certificações específicas para a construção com terra, alinhadas com as características climáticas e geológicas do país. Tal iniciativa não só preservaria o património vernáculo, mas também promoveria a sustentabilidade e a inovação na construção civil em Portugal.

3.1. Considerações Iniciais

Na presente dissertação, foi realizado um estudo sobre o impacto das estratégias bioclimáticas associadas à construção vernácula, com ênfase particular no efeito da inércia térmica de edifícios em taipa, com recurso a um modelo de simulação dinâmica de edifícios. Para conduzir esta investigação, foi utilizado um edifício unifamiliar isolado. Este edifício foi analisado em duas localizações diferentes, ambas caracterizadas pela presença predominante de construções em taipa.

A metodologia adotada para analisar o caso de estudo envolveu a modelação através do método clássico de coordenadas do *EnergyPlus*, um programa de simulação dinâmica térmica e energética. O objetivo principal desta dissertação é realizar uma análise comparativa do comportamento térmico do edifício em duas localizações diferentes, considerando diferentes soluções construtivas: uma em taipa e outra utilizando um sistema convencional de alvenaria de pano simples à base tijolo cerâmico furado com isolamento térmico pelo exterior, ETICS (*External Thermal Insulation Composite System*). Dado tratar-se de uma análise comparativa, o modelo não foi validado devido à ausência de dados provenientes de medições in-situ, impossibilitando assim a sua calibração.

Numa primeira fase, a modelação focou-se na espessura das paredes para garantir a conformidade com as regulamentações. Posteriormente, nas análises subsequentes, essa espessura foi reduzida e incorporado sombreamento, ventilação natural e bomba de calor para climatização.

Na segunda fase, o objetivo foi avaliar e comparar o desempenho térmico e energético do edifício em estudo, considerando as duas soluções construtivas nas duas zonas climáticas. A avaliação e comparação iniciam-se pela caracterização das condições exteriores de temperatura e humidade relativa, seguida da análise do comportamento das soluções construtivas e bioclimáticas face a essas condições. Foi examinado o impacto da temperatura exterior nas condições térmicas internas ao longo do ano e no dia de pico de calor, bem como a inércia térmica. Também se realizou uma análise detalhada da humidade relativa interior. Posterior-

mente, foi estudado o impacto dos ganhos e perdas de energia pelas envolventes opacas, culminando na avaliação dos balanços de energia anuais e durante as estações de aquecimento e arrefecimento.

3.2. Contexto Climático

3.2.1. Dados Climáticos

Para entender a arquitetura vernácula em Portugal, que essencialmente procura mitigar os efeitos do clima a partir das suas estratégias maioritariamente passivas, é de grande importância entender como se caracteriza esse clima.

Portugal está situado na região de transição entre a zona do anticiclone tropical e a zona de depressão subpolar, localizadas nas latitudes 37°N e 42°N, respetivamente [15].

Além da latitude, os dois fatores que mais influenciam o clima do território continental são a orografia e a influência do oceano Atlântico. É do Atlântico que vêm as massas de ar carregadas de humidade, que precipitam quando atravessam as zonas de maior altitude. Assim, compreender a topografia do país é essencial para entender o seu clima.

No continente, predominam as áreas de baixa altitude, com 71,4% do país abaixo dos 400 m, sendo que apenas 11,6% se encontra acima dos 700m. O rio Tejo, que separa o Norte do Sul do país, é revelador dos contrastes do relevo nacional, que aparece assim dividido em duas regiões de relevo e clima, de certo modo opostos. O Sul possui 61,5% das terras baixas caracterizado pelas grandes planícies. O Norte, por oposição apresenta 95,4% das áreas superiores a 400 metros de altitude [28].

Durante o verão, as temperaturas são elevadas, as chuvas escassas, a exposição solar é elevada e a luminosidade intensa. Apesar do clima de Portugal ser incontestavelmente mediterrâneo, o oceano é o seu grande regulador. A influência do oceano Atlântico aumenta a humidade na orla costeira de Portugal, mantendo as temperaturas mais moderadas nesta área. No entanto, a precipitação nos meses de julho e agosto é limitada em todo o país. O início do outono é marcado por trovoadas e aguaceiros breves, mas intensos. No norte do país, essas chuvas podem persistir por várias semanas, enquanto no sul, nas planícies ainda quentes, ocorrem chuvas rápidas. Após esse período inicial de chuvas, surge o chamado "Verão de São Martinho," que se pode estender até ao início de novembro. O inverno é a estação do frio e da chuva, com noites cada vez mais longas que reduzem a temperatura média diária. As massas de ar alternam entre a ligação ao anticiclone dos Açores e ao da Europa Central, resultando em dias ensolarados e secos, mas com a presença de ventos frio [28].

O outono, inverno e primavera experimentam esse clima instável e variável, com dezembro geralmente sendo o mês mais chuvoso, embora em muitos casos março apresente um máximo secundário em termos da precipitação. A geografia do país é dividida novamente em duas áreas distintas, uma região húmida a norte, com chuvas frequentes e verões moderados, e outra mais seca, com chuvas escassas e verões quentes, secos e prolongados [28].

Ao longo da história, a civilização entendeu que os efeitos do clima e o uso da energia solar poderia ter um impacto positivo no desempenho térmico das construções, aumentando as temperaturas internas durante o inverno e reduzindo o aquecimento interno no verão [6].

Em regiões onde a estação mais crítica é a de arrefecimento, é comum encontrar um traçado urbano característico. Um exemplo disso é o interior sul de Portugal, onde se procura minimizar os ganhos de calor solar e facilitar o arrefecimento durante o verão.

A região sul de Portugal, que é a estudada nesta dissertação, é conhecida pelo clima mediterrâneo caracterizado pelos verões quentes e secos. Durante esta estação, as temperaturas atingem níveis elevados, com máximas geralmente variando entre 30°C e 35°C, podendo ocasionalmente atingir picos de 40°C a 45°C. A duração do verão é a mais condicionantes, com cerca de 110 dias por ano a apresentar temperaturas superiores a 25°C [68].

3.2.2. Localização

A seleção da localização do edifício exerce uma influência significativa no seu desempenho energético, uma vez que a severidade do clima, seja no Inverno ou no Verão, condiciona as exigências energéticas necessárias para o aquecimento e arrefecimento das edificações [69].

O sistema de Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de nível III proporciona uma divisão territorial em entidades intermunicipais e regiões autónomas, estabelecendo zonas climáticas para o país, como delineado no Manual SCE. Este sistema classifica o país em três zonas climáticas de inverno (I1, I2 e I3) e três zonas climáticas de verão (V1, V2 e V3), ordenadas de menos severa para mais severa [8].

Os GD (graus-dias), usados para caracterizar a severidade do inverno numa localidade específica, representam a diferença entre a temperatura base de 18°C e a temperatura exterior inferior a esta ao longo do ano. A determinação da zona climática de inverno varia conforme os graus-dias do local, estabelecendo-se na Tabela 3.1 os intervalos correspondentes.

Tabela 3.1 - Critérios para a determinação da zona climática de inverno [8].

Critério	$GD \leq 1300^{\circ}\text{C}$	$1300^{\circ}\text{C} < GD \leq 1800^{\circ}\text{C}$	$GD > 1800^{\circ}\text{C}$
Zona climática de inverno	I1	I2	I3

A determinação da zona climática durante a estação de arrefecimento, baseia-se na temperatura exterior média dia-noite ao longo de toda a estação de arrefecimento. Este cálculo é realizado através da análise dos parâmetros especificados no Despacho n.º 6476-H/2021, que aprovou o Manual SCE [8]. A definição dos intervalos para a zona climática de verão é apresentada na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Critérios para a determinação da zona climática de verão [8].

Critério	$\theta(\text{ext},v) \leq 20^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C} < \theta(\text{ext},v) \leq 22^{\circ}\text{C}$	$\theta(\text{ext},v) > 22^{\circ}\text{C}$
Zona climática de verão	V1	V2	V3

Ao sobrepor no mapa de Portugal Continental as áreas onde a construção em taipa é prevalente com os zonamentos climáticos e os respetivos critérios de determinação, foi possível obter a Tabela 3.3:

Tabela 3.3 - Valores dos critérios de determinação das zona climáticas.

NUTS III	GD	Zona climático de inverno	$\theta(\text{ext,v})$	Zona climática de verão
Alentejo Central	1150	I1	24,3°C	V3
Alentejo Litoral	1089	I1	22,2°C	V3
Algarve	987	I1	23,1°C	V3
Alto Alentejo	1221	I1	24,5°C	V3
Baixo Alentejo	1068	I1	24,7°C	V3
Lezíria do Tejo	1135	I1	23,1°C	V3
Médio Tejo	1130	I1	22,1°C	V3

Embora seja possível notar que as regiões onde a construção em taipa é preponderante coincidem em grande parte com zonas climáticas classificadas como I1, V3, optou-se por avaliar duas regiões que apresentam algumas diferenças climáticas, nomeadamente Évora, localizada na região NUTS III do Alentejo Central, e a cidade de Faro, no Algarve.

A seleção destas duas localizações é justificada pela posição de Évora no interior do Alentejo, escapando à mesma influência do oceano Atlântico que afeta Faro. Esta influência aumenta a humidade na orla costeira de Portugal, resultando em temperaturas mais moderadas.

Faro é influenciada pelo clima mediterrâneo, caracterizado por verões quentes e secos e invernos suaves e moderadamente chuvosos. E Évora, localizada no interior do Alentejo, também experimenta um clima mediterrâneo, mas com amplitude térmica superior, isto é, com variações mais significativas entre as temperaturas diurnas e noturnas devido à sua posição mais continental.

Essa distinção é evidenciada pelos dados que definem as zonas climáticas, sendo que Évora regista 163 graus-dias a mais do que Faro e apresenta uma temperatura exterior média no verão 1,1°C superior à capital algarvia.

3.3. Modelação Geométrica e Caracterização do Edifício

3.3.1. Arquitetura

O edifício é composto por um único piso, caracterizando-se por um pé-direito de 3,30 metros. Esta residência inclui um hall de entrada, dois quartos, uma cozinha com despensa, a sala (a maior divisão do edifício) e uma casa de banho. O hall de entrada, orientado a Oeste, atua como espaço de distribuição entre as várias divisões da casa. A porta, lateralmente flanqueada por envidraçados, destaca-se em relação à fachada principal, com duas janelas nas paredes adjacentes.

Este hall estabelece comunicação com a cozinha a Norte, com a sala a Este e com os dois quartos a Sul e a casa de banho a Oeste. A cozinha, voltada para Norte e Oeste, possui uma pequena despensa e, no extremo oposto a este, uma porta que conduz ao espaço posterior do edifício. A sala está dividida em duas áreas. Uma orientada a Nordeste com uma porta de correr a Este e outra voltada a Sudeste, também com uma porta de correr a Este e uma janela fixa a Sul.

Os dois quartos têm orientação a Sul, sendo que um deles, de dimensões mais reduzidas, está situado entre a sala e o outro quarto, este último designado como o quarto principal do edifício, enquanto a casa de banho possui um pequeno vão voltado a Oeste.

É ainda importante referir que o edifício em análise é isolado, não compartilhando qualquer limite com outras habitações. Esta condição acrescenta particularidades à sua exposição a ventos e à incidência solar, fatores relevantes na avaliação do desempenho e conforto térmico.

De seguida, na Figura 3.1, está apresentada a planta do caso de estudo.

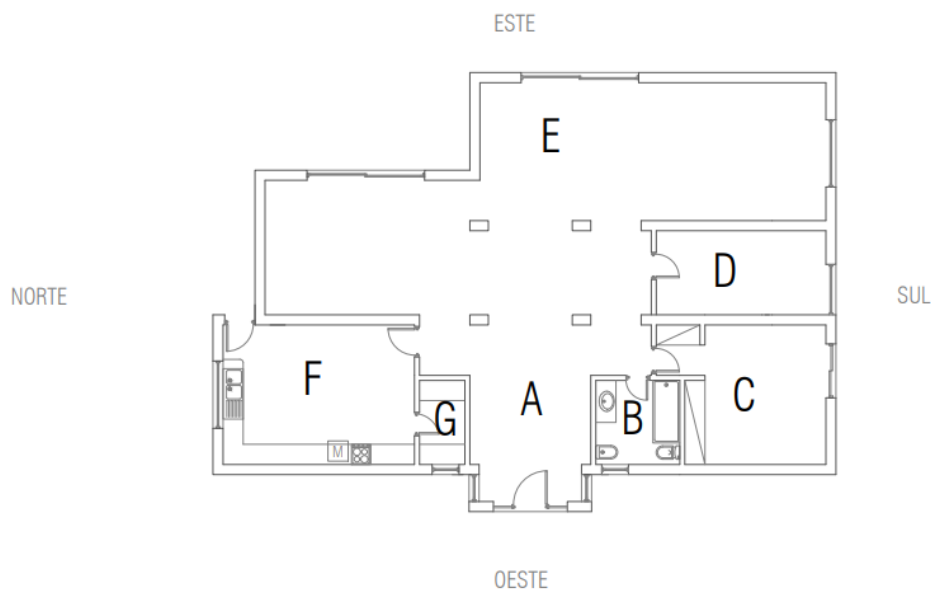


Figura 3.1 - Planta do edifício.

Na Tabela 3.4, encontra-se a legenda de todos os espaços do edifício separados por divisões e com as respetivas áreas úteis.

Tabela 3.4 - Tabela de áreas úteis.

Divisão	Área útil [m ²]	Legenda da planta
Hall de entrada	21,87	A
Quarto de banho	6,36	B
Quarto da suíte – SO	18,65	C
Quarto – SE	12,75	D
Sala	82,05	E
Cozinha	23,79	F
Despensa	3,48	G

3.3.2. Soluções Construtivas

Neste ponto, são delineadas as duas soluções construtivas iniciais das envolventes opacas e translúcidas a serem comparadas, a taipa e a estrutura de betão armado com alvenaria de tijolo furado e isolamento térmico pelo exterior. As duas habitações divergem apenas quanto à solução construtiva na envolvente opaca vertical, enquanto as escolhas para as envolventes opacas horizontais permanecem iguais, assim como para a envolvente translúcida.

O objetivo primordial desta dissertação consiste em compreender o impacto que elementos de elevada inércia térmica, no presente caso, as paredes exteriores em taipa, podem exercer sobre o desempenho térmico e energético das habitações. Pretende-se também comparar esses resultados com os requisitos estabelecidos pela legislação portuguesa atual, sendo que a estação de aquecimento apresenta exigências de requisitos ao nível do coeficiente de transmissão térmica (U expresso em $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$) e a estação de arrefecimento apresenta exigências de requisitos ao nível do fator solar dos vãos envidraçados (g expresso em valor adimensional). Os coeficientes de transmissão térmica utilizados foram extraídos dos documentos do LNEC, nomeadamente do ITE 50 e ITE 54 [9, 13].

De seguida, são detalhados de forma mais abrangente os distintos elementos construtivos e as suas soluções específicas.

3.3.3. Elementos Verticais

Como referido anteriormente, o objetivo do presente trabalho é avaliar o impacto de estratégias bioclimáticas como é exemplo o efeito da inércia térmica das paredes exteriores em taipa. Nesse sentido, essa solução construtiva é comparada a uma abordagem convencional, caracterizada por uma parede simples de fachada com isolamento térmico pelo exterior.

Fazendo uso da exceção regulamentar prevista na alínea c) do Anexo I da Portaria n.º 138-I/2021, mencionada anteriormente, será utilizada como ponto de comparação uma parede

de taipa com espessura mínima de 60 cm, suficiente para cumprir o coeficiente de transmissão térmica de $1,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Essa comparação será realizada com uma solução convencional que incorpora uma estrutura em betão armado e paredes de alvenaria simples de tijolo furado, dotada do sistema de isolamento térmico exterior (ETICS) que atende aos requisitos mínimos estipulados na Portaria nº 138-I/2021 [49]. Ambas as soluções são ainda revestidas por reboco exterior e interior, sendo importante referir que, apesar de terem valores iguais nas características físicas que compõem o estudo térmico, são diferentes na sua composição. Isto deve-se ao facto de o reboco utilizado na taipa não dever conter ligantes que inibam a capacidade higroscópica da taipa, ou seja, a sua aptidão para permutar vapor de água com o ambiente e regular a humidade interna.

Esses requisitos estipulados na Portaria supracitada, referem-se ao cumprimento dos coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos para os elementos da envolvente opaca em edifícios de habitação. Para as zonas climáticas II e V3 em Portugal Continental, esses valores são estabelecidos em $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ para os elementos verticais da zona corrente da envolvente e $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ na zona de pontes térmicas planas.

O cálculo das resistências térmicas totais das soluções construtivas foi realizado com base nos métodos explicados no capítulo 2.1.. Procurou-se alcançar valores aproximados dos requisitos mínimos estabelecidos para os coeficientes de transmissão térmica, de acordo com a regulamentação vigente. Os valores de condutibilidade térmica e resistências térmicas dos materiais foram retirados do ITE 50 [9]. Embora a espessura mínima regulamentar para paredes de tijolo seja superior a 15 cm, a utilização de uma espessura de 15 cm nesta dissertação justifica-se pela necessidade de realizar uma análise comparativa direta com as paredes de taipa, explorando o desempenho térmico.

De seguida na Tabela 3.5 estão apresentados do exterior para o interior, os elementos das soluções construtivas da envolvente opaca vertical das duas habitações, com os respetivos valores de espessura, condutibilidade térmica, massa específica e calor específico calculados de forma a garantir conformidade com os regulamentos supracitados.

Tabela 3.5 - Características térmicas dos materiais de construção da envolvente opaca vertical.

Solução	Elemento	Material	e - espessura [m]	λ - condutibilidade térmica [W/(m.°C)]	R - resistências térmicas [(m ² .°C)/W]	Rt - resistência térmica total [(m ² .°C)/W]	U - coeficiente de transmissão térmica [W/(m ² .°C)]
Solução convencional	Zona corrente	Reboco	0,025	1,300	0,019	2,018	0,495
		XPS	0,050	0,040	1,250		
		Tijolo furado	0,150		0,560		
		Reboco	0,025	1,300	0,019		
	Zona ponte térmica	Reboco	0,025	1,300	0,019	1,308	0,764
		XPS	0,040	0,040	1,000		
		Betão armado	0,200	2,000	0,100		
		Reboco	0,025	1,300	0,019		
Solução vernacular regulamentar	Zona corrente	Reboco	0,025	1,300	0,019	1,208	0,827
		Taipa	0,600	0,600	1,000		
		Reboco	0,025	1,300	0,019		
Solução vernacular não regulamentar	Zona corrente	Reboco	0,025	1,300	0,019	0,808	1,237
		Taipa	0,360	0,600	0,600		
		Reboco	0,025	1,300	0,019		

Na sequência da Tabela 3.5, apresentam-se os pormenores construtivos destes mesmos elementos, na Figura 3.2a) ilustra a solução construtiva composta pelo sistema de isolamento externo e na Figura 3.2b) a solução em taipa rebocada interior e exteriormente. À esquerda, na Figura 3.2a), a numeração corresponde aos seguintes materiais: (1) alvenaria de tijolo furado, (2) âncora (fixação adicional), (3) adesivo (fixação básica), (4) isolamento térmico XPS, (5) camada de base, (6) malha de fibra de vidro, (7) primário, (8) camada de acabamento. À direita, na Figura 3.2b), a numeração corresponde em (1) à taipa e (2) é o reboco. As camadas de acabamento (8) e reboco (2) estão representadas em cinzento nas figuras, mas foi aplicado sobre ambos um sistema de pintura de cor branca compatível com o reboco utilizado. É importante referir que o reboco utilizado nas paredes de taipa deve permitir a respiração das mesmas, sem as tornar estanques. Assim, o reboco não deve conter materiais cimentícios, uma vez que estes impedem a permeabilidade e a capacidade de regulação da humidade inerente à taipa.

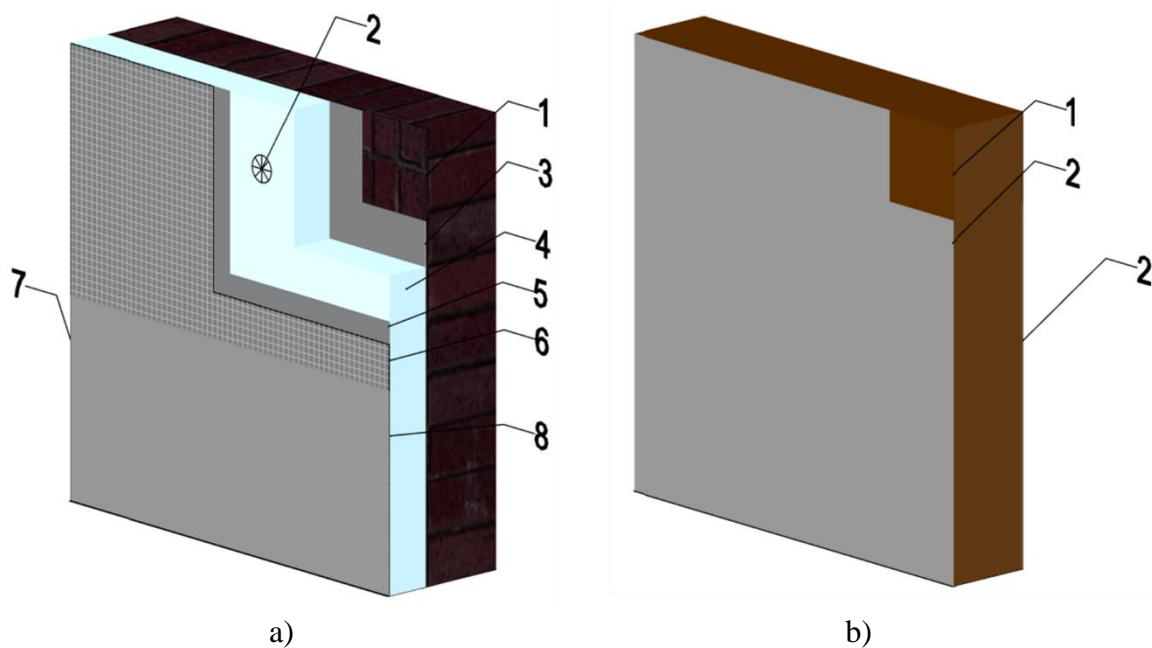


Figura 3.2 - Pormenor das soluções construtivas a) solução convencional; b) taipa.

As paredes interiores na solução de taipa serão também construídas com esse material, porém com uma espessura reduzida de 25 centímetros. Por outro lado, a solução convencional compreenderá uma parede com pano simples de alvenaria de tijolo furado, revestida em ambos os lados com reboco.

3.3.4. Elementos Horizontais

- **Piso Térreo**

Tal como referido anteriormente, os elementos horizontais têm a mesma solução construtiva no edifício com a solução construtiva convencional e na vernácula, sendo em ambos os casos o piso térreo constituído por um ensoleiramento geral em betão armado de 10 centímetros, camada de forma de 3 centímetros e o material de acabamento. Este ensoleiramento geral, camada de forma e revestimento de piso têm as características apresentadas na Tabela 3.6:

Tabela 3.6 - Características térmicas dos materiais de construção da envolvente opaca horizontal.

Solução	Elemento	Material	e - espessura [m]	λ - condutibilidade térmica [W/(m·°C)]	R - resistências térmicas [(m ² ·°C)/W]	R _t - resistência térmica total [(m ² ·°C)/W]	U - coeficiente de transmissão térmica [W/(m ² ·°C)]
Elementos horizontais	Pavimento	Betão	0,200	2,000	0,100	2,229	0,449
		XPS	0,070	0,037	1,892		
		Parquet	0,010	0,150	0,067		
	Cobertura	Painel sandwich	0,055	0,022	2,500	2,670	0,375

- **Cobertura**

Para a solução construtiva da cobertura, procurou-se selecionar uma alternativa compatível com a envolvente vertical em taipa. A solução adotada é a de uma cobertura plana composta por painéis sanduíche, compostos por camadas isolantes entre duas placas exteriores. Esses painéis oferecem um bom isolamento térmico, com um coeficiente de transmissão térmica (U) de aproximadamente $0,375 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, conforme os valores extraídos de um catálogo da ACH do grupo Saint-Gobain [70].

Os painéis sanduíche foram escolhidos devido à sua eficiência térmica e à sua leveza, características que permitem uma integração harmoniosa com a estrutura de taipa. A leveza dos painéis é essencial para evitar sobrecarga na estrutura da taipa, garantindo, assim, a durabilidade e a estabilidade do sistema construtivo.

- **Vãos**

Todas as janelas atendem aos requisitos mínimos estabelecidos pela legislação vigente, nomeadamente os requisitos detalhados na Portaria n.º 138-I/2021, Anexo I, ponto 2.2 alínea a). Essa seção especifica os valores permitidos para os coeficientes de transmissão térmica dos elementos da envolvente envidraçada, bem como os fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados com condição fronteira exterior com ganhos solares, indicados na alínea g) do mesmo ponto [49].

Dessa forma, todos os envidraçados apresentam inicialmente um coeficiente de transmissão térmica de $2,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ e um fator solar de 0,5 para estar em conformidade com os requisitos legais.

3.4. Modelação do Caso de Estudo

A simulação dinâmica no âmbito da eficiência energética de edifícios representa uma ferramenta essencial na análise e otimização do desempenho térmico e energético ao longo do tempo. Este capítulo tem como objetivo apresentar as considerações iniciais pertinentes à modelação do caso de estudo, destacando a importância da simulação dinâmica e justificando a escolha do software EnergyPlus para a condução da análise.

A simulação dinâmica surge como uma ferramenta que possibilita a análise do desempenho térmico e energético de edifícios em diversos cenários. As suas funcionalidades permitem a avaliação do comportamento dos edifícios considerando influências climáticas, padrões de ocupação e operação de sistemas de forma dinâmica. Isto propicia a otimização do projeto e dos seus sistemas, a avaliação da eficácia das estratégias passivas e ativas, bem como o estudo do comportamento do edifício em condições extremas. Essa compreensão aprofundada facilita a tomada de decisões informadas com base em dados detalhados pelo próprio programa de simulação dinâmica, de modo a alcançar patamares mais elevados de eficiência e conforto.

O EnergyPlus destaca-se como uma ferramenta avançada e abrangente para simulações térmicas e energéticas dinâmicas. Desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, o programa é reconhecido pela extensa documentação disponível, precisão e flexibilidade na modelação das envolventes, sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) e outras características essenciais dos edifícios.

Estes atributos fazem do EnergyPlus uma escolha proeminente para a análise energética dinâmica, sendo capaz de atender às respostas pedidas pelo presente caso de estudo, pelo que a decisão de o utilizar fundamenta-se na sua robustez, precisão e capacidade de modelar sistemas complexos. A ampla gama de funcionalidades, aliada à sua validação em diferentes contextos, assegura resultados confiáveis e detalhados.

Os dados são introduzidos no programa, por meio da ferramenta IDF Editor. O processo envolve a introdução de informações essenciais no formato de texto, seguindo a extensão IDF. Esses dados de entrada (*input*) abrangem diversos elementos, como a geometria do edifício, soluções construtivas, características dos materiais, sistemas de aquecimento e arrefecimento, condições exteriores, cargas de equipamentos, iluminação, a natureza da utilização do edifício, entre outros aspetos.

Ao utilizar o IDF Editor, acessível através do EP-Launch, é possível configurar e ajustar os parâmetros da simulação. Essa interface permite a entrada de ficheiros climáticos, disponíveis no sítio do *EnergyPlus*, iniciando assim o processo de análise e obtenção de resultados relacionados aos ganhos e perdas de calor pela envolvente, temperaturas, humidade, necessidades energéticas, entre outros aspetos. Esta ferramenta baseia-se na simulação integrada de vários módulos, como as variáveis de entrada referidas anteriormente, que são simulados em simultâneo. Assim são obtidos valores de saída dependentes das condições interiores e exteriores definidas. A flexibilidade do IDF Editor facilita a personalização dos dados de entrada de acordo com as características específicas do projeto em estudo.

No que diz respeito aos dados de saída (*outputs*) no *EnergyPlus*, o programa gera resultados abrangentes da simulação. Estes resultados são armazenados em ficheiros no formato Excel, apresentando variáveis específicas solicitadas, como temperaturas e humidades. Além do ficheiro Excel, são produzidos outros tipos de *outputs*. O programa cria um ficheiro de erros, fornecendo informações sobre eventuais problemas ou discrepâncias identificadas durante a simulação. Esse ficheiro de erros é uma ferramenta útil para que o utilizador possa diagnosticar e corrigir quaisquer irregularidades no processo de modelação. Adicionalmente, o *EnergyPlus* gera um ficheiro em formato CAD, que fornece a representação gráfica da geometria detalhada do edifício em estudo. Esta saída em formato CAD pode ser valiosa para análises visuais e integração com outras ferramentas de design ou modelação tridimensional.

3.4.1. Dados de Entrada

Sem abordar com grande extensão a introdução dos dados de entrada no IDFEditor, procura-se apresentar de seguida alguns parâmetros importantes que definem a moradia, bem como os modos de habitar da mesma. Tendo sido já descritos o contexto climático da moradia

a estudar, bem como a sua arquitetura, materiais e solução construtiva, fica a faltar a definição dos horários, dos ganhos internos e da instalação de sistema AVAC.

Utilizando as vantagens de uma ferramenta de simulação dinâmica, procurou-se representar de forma simplificada e realista os hábitos diários e padrões típicos de ocupação e uso de energia para uma família composta por dois adultos e uma criança. Esta família habita a moradia ao longo de todo o ano, admitindo variações sazonais e diferenças de ganhos internos entre dias úteis, fins de semana e feriados.

Durante o período de sono, até às oito horas, a taxa metabólica dos habitantes é reduzida, situando-se em aproximadamente 50W por pessoa. Entre a hora de acordar e as nove horas, a atividade metabólica aumenta, tendo-se considerado 100W por habitante, valor que se repete entre as dezassete horas, momento do retorno a casa, e as vinte horas. Nos dias úteis, durante o intervalo entre a saída e o retorno a casa, assume-se um valor de 15W, suficientemente baixo para não representar a permanência de uma pessoa no edifício, mas não nulo, permitindo alguma flexibilidade para a eventual presença de pessoas durante este período. Das vinte horas até à hora de deitar, a atividade foi estimada em 80W. Aos fins de semana, no intervalo das nove às dezassete horas, quando todos permanecem em casa, foi adotado um valor de 80W por habitante.

Relativamente aos equipamentos eletrónicos, assumiu-se um funcionamento contínuo, com uma taxa de 2W por metro quadrado de edifício ao longo de todo o ano.

A iluminação foi definida em função da percentagem do edifício iluminado com 4W por metro quadrado, alinhada com o horário de atividade metabólica dos habitantes, com algumas variações. De 1 de janeiro a 30 de abril e de 1 de outubro a 31 de dezembro, nos dias úteis até às 18h, contabiliza-se apenas 5% da iluminação total, aumentando para 70% até à meia-noite. Aos fins de semana e feriados, a iluminação até às 18h passa para 30%, mantendo-se os valores noturnos inalterados. De 1 de maio a 30 de setembro, a iluminação até às 18h mantém-se igual ao restante calendário, mas a iluminação noturna, tanto durante a semana como ao fim de semana e feriados, passa para 50%.

Em relação à ventilação natural, considerou-se inicialmente meia renovação de ar por hora, mas em simulações subsequentes ajustou-se este valor para avaliar o efeito da ventilação noturna nos meses mais quentes do ano.

3.4.2. Simulações

Explicitadas as condições iniciais dos *inputs* incluídos na primeira simulação, que de agora em diante será denominada simulação R (Regulamentar), é importante detalhar as alterações realizadas de modo iterativo para melhorar as condições interiores do edifício. De simulação em simulação, procurou-se aumentar o número de dias em que a temperatura interna se mantivesse entre 18°C e 25°C a solução construtiva em betão armado, alvenaria de tijolo e isolamento térmico com a solução de ETICS. Todas as alterações realizadas somam-se às das simulações anteriores criando um efeito combinado.

Na simulação seguinte, simulação NR (Não Regulamentar), a única modificação efetuada foi na solução construtiva em taipa, onde a espessura das paredes exteriores foi reduzida de 60 para 36 centímetros, um valor não regulamentar.

Na simulação subsequente, simulação PS (Pala de Sombreamento), procurou-se maximizar o efeito da introdução de proteções solares horizontais com palas que permitam um valor de ganhos solares nas estações de aquecimento grande e que reduzam esses ganhos solares nas estações de arrefecimento, uma vez que a posição do sol relativamente ao horizonte se altera ao longo do ano. Estando mais alto relativamente ao horizonte no solstício de Verão entre 20 e 22 de junho e no ponto mais baixo no solstício de inverno a 21 de dezembro.

Para procurar reduzir os ganhos de calor pela envolvente opaca e translúcida orientada a sul foram introduzidas três palas horizontais sobre as janelas da sala e dos dois quartos. As palas foram dimensionadas com a mesma largura dos vãos das janelas, sendo que a pala da janela da sala tem um comprimento de 40 centímetros, enquanto as palas das janelas dos quartos, por serem de sacada, têm um comprimento de 60 centímetros. Para determinar as dimensões ótimas das palas, utilizou-se a calculadora de sombreamento da Insol que, com base na latitude, orientação da janela, tipo de dispositivo de sombreamento, dimensões das janelas, comprimento das palas e a distância entre estas e as janelas, permite visualizar o grau de sombreamento ao longo do ano [71].

Na Simulação VN (Ventilação Noturna), procurou reduzir-se o efeito dos ganhos térmicos ao longo do dia com a ventilação noturna nos meses de maior calor. Os valores de ventilação noturna entre 1 de junho e 30 de setembro foram alterados de meia renovação horária para uma renovação horária entre as 21 horas e as 10 horas da manhã. Durante o restante período do dia, manteve-se a meia renovação horária por questões de salubridade.

Além das simulações R, NR, PS e VN previamente explicadas, foi introduzido um sistema de ar condicionado em todas as simulações, dando origem a novas simulações. Este sistema de climatização é ativado com base em dois critérios, a presença das pessoas no edifício, seguindo o horário definido anteriormente, e a manutenção do intervalo de temperaturas interiores entre os 18°C e 27°C durante a permanência dos habitantes. Sendo essas simulações designadas como RAC (Regulamentar com Ar Condicionado), NRAC (Não Regulamentar com Ar Condicionado), PSAC (Pala de Sombreamento com Ar Condicionado) e AC (Ar Condicionado). Esta adição permitiu obter um dos *outputs* desejados, que são as necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício.

3.4.3. Dados de Saída

Os dados de saída que se procurou retirar de todas as simulações foram inicialmente a temperatura e humidade exterior, as temperaturas e humidades relativas médias no interior do edifício, os ganhos e perdas de calor por condução pela envolvente, tendo sido mais tarde adicionados os *outputs* das necessidades de aquecimento e de arrefecimento.

A temperatura e humidade relativa exterior são dados cruciais para entender as condições climáticas externas que influenciam o desempenho térmico dos edifícios. Diferentes condições

externas têm impactos significativos nas cargas térmicas e, conseqüentemente, nas necessidades de aquecimento e arrefecimento.

Avaliar variáveis como a humidade relativa e a temperatura média interior é vital para entender como as soluções construtivas utilizadas suportam condições de conforto térmico e qualidade do ar. A comparação destes *outputs* com os parâmetros de conforto recomendados permite aferir a qualidade das soluções construtivas na manutenção das condições internas do edifício adequadas.

Analisar os ganhos e perdas de calor pela envolvente opaca permite entender como as duas soluções construtivas se comportam em termos térmicos.

Por fim, a quantificação das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento permite comparar a eficiência energética das diferentes soluções construtivas nas duas localizações e é essencial para o dimensionamento correto dos sistemas de climatização.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo, utilizando os dados extraídos do *EnergyPlus*, procurou-se avaliar de forma detalhada como cada solução construtiva influencia a moderação das temperaturas interiores em ambas as localizações, considerando a variabilidade das temperaturas exteriores e da humidade relativa. Foram analisadas as diferenças nas humidades relativas médias internas entre as duas soluções construtivas em Évora e Faro, em que se procurou verificar se alguma delas contribui de forma mais eficaz para manter a humidade relativa dentro dos níveis recomendados para conforto e saúde.

Foram avaliadas estratégias bioclimáticas, como o sombreamento com palas horizontais e a ventilação noturna, na redução das cargas térmicas e na melhoria do conforto interno. A análise incluiu também o comportamento térmico da taipa, examinando a alteração da sua espessura para valores não regulamentares. Além disso, comparou-se o atraso e amortecimento térmico de cada solução construtiva, bem como a sua capacidade de armazenar e libertar calor sem depender exclusivamente de sistemas de climatização.

Este estudo abrange a comparação das duas soluções construtivas, que de agora em diante serão abreviadas para ETICS e taipa, sob as diferentes condições climáticas de Évora, de características mais continentais, e Faro, com um clima mais marítimo. Avaliou-se a eficácia do isolamento térmico de cada solução construtiva através da análise dos ganhos e perdas de calor pelas paredes opacas, identificando períodos e situações em que uma solução apresenta vantagens significativas em termos de desempenho térmico em relação à outra.

Foram quantificadas e comparadas as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento de cada solução construtiva nas duas localizações. A simulação regulamentar com ar condicionado (RAC) foi usada para comparar as soluções de ETICS e taipa, assim como a simulação não regulamentar com ar condicionado (NRAC), específica para a taipa. Além disso, foram incluídas simulações com proteção solar (PSAC) e a simulação com efeito combinado das estratégias bioclimáticas com ar condicionado (AC).

Além disso, o estudo faz uma análise crítica à atual regulamentação energética, que não considera perfis de ocupação reais para edifícios de habitação e a simulação dinâmica, resultando em discrepâncias entre os cenários simulados e as condições reais de uso dos edifícios.

A ausência de perfis de ocupação detalhados nas simulações regulamentares pode levar a uma subestimação ou superestimação das necessidades energéticas, comprometendo a precisão das certificações energéticas e a eficácia das intervenções projetadas para melhorar a eficiência energética dos edifícios habitacionais em Portugal.

4.2. Condições Climáticas Exteriores

4.2.1. Temperatura Exterior

Évora e Faro localizam-se no sul de Portugal, embora em regiões com clima mediterrânico temperado, apresentam diferentes comportamentos climáticos que influenciam diretamente o desempenho térmico dos edifícios. Este tipo de clima, como referido acima, no capítulo relativo ao Contexto Climático, é caracterizado por verões quentes e secos, invernos amenos e húmidos, e com a precipitação concentrada nos meses de inverno.

A temperatura exterior é um dos principais fatores que influencia o desempenho térmico dos edifícios. As temperaturas elevadas no verão podem levar ao sobreaquecimento dos espaços interiores, enquanto as temperaturas baixas no inverno resultam em perdas de calor significativas pelas envolventes. O estudo das temperaturas exteriores nestas duas cidades é crucial para compreender as necessidades de aquecimento e arrefecimento nos edifícios habitacionais e para avaliar a eficácia das estratégias bioclimáticas implementadas.

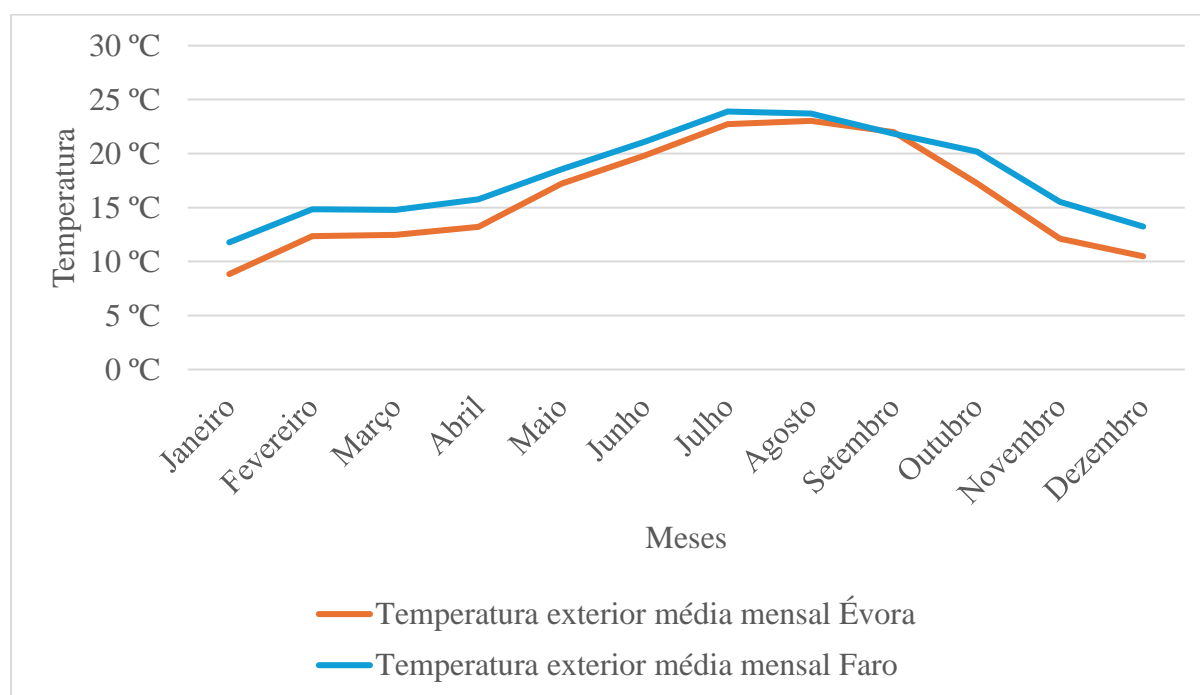


Figura 4.1 - Temperaturas exteriores médias mensais de Évora e Faro.

A análise da Figura 4.1, representativa das temperaturas exteriores médias mensais, que se apresenta de seguida, revela que Évora e Faro seguem um padrão sazonal típico, com temperaturas mais altas nos meses de verão e mais baixas nos meses de inverno. Faro apresenta temperaturas médias mensais superiores a Évora ao longo de todo o ano, com a exceção do mês de setembro, onde Évora apresenta uma média tangencialmente superior.

A análise semanal (Figura 4.2) confirma a tendência observada nos dados mensais, com Faro mantendo temperaturas médias mais altas durante a maior parte do ano. A análise semanal permite identificar períodos específicos onde a temperatura média em Évora pode ocasionalmente exceder a de Faro, mas estas são exceções.

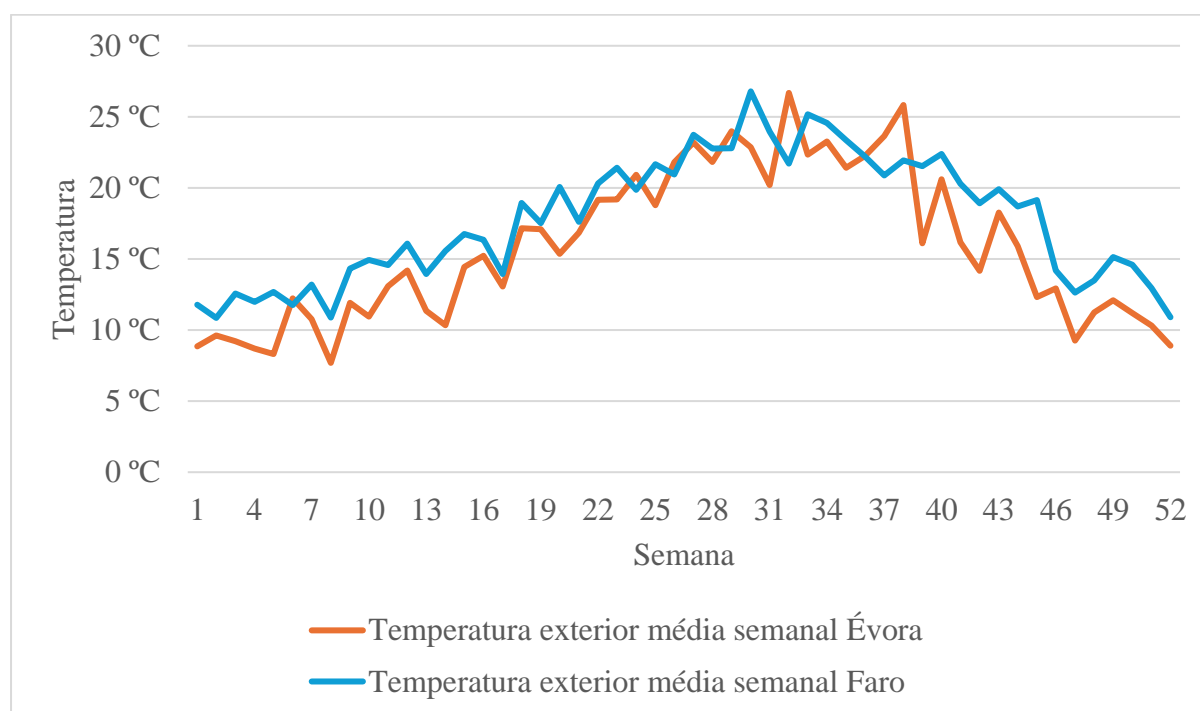


Figura 4.2 - Temperaturas exteriores médias semanais de Évora e Faro.

A análise dos dados de temperaturas médias diárias ao longo do ano revela diferenças significativas entre as cidades de Évora e Faro. Durante o inverno, os valores mínimos em Évora são frequentemente inferiores aos de Faro, como é possível observar na Figura 4.3. A título de exemplo, no dia 31 de janeiro, Évora regista uma temperatura média diária de 4,65°C, enquanto Faro regista 13,51°C. Este padrão reflete-se ao longo do inverno, com Évora a registar temperaturas inferiores de forma regular.

No verão, os máximos em Évora tendem a ser superiores aos de Faro. Em finais de julho e início de agosto, Évora registou picos máximos de temperatura média diária de 30,34°C, enquanto Faro atingiu 27,37°C.

A média anual das temperaturas em Faro é ligeiramente superior à de Évora, o que se reflete na consistência dos valores ao longo do ano. Faro apresenta temperaturas mais estáveis e sem grandes oscilações sazonais, mantendo-se geralmente entre os 12°C e os 28°C ao longo

de todo o ano. Em contrapartida, Évora revela uma amplitude térmica mais pronunciada, com grandes variações de temperatura, onde se fazem notar as transições sazonais. Por exemplo, entre setembro e outubro, as temperaturas em Évora descem de 25,48°C no dia 6 de setembro para 16,21°C no dia 7 de outubro, enquanto em Faro a descida é mais gradual, passando de 24,45°C para 23,45°C no mesmo período.

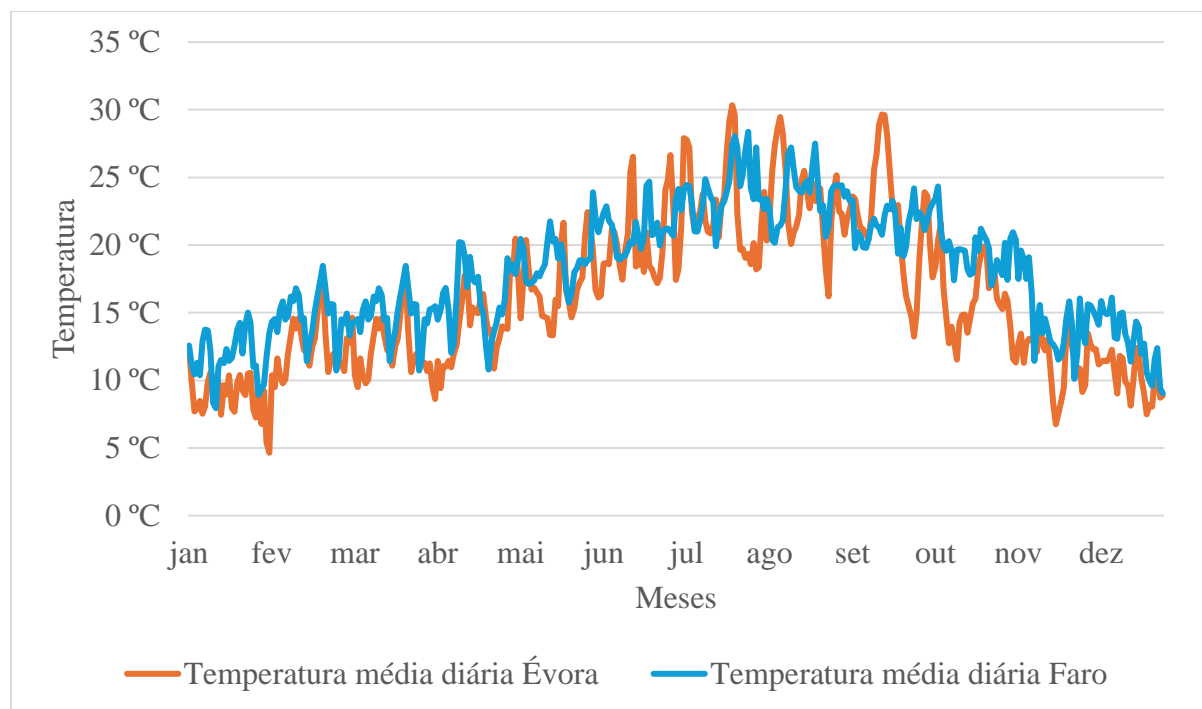


Figura 4.3 - Temperaturas exteriores médias diárias de Évora e Faro.

O estudo das temperaturas exteriores médias mensais, semanais e diárias de Évora e Faro não abrange completamente a complexidade climática destas cidades. As amplitudes térmicas, os extremos de temperatura e a frequência de variações térmicas significativas são aspetos cruciais para uma avaliação detalhada do desempenho térmico dos edifícios.

Évora apresenta amplitudes térmicas mais pronunciadas em todas as escalas temporais, o que significa apresentar maior variação de temperatura em diferentes períodos do ano, com meses, semanas e dias mais quentes e mais frios do que em Faro.

Évora regista a sua amplitude diária máxima a 7 de Junho, com 20°C, tendo Faro registado a sua amplitude máxima a 24 de Julho com 17°C, amplitude que Évora registou mais de 10 vezes. A prevalência de dias com amplitudes térmicas diárias elevadas na cidade eborense é assinalada pelos 129 dias com amplitudes superiores a 10°C, em relação aos 64 dias em Faro.

No período de maior calor, entre 15 de maio e 8 de outubro, um período de 146 dias, há 113 dias em que a amplitude térmica em Évora é superior à de Faro, e nesses mesmos dias a temperatura máxima é superior em Évora em 94 dias, o que reflete o comportamento térmico habitual do interior alentejano nos meses de maior calor.

4.2.2. Humidade Relativa Exterior

No presente capítulo, são analisados os dados de humidade relativa exterior nas cidades de Évora e Faro ao longo de um ano, com base nas simulações realizadas. Este estudo é essencial para compreender como a humidade relativa exterior influencia o desempenho térmico e o conforto dos ocupantes em edifícios de habitação. A humidade relativa é uma função direta da temperatura, isto significa que, quando a temperatura desce, o ponto de saturação diminui, o que resulta num aumento da humidade relativa, mesmo sem alteração no conteúdo absoluto de humidade no ar. Portanto, o aumento da humidade relativa no inverno em Évora e Faro não implica necessariamente um aumento do teor de humidade, mas sim uma consequência das temperaturas mais baixas, que reduzem o limite de saturação.

Os gráficos apresentados na Figura 4.4 e 4.5 fornecem uma visão detalhada dos valores médios diários da humidade relativa exterior para ambas as cidades.

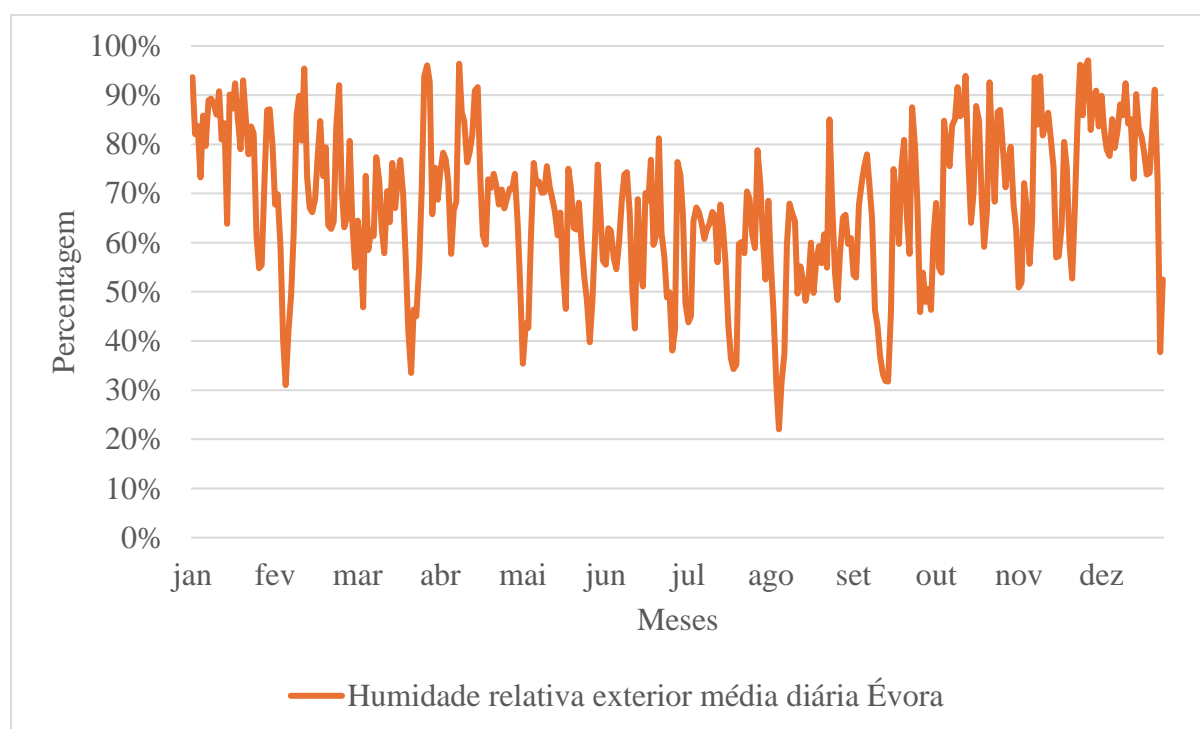


Figura 4.4 - Dados diários da HR em Évora.

Nas Figura 4.4 e 4.5, é possível observar a variação da humidade relativa exterior média diária ao longo do ano para Évora (linha laranja) e Faro (linha azul). Como seria expectável, ambas as cidades apresentam flutuações significativas ao longo do ano, refletindo as variações sazonais típicas do clima mediterrânico.

No caso de Évora, picos de humidade relativa são observados nos meses de inverno, quando as temperaturas médias diárias atingem valores mínimos de 4,65°C no dia 31 de janeiro.

A temperatura baixa provoca um aumento da humidade relativa, mas o teor absoluto de vapor de água no ar é limitado pelas baixas temperaturas.

Em Faro, onde as temperaturas invernais são mais altas, como no mesmo dia de janeiro, quando a temperatura média diária foi de 13,51°C, a humidade relativa também aumenta, mas com uma amplitude ligeiramente menor, sugerindo uma maior estabilidade climática por influência da proximidade costeira.

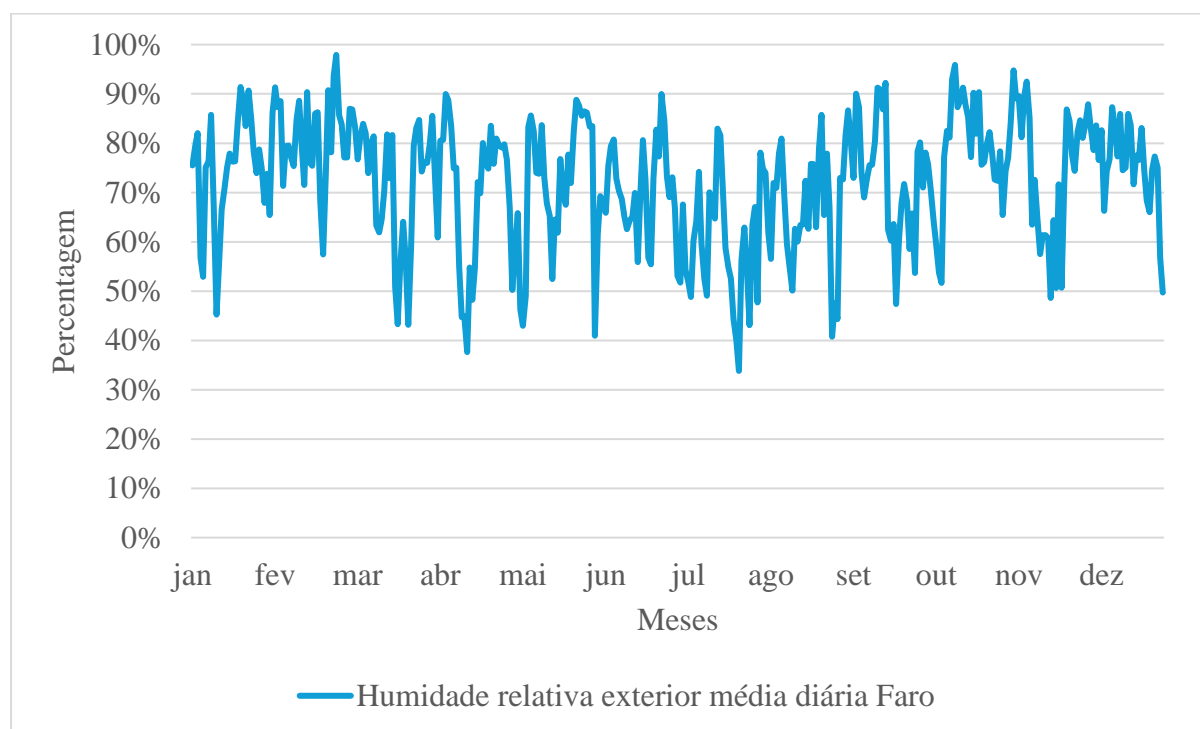


Figura 4.5 - Dados diários da HR em Faro.

Durante o verão, enquanto Évora regista picos máximos de temperatura média diária de 30,34°C, a humidade relativa tende a diminuir consideravelmente, especialmente em dias de altas temperaturas, devido ao aumento do limite de saturação do ar quente. Em Faro, onde as temperaturas máximas são mais moderadas, com 27,37°C no mesmo período, a humidade relativa mantém-se mais constante, refletindo a influência marítima, que modera as variações sazonais de temperatura e humidade.

Esta correlação entre temperatura e humidade relativa exterior reflete-se em comportamentos climáticos distintos nas duas cidades. Évora apresenta uma amplitude térmica maior, o que resulta em variações mais bruscas na humidade relativa. Já Faro, com variações térmicas mais suaves, exhibe uma humidade relativa mais estável ao longo do ano e com variações sazonais mais ligeiras.

A Figura 4.6, que mostra a humidade relativa exterior média semanal, permite uma análise mais suavizada das tendências sazonais.

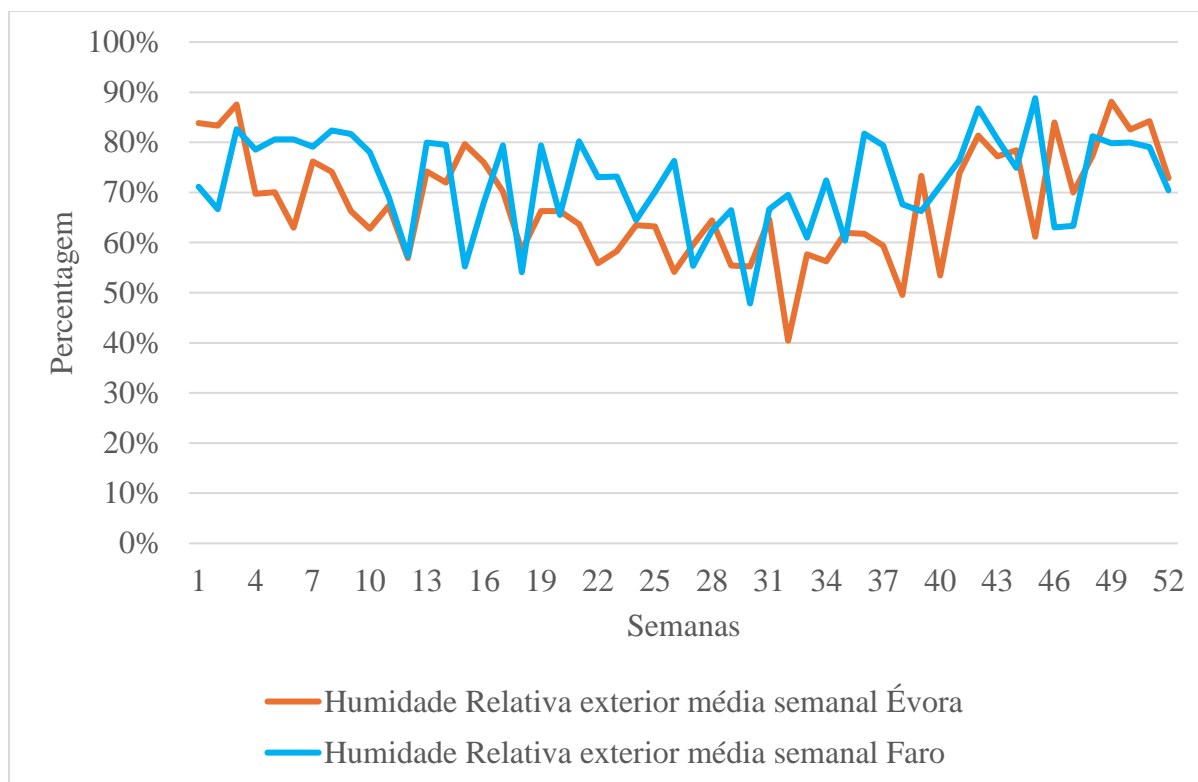


Figura 4.6 - Dados semanais da HR em Évora e Faro.

Em Évora, a humidade relativa exterior média semanal atinge o máximo de 88,81% na semana de 3 a 9 de dezembro, durante o inverno. Este período corresponde ao pico da estação fria e húmida, típico do clima mediterrânico. O mínimo semanal de 40,43% ocorre na semana de 6 a 12 de agosto, no auge do verão, refletindo as condições secas características desta estação. Observa-se uma variação significativa ao longo do ano, com valores mais elevados de humidade relativa durante o outono e inverno, e valores mais baixos durante a primavera e verão. Este padrão é consistente com a precipitação sazonal, que é mais frequente nos meses mais frios [28].

Em Faro, o máximo de humidade relativa exterior média semanal é de 88,10%, registado na semana de 5 a 11 de novembro. O mínimo semanal de 47,86% é observado na semana de 23 a 29 de julho, durante o pico do verão. A humidade relativa exterior em Faro apresenta um padrão semelhante ao de Évora, com humidade elevada durante o outono e inverno, e valores mais reduzidos durante a primavera e verão. No entanto, a amplitude das variações em Faro é ligeiramente menor, sugerindo um clima costeiro mais moderado e menos extremo, tal como já se tinha verificado nas temperaturas exteriores.

A amplitude da humidade relativa exterior anual em Évora é mais pronunciada que em Faro, com uma diferença entre o máximo e o mínimo de cerca de 48,38%. Em Faro, esta diferença é menor, aproximadamente 40,24%, indicando um clima menos variável em termos de humidade. Ambos os locais apresentam picos de humidade no final do outono e início do inverno, mas Faro atinge o máximo um pouco mais cedo que Évora. Isto pode ser atribuído à influência marítima em Faro, que tende a moderar as condições climáticas. Os períodos mais

secos ocorrem durante o verão em ambas as cidades, com Faro mantendo uma humidade relativa ligeiramente superior à de Évora. A proximidade de Faro ao oceano Atlântico contribui para níveis de humidade relativamente mais altos durante o verão, mesmo em condições de calor intenso.

A análise dos dados de humidade relativa exterior em Évora e Faro revela padrões sazonais importantes que influenciam o desempenho térmico dos edifícios. Estas variações devem ser consideradas no planeamento e implementação de estratégias bioclimáticas e de tecnologias solares passivas para otimizar o conforto dos ocupantes e a eficiência energética dos edifícios.

A interpretação da temperatura e humidade relativa exterior nas cidades de Évora e Faro é fundamental para compreender o desempenho térmico dos edifícios. Estas variáveis climáticas têm um impacto direto nas necessidades de aquecimento e arrefecimento, influenciam o conforto térmico dos ocupantes e a eficiência energética dos edifícios.

Além disso, as alterações climáticas estão a intensificar as variações de temperatura e humidade relativa, com impactos diretos no desempenho térmico dos edifícios. De acordo com um estudo recente, espera-se que o aumento das temperaturas médias agrave a disparidade entre as necessidades de aquecimento e arrefecimento, aumentando a probabilidade de sobre-aquecimento nos meses mais quentes [72]. Estas mudanças climáticas sublinham a importância de estratégias construtivas com elevada inércia térmica, especialmente em regiões como o Alentejo e o Algarve, onde os desafios de arrefecimento são mais pronunciados. A utilização de materiais com maior capacidade de armazenamento térmico pode ajudar a estabilizar as temperaturas interiores, reduzindo a dependência de sistemas de climatização e, por conseguinte, diminuindo o consumo energético.

4.3. Temperatura Interior

Nos edifícios de habitação, considera-se a temperatura interior de 18°C na estação de aquecimento e de 25°C na estação de arrefecimento para a determinação dos balanços de energia em condições nominais. A partir dos dados obtidos através do programa EnergyPlus, que realiza simulações energéticas em intervalos de 15 minutos ao longo do período de um ano, foram extraídos os números de horas e dias em que as temperaturas interiores se encontram acima ou abaixo destes intervalos.

Este estudo foca-se em duas soluções construtivas, a solução corrente em betão armado e alvenaria de tijolo com ETICS e a solução vernácula em taipa. Adicionalmente analisa a eficácia de várias estratégias bioclimáticas, como o efeito da inércia térmica dos edifícios em terra, o uso proteções solares e a ventilação noturna, em duas cidades portuguesas onde a construção em terra é comum, Évora e Faro. De seguida (Tabela 4.1), são apresentados os resultados do número de dias dentro do intervalo de temperaturas interiores regulamentares, para cada cidade e para as diferentes estratégias bioclimáticas adotadas.

Tabela 4.1 - Resumo de simulações térmicas: intervalos de temperatura e dias correspondentes.

Solução	Simulação	Intervalo de temperaturas	Número horas	Número de dias	Dias fora do intervalo de temperaturas	Dias dentro do intervalo de temperaturas
Évora ETICS	R	<18	2209	92	235	130
		>25	3441	143		
	PS	<18	2977	124	237	128
		>25	2701	113		
	VN	<18	2992	125	224	141
		>25	2376	99		
	AC	<18	757	32	124	241
		>25	2213	92		
Évora Taipa	R	<18	1955	81	117	248
		>25	845	35		
	NR	<18	2418	101	137	228
		>25	871	36		
	PS	<18	3138	131	167	198
		>25	867	36		
	VN	<18	3145	131	167	198
		>25	855	36		
	AC	<18	965	40	76	289
		>25	849	35		
Faro ETICS	R	<18	888	37	216	149
		>25	4286	179		
	PS	<18	1664	69	212	153
		>25	3422	143		
	VN	<18	1667	69	200	165
		>25	3122	130		
	AC	<18	319	13	135	230
		>25	2918	122		
Faro Taipa	R	<18	1073	45	85	280
		>25	973	41		
	NR	<18	1321	55	97	268
		>25	1002	42		
	PS	<18	1924	80	120	245
		>25	946	39		
	VN	<18	1931	80	120	245
		>25	941	39		
	AC	<18	439	18	57	308
		>25	938	39		

A análise dos dados (Tabela 4.1) revela uma diferença significativa no desempenho térmico entre as duas soluções construtivas e as estratégias solares passivas implementadas nas duas cidades estudadas. Em ambas as cidades, a construção em taipa apresenta um desempenho superior, com mais dias dentro do intervalo de temperaturas nominais, quando comparado com a solução construtiva em betão armado e alvenaria de tijolo furado com ETICS.

A taipa, com sua maior inércia térmica, demonstra ser mais eficaz em manter temperaturas interiores estáveis e dentro do intervalo regulamentar, especialmente em climas quentes como o de Faro. A diferença no número de dias dentro do intervalo de 18°C a 25°C nas soluções regulamentares entre as duas soluções construtivas é de 118 dias em Évora e 131 dias em Faro, o que representa aproximadamente 4 meses do ano.

A alteração da espessura de taipa de 60 cm para 36 cm, que corresponde a valores não regulamentares, resulta num aumento no número de dias fora do intervalo de temperaturas nominais em ambas as cidades, destaca a importância da espessura na eficácia da inércia térmica. Ainda assim, o número de dias dentro do intervalo das temperaturas nominais para a

taipa com espessura não regulamentar, em Évora, é ligeiramente inferior ao número de dias da solução com ETICS com o efeito combinado das estratégias bioclimáticas e a introdução do sistema de climatização, num total de 13 dias. A mesma análise feita na cidade de Faro mostra que a solução não regulamentar em taipa, com 268 dias, mais 38 dias dentro do intervalo do que a solução regulamentar em ETICS, com a introdução das estratégias solares passivas e o sistema de climatização.

A regulamentação atual, demasiado restritiva para os edifícios em taipa, particularmente no que diz respeito à espessura das paredes, é focada no valor do coeficiente de transmissão térmica, desconsiderando a inércia térmica, que é significativamente superior nas construções em taipa. A elevada inércia térmica da taipa proporciona um maior amortecimento térmico, resultando em menores variações de temperatura ao longo do dia, um aspeto crucial para o conforto térmico que não é devidamente valorizado pelas normas vigentes. À semelhança de outros estudos, entende-se que a regulamentação deve, portanto, integrar não apenas o coeficiente de transmissão térmica, mas também a capacidade de armazenamento e liberação de calor dos materiais, reconhecendo a contribuição significativa da inércia térmica para o desempenho energético dos edifícios [11, 29].

As estratégias solares passivas, que incluem a ventilação noturna e o uso de proteções solares, visam reduzir o número de dias com temperaturas interiores superiores a 25°C. Esta abordagem é particularmente relevante para a solução construtiva corrente com ETICS nas duas cidades, onde os dias de calor se mostram o fator mais condicionante para o conforto térmico. A colocação das palas de sombreamento horizontais sobre as janelas orientadas a sul mostrou ser a solução com impacto menos relevante na alteração dos resultados. A única solução em que se mostra positiva nesta análise é a solução corrente em Faro, com um aumento de 4 dias no intervalo. Nas restantes soluções, as palas de sombreamento reduziram o número de dias dentro do intervalo regulamentar, embora a sua aplicação tenha permitido uma ligeira diminuição das temperaturas máximas interiores pela redução do sobreaquecimento, embora de forma pouco significativa.

Na solução construtiva em alvenaria de tijolo com ETICS, a adição de ventilação noturna resulta em 141 dias dentro do intervalo de temperaturas em Évora, e em 165 dias em Faro, o que se traduz num aumento de 12 a 13 dias com as temperaturas interiores das habitações com esta solução construtiva dentro do intervalo regulamentar. Nas soluções construtivas de taipa, tanto em Évora como em Faro, não leva a qualquer alteração.

A adição de ar condicionado, como seria expectável, melhora significativamente o desempenho térmico em ambas as soluções construtivas, mas os edifícios em taipa continuam a ter um número maior de dias dentro do intervalo de temperaturas nominais. A solução que mais beneficiou com a introdução de um sistema de climatização que ligava apenas no intervalo de permanência das pessoas no edifício e que ativava para temperaturas inferiores a 18°C ou superiores a 27°C foi a solução de betão armado e alvenaria de tijolo com ETICS em Évora, com um aumento de 100 dias dentro do intervalo de valores estudado. Na mesma cidade, a solução em taipa não regulamentar com o efeito combinado das restantes estratégias bioclimáticas (AC) também beneficia muito da introdução do ar condicionado com um aumento de 91 dias. Para a

solução vernácula, em Faro, a melhoria é de 63 dias, enquanto para ETICS em Faro é de 65 dias.

4.3.1. Dia de Temperatura Máxima

A avaliação dos dados relativos ao desempenho das diferentes soluções construtivas face ao pico de temperatura exterior, são uma das importantes vantagens que a simulação dinâmica agrega. A comparação entre as temperaturas exteriores e interiores, utilizando as várias simulações, permitirá compreender como cada solução modera os extremos de temperatura, no dia mais quente do ano.

A escolha da análise específica da cidade de Évora para esta análise prende-se com o facto das suas variações térmicas serem mais extremas e dos picos de temperatura, tanto superior quanto inferior, serem mais intensos do que em Faro. A escolha do dia mais quente em detrimento do dia mais frio deve-se a que nas regiões em estudo o período mais condicionante ser o de arrefecimento. Em Évora, o dia mais quente ocorreu a 23 de julho, os seus dados são avaliados de seguida.

As Figuras 4.7 e 4.8, que se apresentam mostram para as duas soluções construtivas, a evolução das temperaturas interiores e exteriores nas diferentes simulações ao longo do dia de maior calor na cidade de Évora.

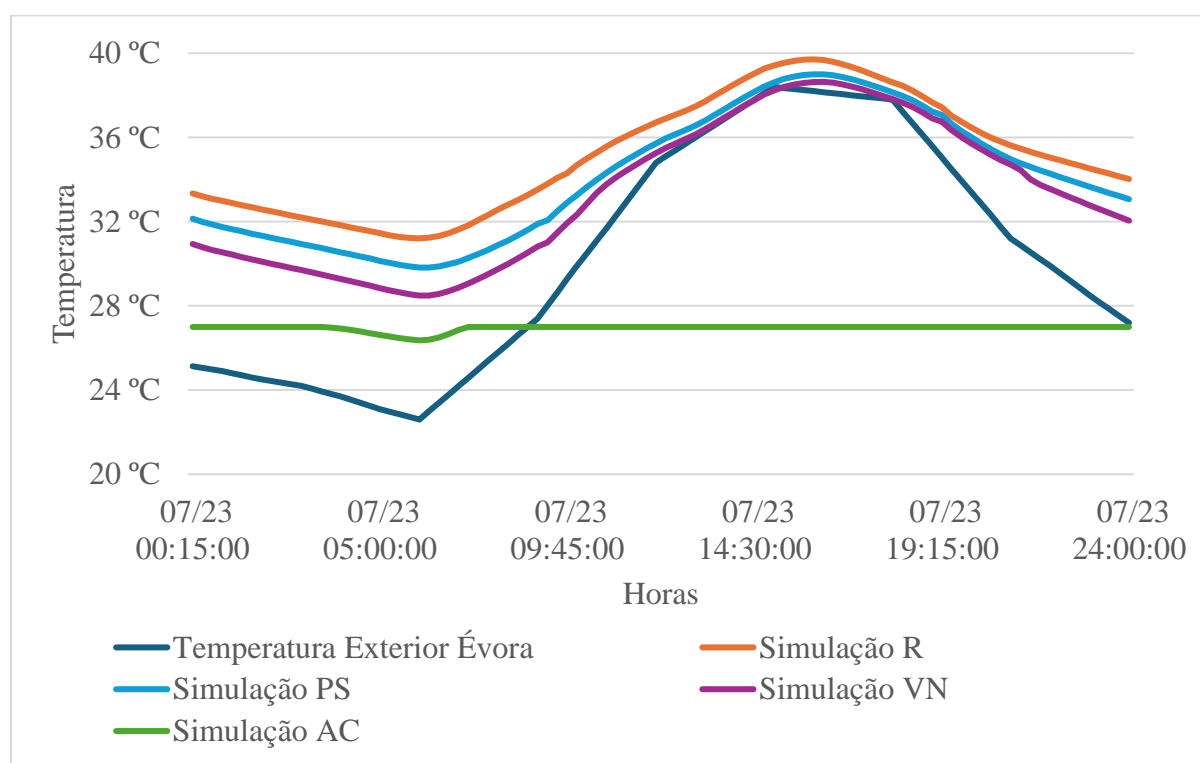


Figura 4.7 - Evolução das temperaturas no dia de maior calor – ETICS.

Para realizar esta análise, foi estudada a variação diária da temperatura interior entre ETICS e taipa comparada com a evolução da temperatura exterior.

São destacados os picos das temperaturas máximas e mínimas interiores alcançadas em cada simulação durante o dia mais quente e as horas a que ocorrem, bem como a amplitude térmica e as temperaturas máximas e mínimas.

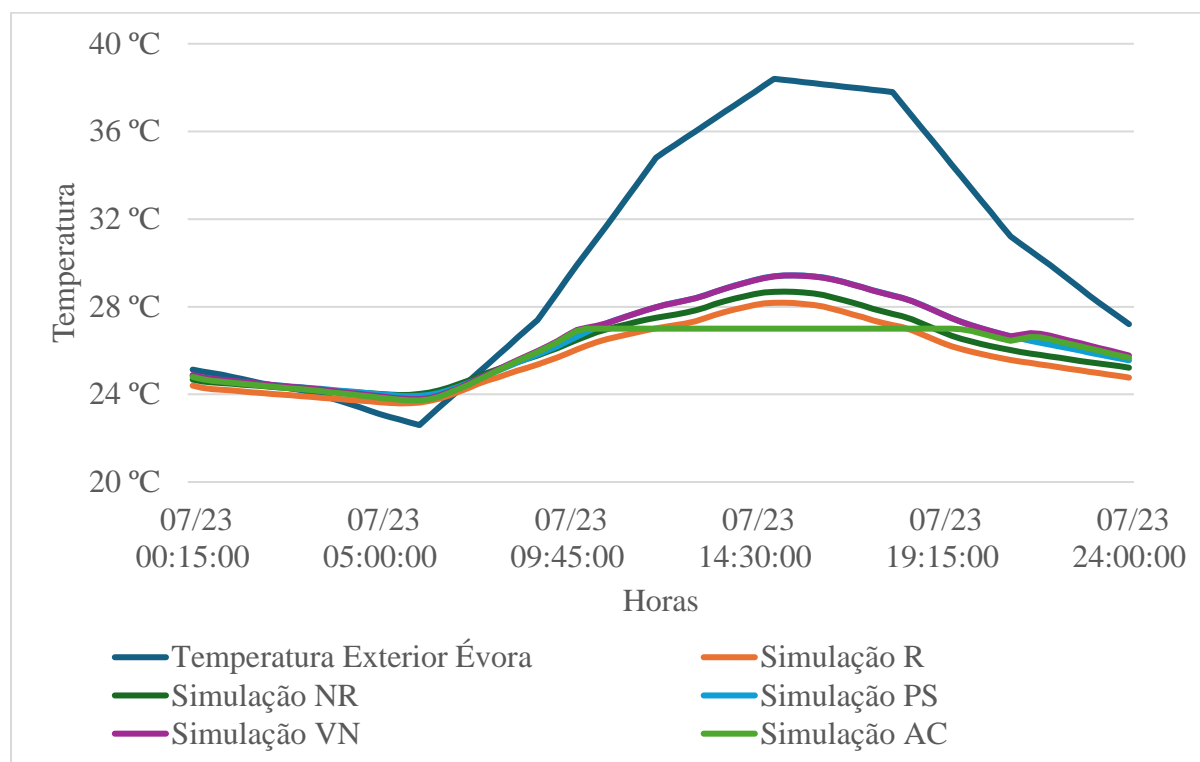


Figura 4.8 - Evolução das temperaturas no dia de maior calor – Taipa.

A distribuição horária das temperaturas foi analisada para identificar as horas críticas de desconforto. O desempenho da inércia térmica das diferentes soluções construtivas foi avaliado, comparando o caso R e NR em taipa, e a eficácia das estratégias passivas na mitigação dos picos de temperatura foi analisada.

A análise detalhada do dia mais quente do ano em Évora demonstra que as soluções construtivas em taipa, com maior inércia térmica, oferecem maior estabilidade térmica interna, amortecendo eficazmente as variações de temperatura ao longo do dia. As soluções ETICS, embora apresentem variações térmicas mais bruscas, beneficiam ainda que de forma reduzida das tecnologias solares passivas, como as proteções solares e a ventilação noturna. A combinação destas estratégias construtivas e passivas é essencial para mitigar as condições extremas de temperatura, assegurando um ambiente interno mais confortável e energeticamente eficiente.

4.3.2. Variação da Temperatura Interior

A variação diária da temperatura interior em Évora mostra que a solução construtiva em ETICS apresenta temperaturas interiores superiores às exteriores, principalmente devido à menor inércia térmica da tecnologia de construção e ao efeito de sobreaquecimento durante o dia. Em contraste, a solução em taipa, com maior inércia térmica, apresentam uma variação mais amortecida, mantendo temperaturas mais estáveis ao longo do dia.

4.3.3. Distribuição Horária das Temperaturas

Em ETICS, os picos de temperatura interior ocorrem simultaneamente com os picos exteriores, mas com valores ligeiramente superiores. A temperatura máxima interior em ETICS para a simulação R atingiu os 39,71°C, superando a máxima exterior de 38,40°C, a mínima interior na mesma simulação foi de 31,21°C, indicando uma amplitude térmica interior de cerca de 8,50°C, muito inferior à amplitude térmica exterior de 15,80°C. A presença de proteções solares e ventilação noturna, ainda que sem grande relevância, contribuiu positivamente para a redução destes picos.

Na solução construtiva em taipa, a simulação R apresentou uma temperatura máxima de 28,18°C e uma mínima de 23,59°C, com uma amplitude térmica bastante inferior à de ETICS, com uma tendência a retornar a condições confortáveis mais rapidamente.

Nas simulações de taipa, os picos de temperatura foram mais baixos, e com menor amplitude térmica devido à elevada capacidade de armazenamento das cargas térmicas do material, mantendo as temperaturas internas mais próximas dos valores nominais de conforto. Isto resultou em temperaturas internas mais constantes ao longo do dia, com menos flutuações extremas, o que é benéfico para a estabilidade térmica a longo prazo.

O estudo da distribuição horária das temperaturas interiores no dia mais quente mostra que na solução corrente, as temperaturas internas aumentam rapidamente a partir das 6:15, atingindo um pico máximo pelas 15:00 e diminuindo lentamente as temperaturas, mais acentuadamente a partir das 18:00. Todas as simulações da solução corrente, à exceção da AC, apresentam uma média das temperaturas internas a rondar os 34°C, muito superior ao limite máximo regulamentar de 25°C. É ainda importante notar que em todas as simulações de ETICS sem climatização ativa, à exceção da VN apresentam temperaturas mínimas, superiores às máximas diárias em taipa. A distribuição horária das temperaturas nas simulações ETICS mostrou uma redução ineficaz dos picos de temperatura durante as horas críticas da tarde. A amplitude térmica diária foi maior, evidenciando, como já referido, o efeito do sobreaquecimento e da menor inércia térmica.

A distribuição horária nas simulações de taipa revelou uma manutenção mais constante das temperaturas internas ao longo do dia, com a temperatura interna a aumentar mais lentamente, embora acompanhando os mesmo intervalos temporais da solução corrente, atingindo picos mais suaves e retornando a condições confortáveis. A menor amplitude térmica diária no interior do edifício reflete a capacidade do material de amortecer as variações de temperatura

exteriores, proporcionando um ambiente interno mais estável, resultados que se aproximam dos obtidos por outros estudos que avaliam o comportamento térmico de paredes de taipa na mesma cidade [15, 17].

4.3.4. Desempenho da Inércia Térmica

As soluções em taipa destacaram-se pela elevada inércia térmica, que amorteceu eficazmente as variações de temperatura externa. A maior massa térmica absorve e armazena o calor durante o dia, libertando-o lentamente durante a noite, o que proporciona um ambiente interior mais estável e uma menor necessidade de sistemas de arrefecimento ativos, beneficiando o conforto térmico e a eficiência energética dos edifícios. Em comparação, as soluções em ETICS, com menor inércia térmica, apresentam variações mais bruscas e menos amortecidas, o que leva a prever uma maior necessidade de sistemas de arrefecimento ativos.

Comparando as simulações R e NR em taipa, a simulação R apresentou uma temperatura máxima de 28,18°C e mínima de 23,59°C, já a simulação NR, tendo uma redução de 24 centímetros de espessura de taipa, mostrou uma temperatura máxima de 28,69°C e mínima de 23,97°C, resultados similares à simulação R. A simulação NR em taipa alcançou resultados próximos da R em termos de máximas e mínimas, mas com uma ligeira desvantagem na redução da amplitude térmica diária e com um aumento de poucas décimas nas temperaturas interiores, ainda assim destacando a capacidade da inércia térmica da taipa de amortecer e moderar as variações térmicas.

No entanto, a regulamentação vigente é muito restritiva para os edifícios em taipa, especialmente no que diz respeito à sua espessura, focando-se unicamente no valor do coeficiente de transmissão térmica e desconsiderando o importante impacto da inércia térmica. Esta abordagem desconsidera a significativa contribuição da inércia térmica da taipa, que é bastante superior ao que o regulamento define como muito alto.

4.3.5. Eficácia das Tecnologias Solares Passivas

As tecnologias solares passivas demonstram impactos contrários nas duas soluções construtivas embora com pouca significância em ambos os casos, isto é, as estratégias aplicadas na solução corrente serviram para reduzir ligeiramente as temperaturas interiores e no caso da solução em taipa, as temperaturas aumentam, embora de forma reduzida.

Como referido anteriormente, a aplicação das estratégias bioclimáticas como a introdução das palas de sombreamento horizontais e da ventilação noturna nos meses de maior calor visava atenuar os ganhos de calor nesse período e consequentemente reduzir as temperaturas máximas interiores e como tal as necessidades de arrefecimento.

A introdução das palas de sombreamento horizontais na solução ETICS leva a uma redução de 0,71°C na temperatura máxima no interior do edifício no dia mais quente do ano, e o efeito combinado da pala com a ventilação noturna, leva a uma atenuação total de 1,07°C,

mantendo-se ainda assim o máximo da temperatura interior superior ao máximo da temperatura exterior.

Estes resultados embora pouco significativos terão alguma influência na diminuição das necessidades de arrefecimento durante os meses de maio a setembro, que será analisada adiante nos capítulos 4.6.2. e 4.6.5..

4.3.6. Temperaturas Interiores Médias Diárias

As Figuras 4.9 e 4.10 que se apresentam de seguida ilustram as temperaturas médias diárias exteriores e interiores ao longo de um ano nas duas cidades e para as duas soluções construtivas em estudo. Estando a temperatura interior média diária da solução com ETICS a verde, a solução em taipa representada a azul e a laranja as temperaturas médias diárias exteriores. A análise que se segue considera o atraso temporal, o amortecimento térmico e a inércia térmica, fundamentais para entender o impacto destas soluções construtivas no conforto térmico dos ocupantes.

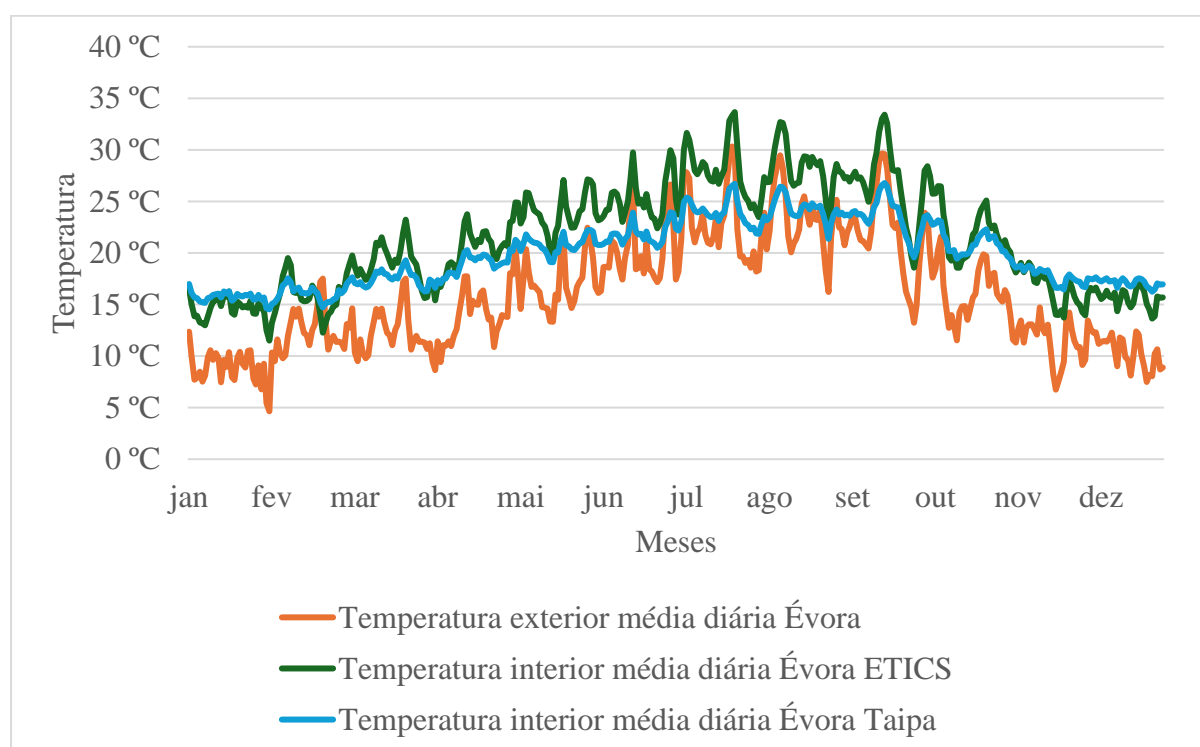


Figura 4.9 - Temperaturas médias diárias exteriores e interiores em Évora.

O atraso temporal refere-se ao tempo que a temperatura interior demora para responder às variações da temperatura exterior. Este fenómeno é particularmente importante em climas com grandes oscilações diárias de temperatura, pois um maior atraso temporal pode resultar num ambiente interior mais estável.

Observa-se que, em ambas as figuras, as temperaturas interiores dos edifícios com ETICS respondem mais rapidamente às mudanças diárias das temperaturas exteriores, tanto em Évora quanto em Faro. Isso indica um menor atraso temporal devido à menor inércia térmica dos sistemas ETICS. Em contraste, os edifícios em taipa exibem uma resposta mais lenta às mudanças exteriores, demonstrando um maior atraso temporal. Esta característica é benéfica para a manutenção de um ambiente interno mais estável, especialmente em climas com grandes variações diárias de temperatura, como já se verificou ser o caso da cidade alentejana.

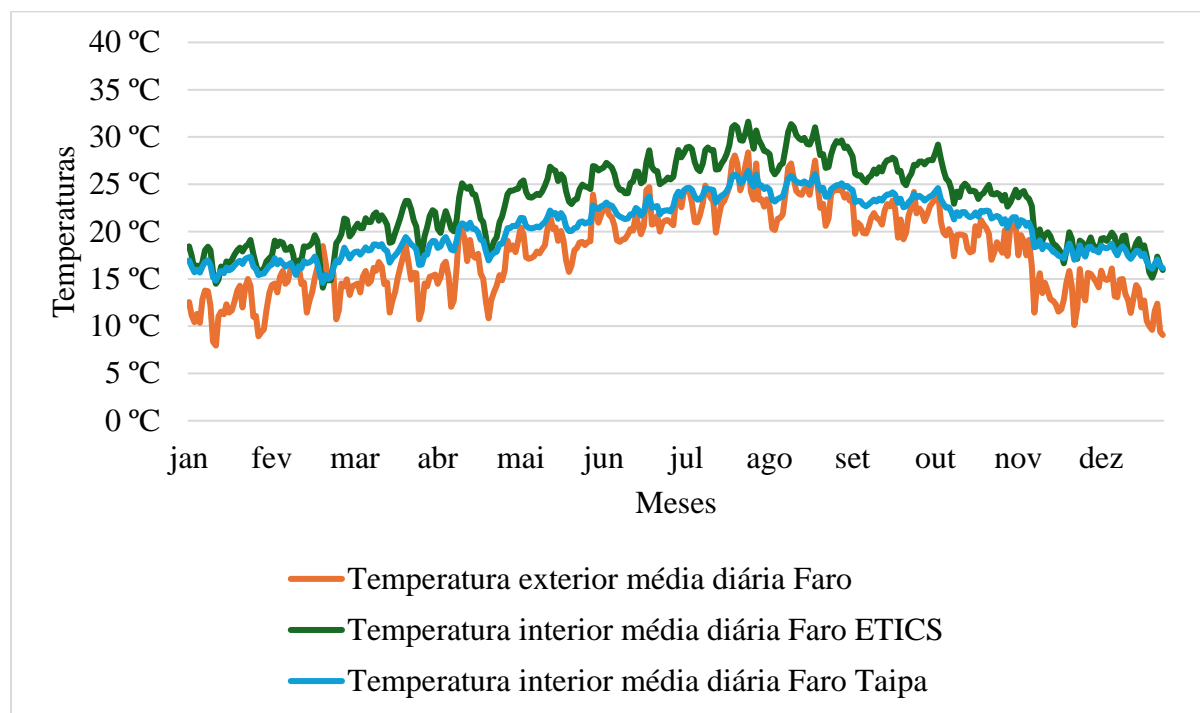


Figura 4.10 - Temperaturas médias diárias exteriores e interiores em Faro.

O amortecimento térmico representa a capacidade de um material reduzir a amplitude das variações de temperatura interior em comparação com a temperatura exterior. Em ambos os gráficos, durante os meses de verão, as temperaturas interiores dos edifícios em taipa permanecem consistentemente abaixo das temperaturas interiores dos edifícios com ETICS, e mais próximas da faixa de conforto, entre os 18°C e os 25°C. No inverno, a taipa também mostra um desempenho superior, mantendo as temperaturas interiores acima das exteriores e mais próximas dos valores de conforto.

Em Évora, a temperatura média diária máxima exterior é de 30,34°C e as temperaturas interiores máximas médias diárias registadas são de 33,67°C em ETICS e 26,79°C para a taipa. As temperaturas mínimas exteriores médias diárias são de 4,65°C, enquanto as mínimas interiores são de 11,50°C para ETICS e 14,53°C em taipa, o que vai de encontro aos resultados obtidos a partir da análise anual. Para Faro, a temperatura média diária máxima exterior é de 28,37°C, com as temperaturas interiores máximas médias diárias de 31,62°C em ETICS e

26,42°C em taipa. Relativamente à temperatura mínima exterior média diária é de 7,94°C, enquanto as mínimas interiores são de 14,07°C em ETICS e 14,57°C na taipa.

A análise mostra que a taipa proporciona um melhor amortecimento térmico, o que resulta em variações menos extremas nas temperaturas interiores ao longo do ano e para as médias de temperaturas diárias nos dois extremos, outros estudos apresentam as mesmas conclusões para as duas estações e referem o impacto da taipa e da sua elevada inércia térmica neste efeito [29].

Como definido no capítulo dos “Conceitos Fundamentais da Térmica de Edifícios”, a inércia térmica é a capacidade de um material armazenar e libertar calor lentamente, influenciando a estabilidade térmica interna dos edifícios. Edifícios com maior inércia térmica, como os construídos em taipa, demonstram uma capacidade superior em manter temperaturas internas estáveis.

Em Évora, a maior inércia térmica da taipa contribui para temperaturas interiores mais estáveis, com variações diárias menos acentuadas em comparação com ETICS. Nos meses de verão, as temperaturas interiores em taipa mantêm-se abaixo das temperaturas exteriores. Durante o inverno, a taipa retém o calor, mantendo as temperaturas interiores mais altas e confortáveis. De forma similar, em Faro, a taipa demonstra uma capacidade superior de regular as temperaturas internas, com temperaturas máximas e mínimas interiores mais moderadas em comparação com ETICS, evidenciando a eficácia da taipa em amortecer as variações térmicas.

A comparação entre os sistemas construtivos ETICS e taipa em termos de desempenho térmico demonstra vantagens claras para a taipa. A taipa apresenta um maior atraso temporal, proporcionando um ambiente interno mais estável e confortável, independentemente das condições externas. Além disso, a taipa oferece um maior amortecimento térmico, reduzindo a amplitude das variações de temperatura interior e garantindo um conforto térmico superior ao longo do ano. A maior inércia térmica permite a retenção de calor durante o inverno e a capacidade de manter a temperatura interior próxima ou dentro dos valores nominais durante o verão, contribuindo significativamente para a eficiência energética dos edifícios de habitação.

4.3.7. Análise da Inércia Térmica

A inércia térmica de um material construtivo pode ser caracterizada por dois parâmetros já referidos no capítulo 2, o desfasamento ou atraso temporal e o amortecimento térmico, parâmetros que fornecem informações em relação à capacidade de armazenar e libertar calor ao longo do tempo, mitigando as variações de temperatura no interior das habitações.

Para realizar o cálculo destes parâmetros é necessário considerar as propriedades físicas dos materiais utilizados nas soluções construtivas da envolvente opaca vertical. No caso da taipa os cálculos são feitos para as duas espessuras, uma regulamentar com 60 centímetros de espessura e outra não regulamentar com 36 centímetros. Para a análise do desfasamento temporal e do amortecimento térmico da solução corrente de betão armado, alvenaria de tijolo furado e isolamento térmico com o sistema ETICS, procurou fazer-se a análise isolada da alvenaria de tijolo furado por ser o elemento que ocupa maior área e que confere maior inércia

térmica à solução construtiva convencional, no entanto o isolamento térmico do sistema ETICS tem muita influência do coeficiente de transmissão térmica da solução, pelo que se procurou obter o valor de condutibilidade térmica abstrato que resultasse do efeito combinado da resistência térmica da alvenaria de tijolo e da condutibilidade térmica do XPS. Na tabela é apresentado um resumo com os valores das características físicas necessárias para realizar o cálculo da difusibilidade térmica, do amortecimento térmico e do desfasamento temporal.

Tabela 4.2 - Análise da inércia térmica: características físicas dos materiais de construção.

	Taipa		ETICS
	Simulação R	Simulação NR	Alvenaria tijolo
Condutibilidade térmica do material [W/m·°C]	0,600	0,600	0,311
Peso volúmico [Kg/m ³]	1900	1900	1200
Calor específico do material [Kcal/Kg·°C]	0,200	0,200	0,239
Espessura do material [m]	0,60	0,36	0,20
Período de tempo [h]	24	24	24
Difusibilidade térmica [m ² /h]	0,00158	0,00158	0,00109
Amortecimento térmico – μ	0,00424	0,03771	0,11135
Desfasamento temporal – φ [h]	20,87	12,52	8,38

Os resultados obtidos para o desfasamento temporal e o amortecimento térmico refletem a capacidade dos materiais de resistirem às variações de temperatura ao longo de um ciclo diário.

Para a taipa regulamentar, o valor do amortecimento térmico é de 0,00424, enquanto para a taipa não regulamentar, o valor é de 0,03771. Em termos quantitativos, o amortecimento térmico varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo do seu limite inferior maior é a capacidade do material em reduzir as oscilações térmicas. Portanto, a taipa regulamentar, com um valor de 0,00424, demonstra uma excelente capacidade de amortecer as variações térmicas, enquanto a taipa não regulamentar, apesar de ter um valor ligeiramente superior, ainda possui uma boa capacidade de amortecimento.

Por outro lado, a alvenaria de tijolo com ETICS apresenta um valor de amortecimento térmico de 0,11135, substancialmente maior do que ambos os valores da taipa, o que indica uma menor capacidade de amortecer as variações térmicas em comparação com a taipa. Isto sugere que, apesar da combinação de alvenaria de tijolo e isolamento térmico, a capacidade de reduzir oscilações térmicas é inferior à da taipa regulamentar e não regulamentar.

Os valores de desfasamento temporal para a taipa regulamentar (20,9 horas) e não regulamentar (12,5 horas) indicam o tempo que a onda de calor leva a atravessar o material, estudos com outras ferramentas de simulação dinâmica, como o realizado em São Pedro de Atacama que apresenta uma parede em taipa com 50 centímetros de espessura resultou em valores de atraso temporal de 14 horas, valor expectável e que vai ao encontro dos obtidos pelo método

de cálculo apresentado nesta dissertação [14]. Um desfasamento temporal maior significa que o material é mais eficaz em retardar a transferência de calor, proporcionando um ambiente interno mais estável. A taipa regulamentar, com uma espessura maior, tem um desfasamento temporal mais longo, demonstrando a sua eficácia em atrasar a transferência de calor.

A alvenaria de tijolo com ETICS, com um desfasamento temporal de 8,385 horas, mostra uma menor capacidade de retardar a transferência de calor em comparação com a taipa. No entanto, é importante notar que, apesar do menor desfasamento temporal, o ETICS ainda pode ser eficaz em climas onde as oscilações térmicas são menos extremas.

As diferenças nos valores de amortecimento térmico e desfasamento temporal destacam a superioridade da taipa em comparação com a solução corrente de alvenaria de tijolo com ETICS. A taipa, especialmente na sua forma regulamentar, demonstra uma capacidade significativamente maior de amortecer as oscilações térmicas e de retardar a transferência de calor, contribuindo para um ambiente interior mais estável e confortável. Considera-se que as restrições regulamentares impostas à taipa devem ser reconsideradas à luz das evidências que demonstram a eficácia térmica da taipa, promovendo assim práticas de construção mais sustentáveis e eficientes.

Os valores obtidos de amortecimento térmico e desfasamento temporal alinham-se com os registados nos artigos cuja literatura científica é sobre este tema, no entanto, afastam-se dos obtidos pelas simulações dinâmicas feitas nesta dissertação [14, 16]. A explicação para esta diferença pode residir no facto de que, nas soluções construtivas utilizadas, a cobertura ser composta por painéis sandwich, que apesar de serem um bom isolamento térmico, possuem uma espessura muito reduzida, o que leva a um menor desfasamento temporal. É importante notar que uma parte significativa das trocas de calor nos edifícios ocorre através da cobertura, o que exerce um impacto elevado na diferença destes resultados.

4.4. Humidade Relativa Interior

Com base nos dados obtidos através do programa EnergyPlus, que realizou simulações térmicas e energéticas em intervalos de 15 minutos ao longo do período de um ano, foram extraídos, entre outros dados, os valores da humidade relativa exterior e da humidade relativa interior em Évora e em Faro, para duas soluções construtivas: uma com a envolvente opaca vertical em betão armado, alvenaria de tijolo furado e ETICS, e outra em taipa. Nas simulações, não foi introduzida a geração interna de humidade nos inputs do programa EnergyPlus, o que pode tornar os resultados mais afastados do perfil real pretendido.

É importante salientar que o objetivo principal desta dissertação é a análise do desempenho térmico e energético do edifício, e não tanto do desempenho higrotérmico. No entanto, a avaliação da humidade relativa interior foi considerada porque, juntamente com a temperatura, a humidade relativa é um dos principais indicadores associados à ocorrência de anomalias e ao conforto no interior das habitações. Ainda que a análise da temperatura tenha sido realizada de forma extensa e multidimensional, a análise da humidade relativa foi mais restrita, concen-

trando-se num critério específico. A análise da humidade relativa realizada neste estudo, embora relevante, apresenta limitações. A ausência de uma análise mais detalhada de parâmetros como a temperatura superficial interna e pontos de orvalho impede uma compreensão completa do comportamento higrotérmico dos edifícios de taipa e das causas das anomalias associadas à elevada humidade. Recomenda-se também que futuras investigações explorem estes aspetos, considerando a influência da geração interna de humidade nas simulações.

A análise dos parâmetros de humidade relativa realizada nesta dissertação apresenta algumas limitações, pois concentra-se predominantemente no intervalo de 30% a 60% de humidade no interior das habitações. Além disso, foram analisadas as médias diárias mensais e diárias, permitindo uma visão mais abrangente do comportamento higroscópico ao longo do tempo.

Com base nessas informações numéricas, foram realizados comentários detalhados sobre a influência do clima de Évora e Faro nas construções em taipa e a inércia higroscópica desse material, a comparação entre as simulações R e NR em taipa, destacando as diferenças de desempenho, o efeito das estratégias de ventilação noturna e das palas de sombreamento bem como o impacto do ar condicionado no controle da humidade interior.

Embora estas análises sejam valiosas, o foco principal desta dissertação é a análise térmica e energética das construções. Assim, os aspetos higroscópicos, embora considerados, não são o cerne do estudo. Para uma análise mais completa e robusta da humidade no interior das habitações, é necessário utilizar outras ferramentas e metodologias. Essas ferramentas devem permitir a avaliação de parâmetros críticos como a possibilidade de condensações internas, verificando se as temperaturas superficiais interiores e os teores de humidade, combinados com o ponto de orvalho, dão origem a condensações superficiais e às anomalias associadas. A ausência dessa análise mais detalhada pode deixar lacunas importantes no entendimento completo do comportamento higrotérmico dos edifícios.

4.4.1. Variação Anual da Humidade Relativa Interior

À semelhança da análise realizada para as temperaturas interiores, procurou fazer-se uma recolha do número de dias dentro e fora do intervalo de humidade relativa interior recomendável para habitações, que corresponde ao intervalo entre os 30% e os 60%. A Tabela 4.3, que se apresenta de seguida resume os resultados obtidos a partir das simulações.

- **Évora ETICS**

Na cidade de Évora, para os edifícios construídos com o isolamento no sistema ETICS, foi estudada a evolução do número de dias dentro e fora do intervalo desejado de humidade relativa interior para cada solução. A solução regulamentar (R) mostra uma distribuição equilibrada de dias fora do intervalo, indicando que, sem intervenções adicionais, há um impacto significativo tanto para valores baixos como altos de humidade relativa, com 276 dias dentro do intervalo. Dos 89 dias fora do intervalo, 50 dias estão abaixo do limiar dos 30% de humidade relativa interior, e 39 dias estão acima dos 60%.

Tabela 4.3 - Resumo de simulações higrométricas: intervalos de humidade relativa e dias correspondentes.

Solução	Simulação	Intervalos de humidade relativa	Número horas	Número de dias	Dias fora do intervalo de humidade relativa	Dias dentro do intervalo de humidade relativa
Évora ETICS	R	<30	1191	50	89	276
		>60	943	39		
	PS	<30	1020	43	110	255
		>60	1623	68		
	VN	<30	966	40	114	251
		>60	1768	74		
	RAC	<30	1019	42	67	298
		>60	597	25		
	PSAC	<30	889	37	73	292
		>60	875	36		
	AC	<30	876	36	79	286
		>60	1032	43		
Évora Taipa	R	<30	391	16	72	293
		>60	1333	56		
	NR	<30	361	15	76	289
		>60	1466	61		
	PS	<30	319	13	88	277
		>60	1801	75		
	VN	<30	318	13	96	269
		>60	1980	82		
	RAC	<30	458	19	70	295
		>60	1227	51		
	NRAC	<30	438	18	72	293
		>60	1280	53		
PSAC	<30	440	18	78	287	
	>60	1435	60			
AC	<30	439	18	86	279	
	>60	1614	67			
Faro ETICS	R	<30	413	17	75	290
		>60	1380	57		
	PS	<30	318	13	105	260
		>60	2196	92		
	VN	<30	309	13	112	253
		>60	2384	99		
	RAC	<30	378	16	69	296
		>60	1288	54		
	PSAC	<30	319	13	94	271
		>60	1948	81		
	AC	<30	316	13	103	262
		>60	2168	90		
Faro Taipa	R	<30	161	7	173	192
		>60	3996	166		
	NR	<30	147	6	177	188
		>60	4106	171		
	PS	<30	127	5	186	179
		>60	4340	181		
	VN	<30	129	5	188	177
		>60	4376	182		
	RAC	<30	178	7	169	196
		>60	3879	162		
	NRAC	<30	168	7	171	194
		>60	3948	164		
PSAC	<30	165	7	175	190	
	>60	4045	169			
AC	<30	166	7	177	188	
	>60	4080	170			

A introdução das palas de sombreamento reduz os dias com HR abaixo de 30%, mas aumenta os dias com HR acima de 60%. Este resultado sugere que as palas ajudam a mitigar a

secura excessiva, mas podem contribuir para o aumento da humidade, especialmente em períodos com menos ventilação natural.

A ventilação noturna apresenta uma tendência semelhante à das palas de sombreamento. A ventilação noturna reduz levemente os dias com baixa HR, mas aumenta os dias com HR elevada, indicando que a renovação de ar durante a noite pode introduzir mais humidade, dependendo das condições exteriores.

A introdução do ar condicionado à simulação regulamentar (RAC), mostra ser eficaz em manter a HR dentro do intervalo desejado, reduzindo significativamente os dias com HR elevada. Este controle ativo da HR permite uma maior estabilidade no ambiente interior.

A combinação de palas de sombreamento com ar condicionado mostrou um aumento de 9% no número de dias com HR fora do intervalo desejado (30%-60%), em comparação com o uso exclusivo de ar condicionado (RAC). Este resultado indica uma ligeira redução na eficácia da solução combinada em manter a HR dentro dos limites ideais, sugerindo que a interação entre as estratégias de sombreamento e o controlo ativo de temperatura (PSAC) pode ter efeitos adversos sobre a estabilidade da HR.

A combinação AC mantém um controlo adequado da HR, com um total de 286 dias dentro do intervalo. No entanto, esta solução mostrou-se ligeiramente menos eficaz do que o RAC ou PSAC isolados, com 298 e 292 dias respetivamente. Este efeito deve-se ao facto de o sistema de ar condicionado e a ventilação noturna funcionarem em horários distintos, o que pode levar a uma interação menos eficiente. A ventilação noturna opera entre as 21h e as 10h de 1 de junho a 30 de setembro, enquanto o ar condicionado está ativo entre as 10h e as 20h, condicionado pela presença de ocupantes no edifício. Esta separação temporal reduz a sinergia entre ambas as estratégias, especialmente em termos de controlo da HR.

- Évora Taipa

Para os edifícios em taipa em Évora, a análise segue a mesma lógica, mas incluindo as simulações NR e NRAC. A taipa regulamentar apresenta um bom desempenho, com poucos dias fora do intervalo, destacando a capacidade deste material em regular a HR interior, apresentando 293 dias dentro do intervalo. A redução da espessura da taipa resulta num ligeiro aumento dos dias fora do intervalo, especialmente para HR elevada, indicando uma menor capacidade de regulação da HR.

As palas de sombreamento aumentam os dias fora do intervalo superior. Embora estas reduzam a incidência solar direta e a temperatura interna, o impacto na HR deve ser cuidadosamente interpretado. A diminuição da temperatura interior reduz o limite de saturação do ar, o que pode resultar num aumento da HR, mesmo que o teor absoluto de vapor de água no ar se mantenha constante. Este aumento não é causado por uma maior quantidade de humidade no ambiente, mas sim pela menor capacidade do ar de reter vapor de água devido à temperatura mais baixa. A ventilação noturna, semelhante às palas de sombreamento, tem um impacto limitado na redução dos dias com baixa HR, mas contribui para mais dias com HR elevada.

O ar condicionado melhora significativamente o controlo da HR, destacando-se como a solução mais eficaz na taipa regulamentar, com 295 dias dentro do intervalo estabelecido. A adição de ar condicionado à taipa não regulamentar, NRAC, apresenta um desempenho muito

próximo ao da solução RAC, com apenas 2 dias de diferença no controlo da HR. Este resultado demonstra que a redução da espessura da taipa tem um impacto marginal sobre a sua inércia higroscópica. A combinação de palas de sombreamento com ar condicionado resulta num desempenho positivo, embora ligeiramente inferior ao RAC, totalizando 287 dias. A combinação de estratégias na solução AC, mostra-se menos eficaz do que o RAC isolado, sugerindo que a interação de diferentes métodos pode ser complexa e não necessariamente aditiva. O ar condicionado, ativo entre as 10h e as 20h, não complementa diretamente a ventilação noturna, que opera entre as 21h e as 10h, resultando numa menor capacidade de resposta às variações de HR ao longo do dia.

- Faro ETICS

Para Faro, com ETICS, é possível observar as seguintes tendências, a solução regulamentar tem um desempenho sólido, mas mostra um impacto significativo da HR elevada devido ao clima húmido de Faro. As palas de sombreamento, ao reduzir a incidência solar direta, aumentam os dias com HR elevada, refletindo o desafio de controlar a HR em climas húmidos. A ventilação noturna contribui para o aumento da HR, não necessariamente devido à introdução de ar mais húmido, mas sim pela diminuição da temperatura do ar durante a noite. Este efeito ocorre porque, à medida que a temperatura baixa, o teor de humidade permanece constante, mas a HR aumenta, uma vez que o limite de saturação do ar diminui. Como resultado, o risco de se atingir o ponto de saturação é maior, o que pode favorecer a proliferação de fungos e bolores, reduzindo a qualidade do ar interior.

O ar condicionado mostra-se extremamente eficaz, minimizando os dias fora do intervalo, mesmo no clima húmido de Faro. A combinação de palas de sombreamento com ar condicionado é menos eficaz do que o RAC isolado. A combinação de estratégias, na solução AC, embora eficaz, não supera o desempenho do RAC isolado, destacando a importância de uma abordagem bem calibrada para o controlo da HR.

- Faro Taipa

Para Faro, a construção em taipa regulamentar apresenta um desempenho fraco, com muitos dias fora do intervalo, especialmente com HR elevada, devido ao clima húmido de Faro. A redução da espessura da taipa agrava ainda mais o problema, aumentando os dias com HR elevada. As palas de sombreamento aumentam os dias com HR elevada. A ventilação noturna, ao introduzir ar húmido durante a noite nos meses mais quentes, piora ligeiramente a situação, aumentando os dias com HR elevada.

O ar condicionado melhora ligeiramente o controlo da HR, mas a eficácia é limitada devido à alta HR exterior. A adição de ar condicionado à taipa não regulamentar mostra uma pequena melhoria, mas ainda assim não é suficiente para um controle efetivo da HR. A combinação de palas de sombreamento com ar condicionado resulta num desempenho pior. A combinação de estratégias (AC), enfrenta desafios significativos devido ao clima húmido de Faro, apresentando o mesmo número de dias que a simulação NR com HR dentro dos intervalos estabelecidos.

4.4.2. Humidade Relativa Interior Média Mensal

Em adição à análise que quantifica o número de dias com as humidades relativas interiores entre os 30% e os 60%, procurou fazer-se também a análise das humidades relativas médias mensais e diárias para as duas soluções construtivas nas duas cidades em estudo. A variação anual da humidade relativa em Évora e Faro apresenta-se distinta devido às suas características climáticas específicas.

De seguida estão apresentadas duas figuras, cada uma apresentando os valores das humidades relativas médias mensais no interior e exterior do edifício para Évora e Faro. A Figura 4.11 é relativa a Évora e a Figura 4.12 relativa a Faro.

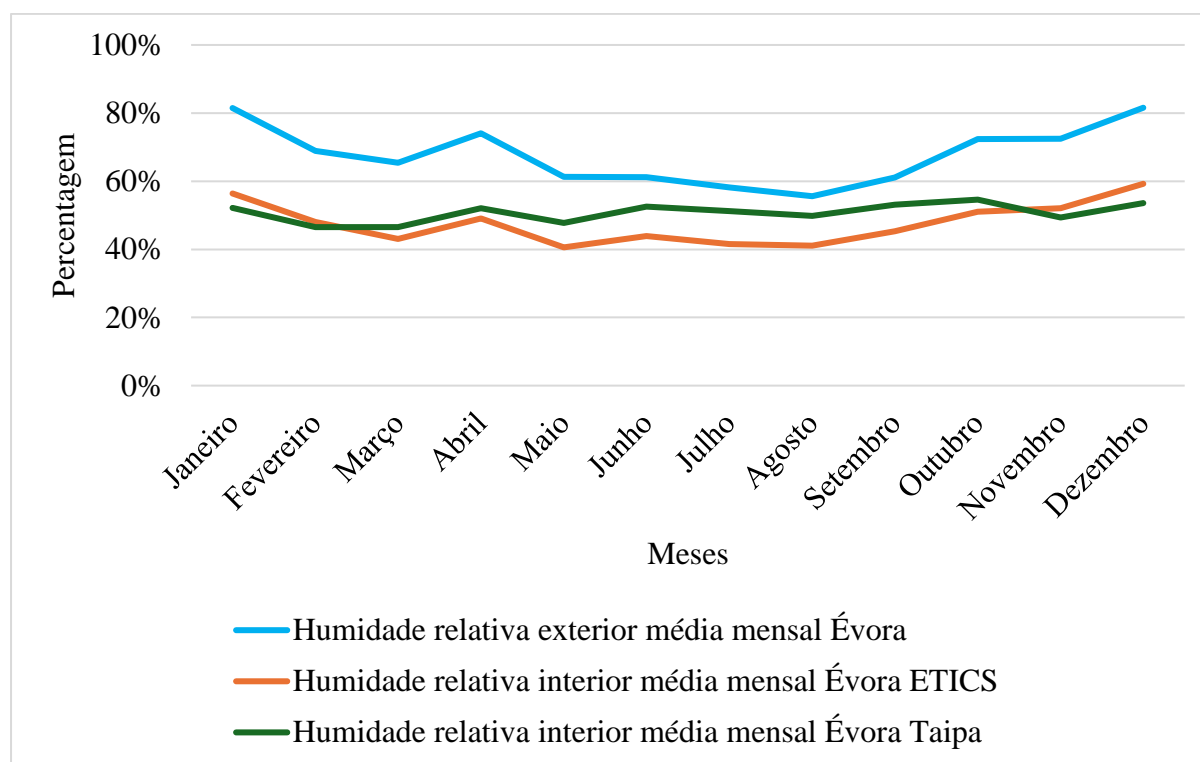


Figura 4.11 - Dados mensais da humidade relativa de Évora.

Em Évora, como é observável na Figura 4.11, a humidade relativa exterior média mensal varia significativamente ao longo do ano, oscilando entre aproximadamente 80% nos meses mais frios, como janeiro e dezembro, e cerca de 55% em agosto. A humidade relativa interior reflete essas variações de forma mais moderada, particularmente no caso da construção em taipa, que demonstra uma capacidade superior de regulação da HR. Para os edifícios com ETICS, a HR interior média mensal atinge máximos próximos de 60% nos meses de inverno e mínimos de cerca de 40% no verão. No caso da taipa, os valores são mais constantes, variando entre 45% e 55%, o que evidencia um desempenho muito estável e positivo na regulação da HR.

A humidade relativa exterior média mensal em Évora é de 67,79%, enquanto a humidade relativa interior média mensal é de 47,60% para ETICS e 50,78% para taipa. A amplitude da humidade relativa exterior é de 25,98%, sendo amplitude da humidade relativa interior de 18,65% para ETICS e 8,07% para taipa.

Os valores máximos de humidade relativa exterior ocorrem em dezembro (81,57%) e os mínimos em agosto (55,59%). Para ETICS, os valores máximos ocorrem em dezembro (59,24%) e os mínimos em maio (40,58%). Para taipa, os valores máximos ocorrem em outubro (54,60%) e os mínimos em fevereiro (46,52%).

Durante os meses mais húmidos (novembro a março), a humidade relativa exterior média mensal é de 73,95%, com valores interiores de 51,74% para ETICS e 49,63% para taipa. Nos meses mais secos (maio a setembro), as médias são 59,46% exterior, 42,48% ETICS e 50,90% taipa. Notavelmente, nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, a humidade relativa interior em ETICS supera a da taipa, indicando a inércia higroscópica superior da taipa.

Nos meses secos, a humidade relativa interior é mais alta em taipa (50,90%) do que em ETICS (42,48%), o que pode ser benéfico para evitar condições excessivamente secas.

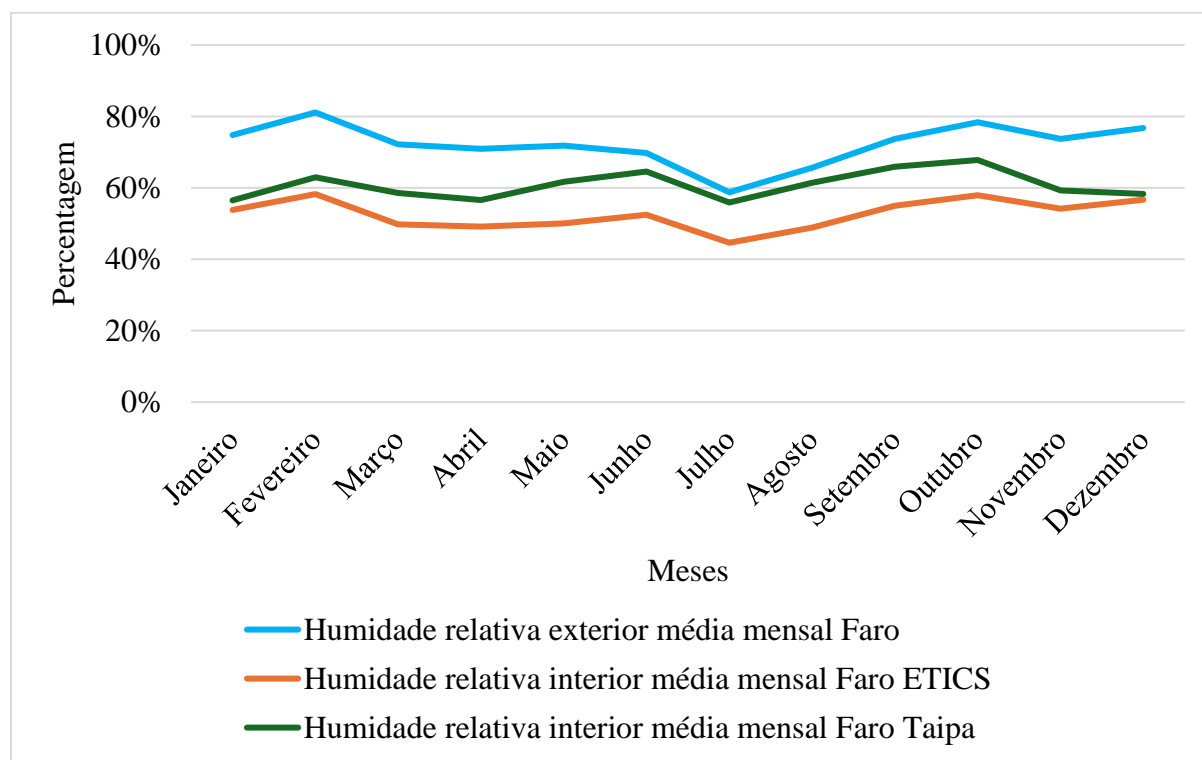


Figura 4.12 - Dados mensais da humidade relativa de Faro.

A humidade relativa exterior média mensal em Faro é de 72,30%, refletindo a proximidade com o mar e um clima mais ameno, sendo a humidade relativa interior de 52,56% para ETICS e 60,80% para taipa. A amplitude da humidade relativa exterior é de 22,35%, sendo 13,63% para ETICS e 11,90% para taipa. A menor amplitude de variação (11,90% para taipa)

em Faro comparada com Évora, indica que a taipa é menos eficaz em climas mais húmidos e estáveis, possivelmente devido à saturação da sua capacidade higroscópica.

Os valores máximos de humidade relativa exterior ocorrem em fevereiro (81,12%) e os mínimos em julho (58,77%). Para ETICS, os valores máximos ocorrem em fevereiro (58,26%) e os mínimos em julho (44,63%). Para taipa, os valores máximos ocorrem em outubro (67,80%) e os mínimos em julho (55,90%).

Durante os meses mais húmidos (novembro a março), a humidade relativa exterior média mensal é de 75,71%, com valores interiores de 54,53% para ETICS e 59,14% para taipa. Nos meses mais secos (maio a setembro), as médias são 67,95% exterior, 50,20% ETICS e 61,90% taipa.

Para Faro, nota-se que a taipa não consegue apresentar as mesmas vantagens que apresenta no clima seco de Évora em que a taipa fazia uso da sua elevada inércia higroscópica para manter os níveis de humidade relativa interna próxima dos 50%.

4.4.3. Humidade Relativa Interior Média Diária

As Figuras 4.13 e 4.14 representam as humidades relativas exteriores e interiores médias diárias das diferentes soluções construtivas, sendo o gráfico de cima em Évora e o gráfico de baixo em Faro.

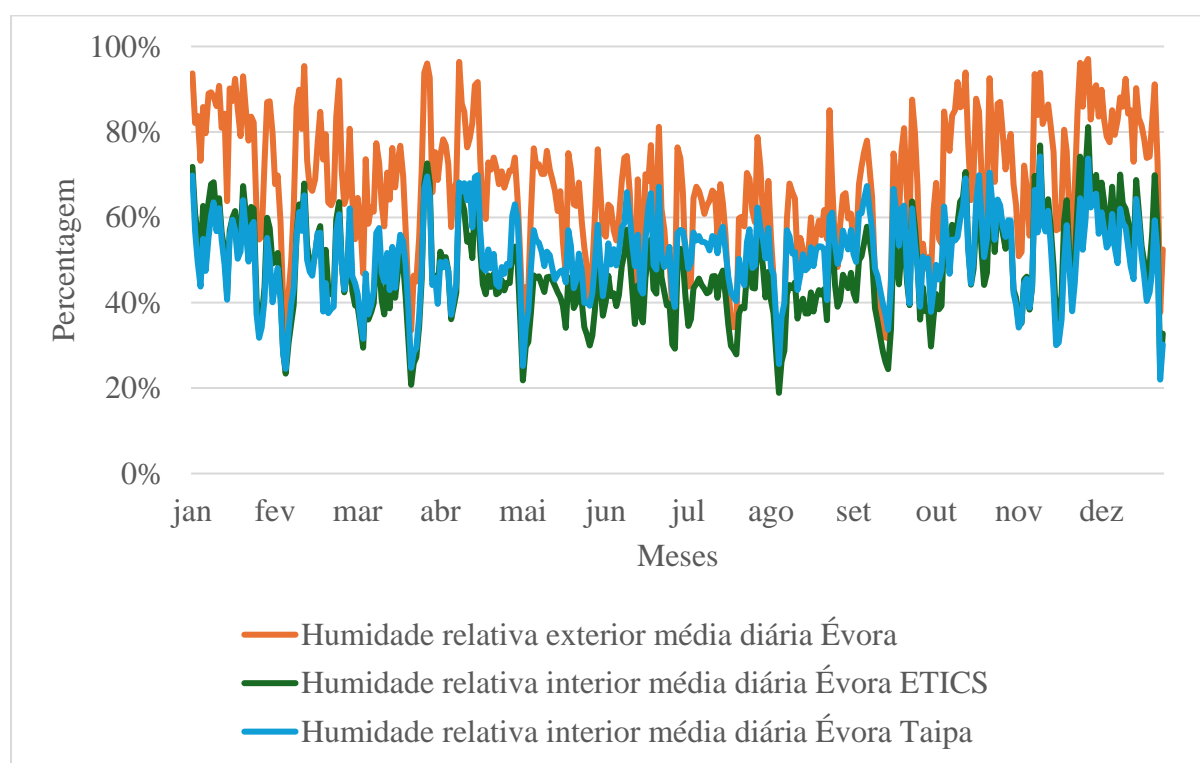


Figura 4.13 - Dados diários das humidades relativas de Évora.

- Évora Análise Diária

A humidade relativa exterior média diária é de 67,78%, sendo 47,59% para o edifício com ETICS e 50,81% para o edifício em taipa. A amplitude anual, ou seja, a diferença entre o valor máximo e mínimo das médias diárias ao longo do ano, é de 75,04% no exterior, 62,24% para ETICS e 52,26% para taipa. Os picos diários de humidade relativa exterior variam entre 97,07% e 22,03%, em ETICS entre 81,13% e 18,89%, e em taipa entre 74,25% e 21,99%.

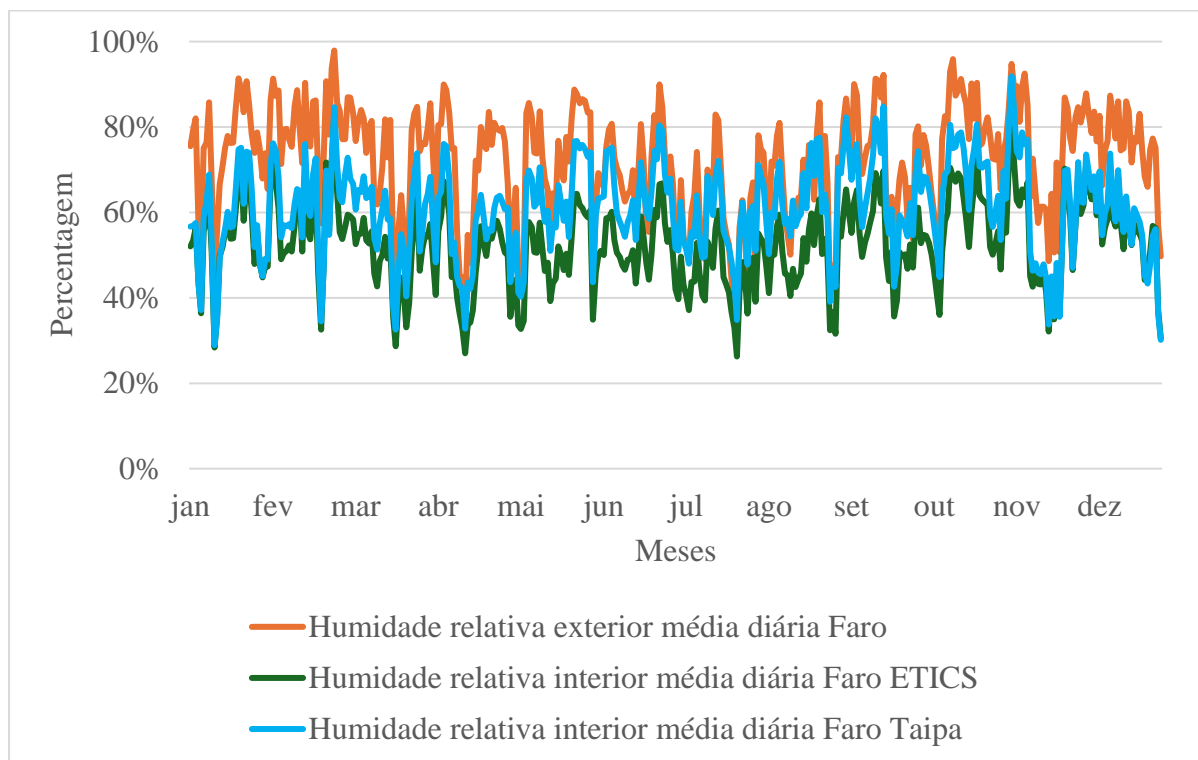


Figura 4.14 - Dados diários das humidades relativas de Faro.

- Faro Análise Diária

A humidade relativa exterior média diária é de 72,23%, sendo 52,51% para ETICS e 60,78% para taipa. A amplitude diária exterior é de 64,09%, enquanto para ETICS é 56,71% e para taipa 62,97%. Os picos diários de humidade relativa exterior variam entre 97,91% e 33,81%, em ETICS entre 82,98% e 26,26%, e em taipa entre 91,87% e 28,90%.

4.4.4. Influência do Clima na Inércia Higroscópica da Taipa

A variação anual da humidade relativa interna em Évora e Faro reflete as diferenças climáticas entre estas localidades.

A humidade relativa exterior em Évora apresenta maiores variações sazonais, com máximos no inverno e mínimos no verão. O clima de Évora, caracterizado por verões quentes e secos e invernos frios e húmidos, favorece a regulação da humidade pela taipa devido à sua capacidade de adsorver humidade durante os períodos húmidos e libertá-la durante os períodos

secos. Esta dinâmica climática permite à taipa utilizar plenamente sua inércia higroscópica para estabilizar a humidade interior, resultando em melhores condições de conforto e salubridade.

Por outro lado, em Faro, o clima é mais ameno e com humidades relativas elevadas durante todo o ano, com amplitude menor, indicando um clima mais estável e mais húmido devido à proximidade com a orla costeira, reduz a eficácia da taipa, possivelmente atingindo um ponto de saturação onde a capacidade de regulação é limitada.

A inércia higroscópica da taipa, associada à sua capacidade de adsorção e desadsorção de vapor de água, permite uma regulação eficiente da humidade interior. Os gráficos fornecidos indicam que a taipa consegue manter a humidade relativa interior entre 40% e 60%, mesmo quando a humidade relativa exterior varia entre extremos de 20% e 95%. Este efeito é mais evidente em climas como o de Évora, onde a HR exterior varia significativamente.

Em contraste, em climas húmidos como o de Faro, a elevada humidade relativa exterior sobrecarrega a capacidade natural da taipa de regular a humidade, reduzindo a sua eficácia. Esta limitação é relevante ao considerar a aplicação de construções em taipa em diferentes contextos climáticos. A capacidade da taipa de amortecer as variações de humidade relativa é fundamental para criar ambientes interiores confortáveis e saudáveis, minimizando o risco de condensações internas e o crescimento de fungos, contribuindo assim para a salubridade dos espaços habitacionais.

4.4.5. Comparação entre R e NR em Taipa

Em Évora, a comparação entre as duas espessuras de taipa (R – 60 cm e NR – 36 cm) mostra que, apesar das diferenças estruturais, ambas apresentam comportamentos semelhantes na regulação da humidade relativa interior, devido às características higroscópicas da taipa. A espessura adicional de taipa, de 60 cm, não oferece um benefício proporcionalmente significativo em relação à de 36 cm. Isso pode ser explicado pela alta capacidade higroscópica inerente da taipa, que, independentemente da espessura.

Estudos sobre materiais de construção em terra, como os de Paulina Faria e José Lima [26], indicam que os rebocos de terra, devido aos minerais argilosos, têm uma capacidade extremamente elevada de adsorver e libertar vapor de água em resposta às variações da humidade relativa do ambiente. Este comportamento higroscópico, típico de materiais porosos à base de terra, como a taipa, é evidenciado em estudos que mostram como estes materiais podem moderar eficazmente a humidade interior, mantendo-a dentro de limites confortáveis. Mesmo com uma espessura de reboco relativamente fina (1 a 2 cm) [26], os materiais de terra são capazes de regular a humidade em ciclos diários de utilização. No caso da taipa, a sua espessura mais elevada apenas amplifica a sua capacidade de regulação ao longo de ciclos mais longos, como o anual, mas os resultados indicam que o aumento de espessura de 36 cm para 60 cm não gera um benefício proporcional significativo. Estes resultados alinham-se com o comportamento higroscópico da taipa observado, que mantém a humidade relativa dentro de limites adequados ao conforto interior.

Em Évora, a simulação R tem 293 dias dentro do intervalo, enquanto a NR tem 289 dias.

Em Faro, a performance é similar, mas a taipa apresenta uma menor capacidade de regulação da humidade devido ao clima mais húmido pela proximidade à orla costeira. Na cidade algarvia, a diferença é mais acentuada, com R apresentando 192 dias e NR apenas 177 dias dentro do intervalo.

Esta diferença evidencia a importância do clima exterior na escolha da solução construtiva e respetivos materiais de construção, mais do que na espessura da taipa na regulação da humidade relativa.

4.4.6. Estratégias de Ventilação Noturna

A ventilação noturna é uma estratégia eficaz para a regulação da humidade interior, especialmente durante os meses mais quentes. A introdução de ar fresco durante a noite, quando as temperaturas são mais baixas, ajuda a reduzir a humidade acumulada durante o dia. Os dados mostram que esta estratégia é particularmente eficaz em Évora, onde as variações de temperatura são mais pronunciadas. No entanto, em climas como o de Faro clima mais ameno e húmido, onde a HR exterior é elevada durante a noite, a ventilação noturna pode introduzir mais humidade para o interior do edifício, agravando a concentração de humidade.

4.4.7. Impacto do Ar Condicionado

A introdução do ar condicionado melhora significativamente os resultados em termos de número de dias dentro do intervalo de humidade relativa recomendável (30%-60%). O ar condicionado não apenas controla a temperatura, mas também remove o excesso de humidade do ar, criando um ambiente interior mais confortável. Em ETICS, as simulações RAC, PSAC e AC mostram uma redução significativa nos dias fora do intervalo, comparado com as soluções sem ar condicionado. O mesmo é observado para taipa, onde RAC, NRAC, PSAC e AC apresentam um melhor desempenho na regulação da humidade.

4.4.8. Considerações Finais

A análise dos dados demonstra a importância das soluções construtivas e das estratégias de ventilação e condicionamento para a regulação da humidade relativa interior. A taipa, com sua elevada inércia higroscópica, apresenta vantagens significativas em climas como o de Évora, enquanto o uso de ar condicionado é importante para manter a humidade relativa dentro dos níveis recomendados em ambas as cidades.

Para estudos futuros, recomenda-se a introdução da geração interna de humidade nas simulações e a análise detalhada das temperaturas superficiais interiores e teores de humidade, juntamente com o ponto de orvalho, para avaliar a possibilidade de condensações superficiais e a ocorrência de anomalias derivadas da elevada humidade interior.

4.5. Ganhos e Perdas de Calor das Envolventes Opacas

Este capítulo aborda o estudo detalhado dos ganhos e perdas de calor pelas envolventes opacas das duas soluções construtivas nas cidades já referidas. A análise destas envolventes é crucial para compreender as diferenças no comportamento térmico de cada sistema ao longo do ano e para avaliar a eficácia das diferentes soluções construtivas em minimizar os fluxos de calor indesejados.

As Figuras 4.15 a 4.22 apresentadas ilustram os ganhos e perdas de calor pelas envolventes opacas em $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ de área da envolvente opaca todos os meses ao longo de um ano para as duas soluções construtivas nas cidades de Évora e Faro. A área total da envolvente opaca corresponde a $628,34 \text{ m}^2$, sendo $229,42 \text{ m}^2$ a área da envolvente opaca vertical para as duas soluções construtivas diferentes, $200,79 \text{ m}^2$ de área de cobertura e $198,13 \text{ m}^2$ de área de pavimento, envolventes opacas horizontais que partilham a mesma solução construtiva. A avaliação é importante porque as diferenças existentes entre os ganhos e perdas pela envolvente opaca devem-se às diferenças nas soluções construtivas da envolvente opaca vertical.

Para esta análise, foram utilizadas diversas simulações, incluindo as regulamentares (R), não regulamentares (NR, apenas para taipa), com proteções solares (PS), com ventilação noturna (VN), e o efeito combinado das estratégias bioclimáticas juntamente com o ar condicionado (AC). No caso da simulação com ar condicionado, foi utilizada apenas a simulação AC, sem incluir as variantes transitórias de RAC, NRAC e PSAC. Esta abordagem permite uma comparação abrangente das estratégias construtivas e passivas na mitigação dos ganhos e perdas de calor.

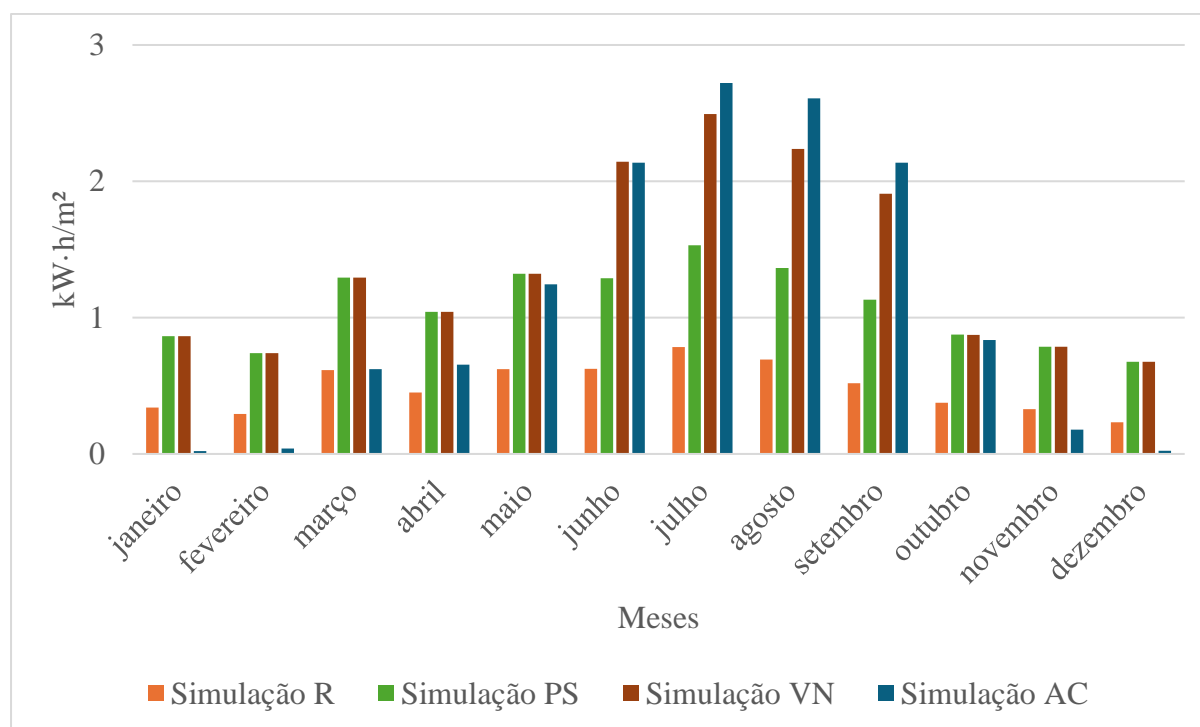


Figura 4.15 - Ganhos de calor pela envolvente opaca em Évora ETICS.

A análise dos ganhos de calor considera a capacidade das diferentes soluções construtivas em minimizar a entrada de calor durante os meses de verão e maximizar a acumulação de calor durante os meses de inverno. Por outro lado, a análise das perdas de calor foca-se na capacidade das soluções em reter calor durante o inverno e evitar perdas excessivas durante o verão. Esta compreensão é fundamental para otimizar o conforto térmico passivo e a eficiência energética das edificações.

Na cidade de Évora, os ganhos de calor para a solução ETICS, Figura 4.15, mostram valores baixos ao longo do ano, com o máximo em julho de $0,78 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ e o mínimo em dezembro de $0,23 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$. Este comportamento indica uma boa capacidade de isolamento térmico, aparentemente eficaz na minimização dos ganhos de calor durante os meses de verão.

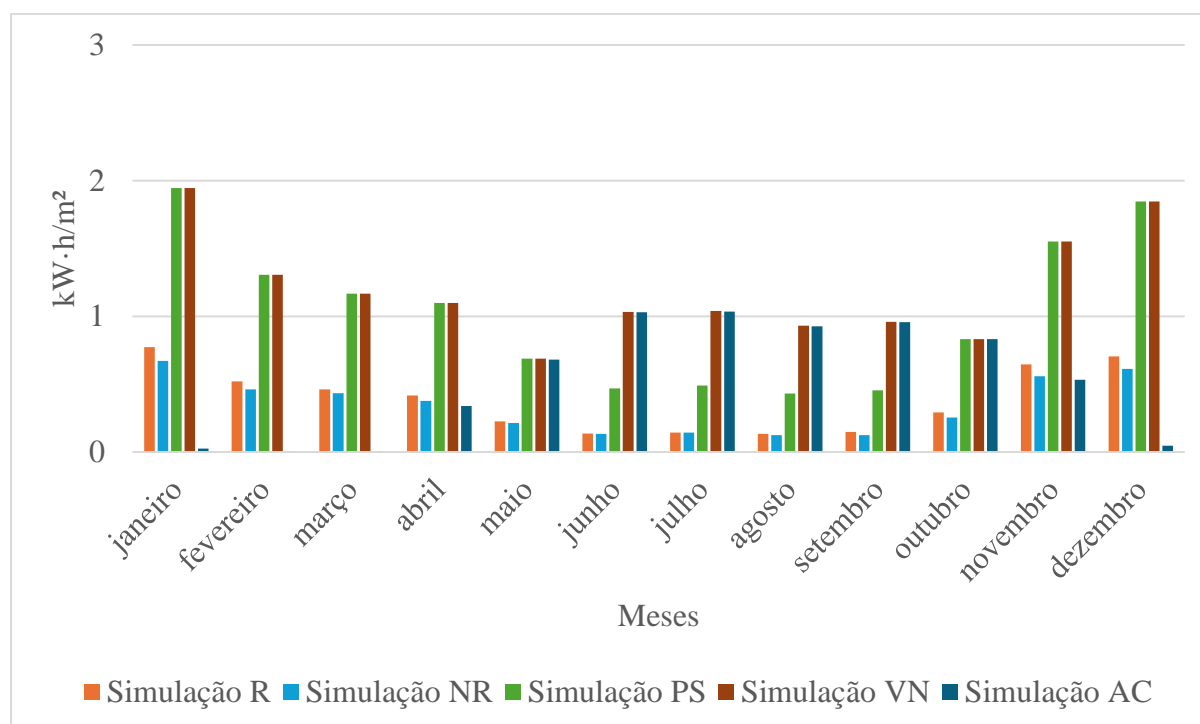


Figura 4.16 - Ganhos de calor pela envolvente opaca em Évora Taipa.

Em contraste, na Figura 4.16, é possível verificar que a solução em taipa apresenta ganhos inferiores no verão, com $0,13 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ em agosto e ligeiramente superiores no inverno $0,77 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ em janeiro. Esta característica da taipa é vantajosa para o conforto térmico passivo, permitindo maior acumulação de calor nos meses frios e menor nos meses quentes, devido à sua elevada inércia térmica.

Quando se analisam as perdas de calor, Figura 4.17, a solução ETICS em Évora demonstra perdas mais elevadas na solução regulamentar, R, durante a maior parte do ano, variando entre $5 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ nos meses de inverno e superando $8 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ em agosto. A adição das proteções solares (PS) reduz estas perdas em aproximadamente $1 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ todos os meses, enquanto a ventilação noturna (VN) mantém os valores similares aos da PS. O ar condicionado (AC) aumenta significativamente as perdas em janeiro, chegando a quase $7 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$, mas mantém-se entre 5 e $6 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ no resto do ano, com exceção de novembro que é de $4,67 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$.

Este maior fluxo de calor do interior para o exterior do edifício nos meses mais frios deve-se à maior diferença de temperaturas entre o interior e exterior do edifício resultante do aumento de temperatura pela ativação do ar condicionado nos meses mais frios.

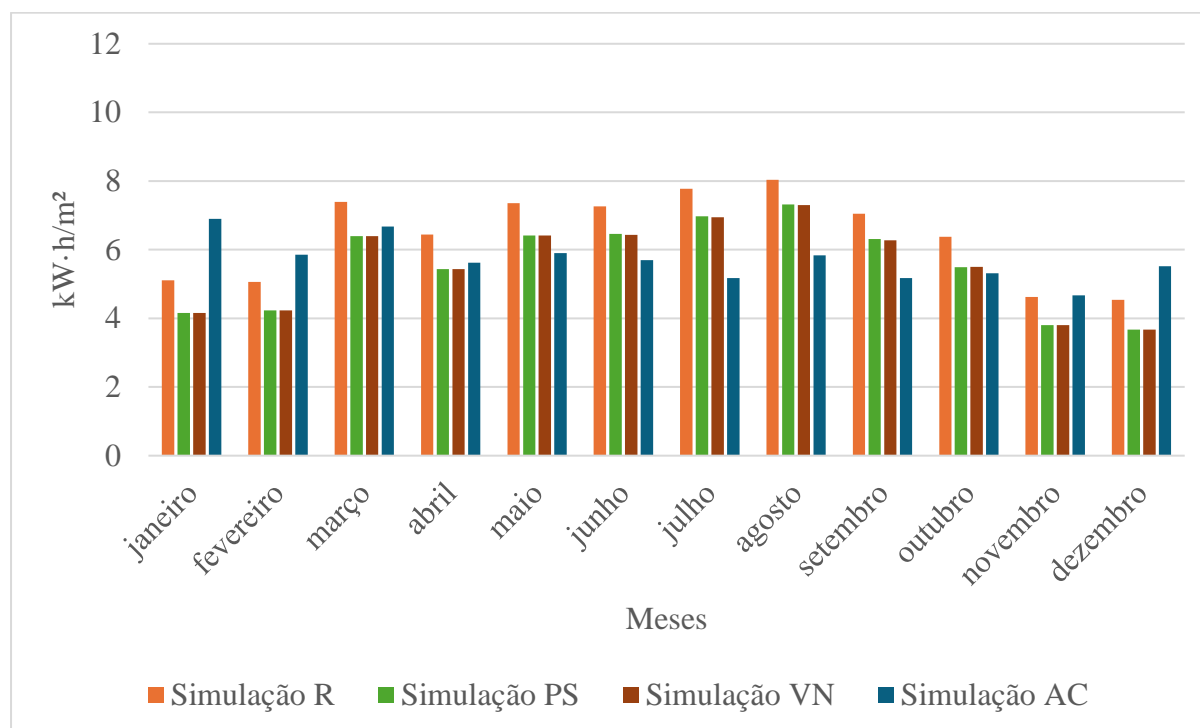


Figura 4.17 - Perdas de calor pela envolvente opaca em Évora ETICS.

Em comparação (Figura 4.18) a solução em taipa apresenta perdas de calor consideravelmente elevadas, superiores a $8 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ de março a outubro, com valores máximos em julho ($11,16 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$) e agosto ($11,17 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$) e perdas de calor inferiores a ETICS no inverno, atingindo $4,94 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ em janeiro e $5,31 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ em fevereiro. A proteção solar na taipa (PS) atenua as perdas em cerca de $1 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ nos meses mais frios e em $0,2$ a $0,3 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ nos restantes meses. O ar condicionado (AC) na taipa resulta num aumento significativo das perdas em janeiro e fevereiro, atingindo $9,26 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ em março, com perdas ligeiramente inferiores no verão em relação à ventilação noturna. O aumento dos valores de perdas nas simulações AC deve-se sempre ao aumento do fluxo de energia do interior para o exterior do edifício nos meses mais frios e do exterior para o interior nos meses de maior calor.

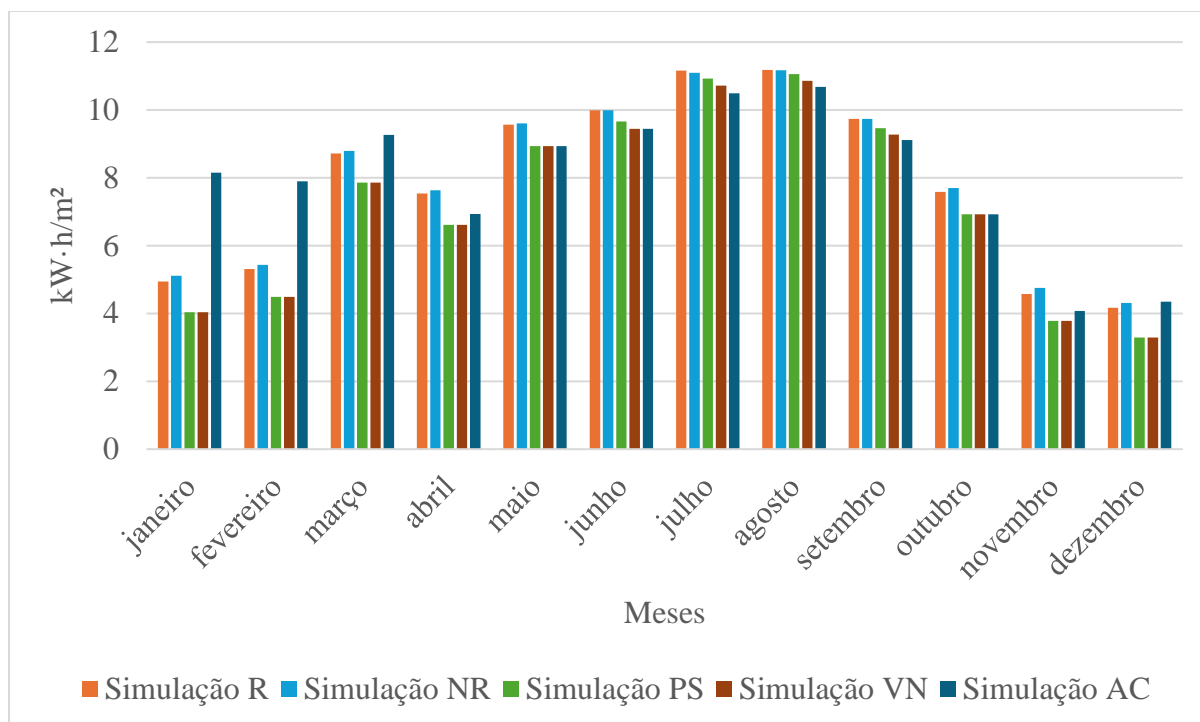


Figura 4.18 - Perdas de calor pela envolvente opaca em Évora Taipa.

Na cidade de Faro, como é possível observar na Figura 4.19, os ganhos de calor para a solução ETICS são semelhantes aos de Évora, para as simulações R, PS e VN, mas ligeiramente inferiores devido às temperaturas exteriores mais amenas.

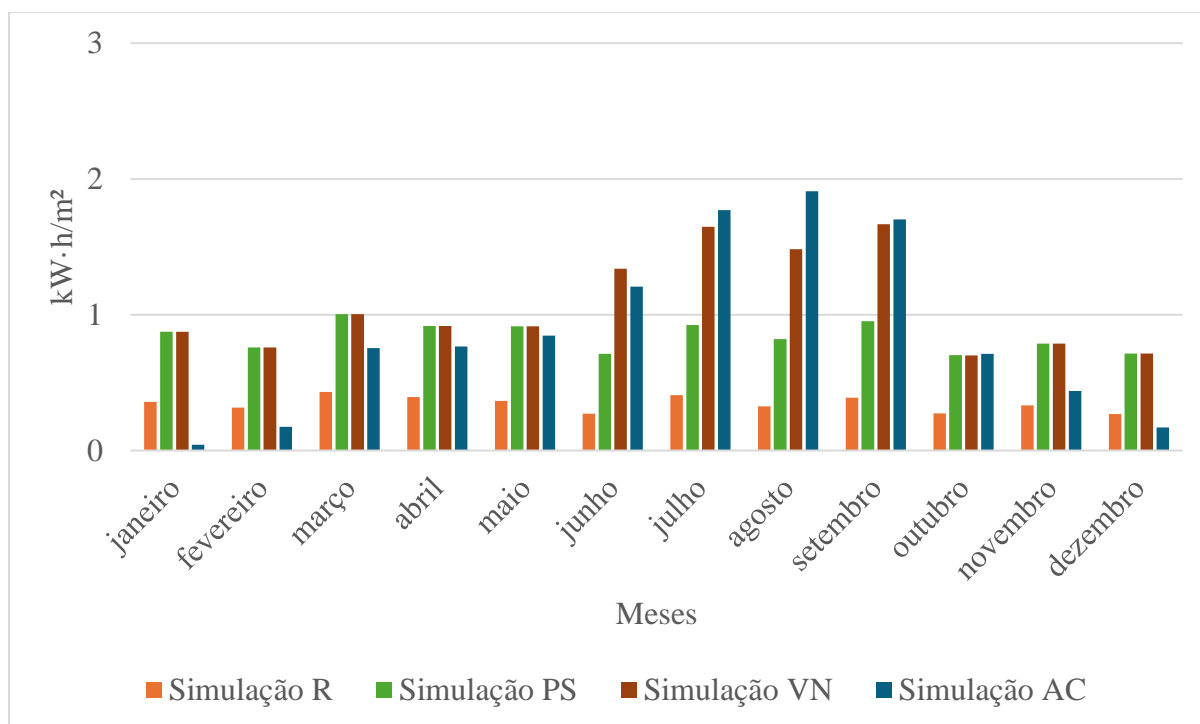


Figura 4.19 - Ganhos de calor pela envolvente opaca em Faro ETICS.

Estes valores variam entre 0 e 1 kW·h/m², para as simulações com estratégias bioclimáticas aplicadas. Quando se adiciona o ar condicionado, este atinge um pico de 1,91 kW·h/m² em agosto e tem valores próximos nos meses imediatamente antes e depois, e tem valores quase nulos no inverno.

Na simulação R solução em taipa em Faro mostra ganhos ligeiramente superiores aos de ETICS no inverno e ligeiramente inferiores no verão, mantendo-se sempre abaixo de 1. Com as proteções solares (PS), os ganhos no inverno aumentam para cerca de 0,6 a 0,8 kW·h/m², enquanto no verão os incrementos são marginais (0,1 a 0,2 kW·h/m²). A ventilação noturna (VN) na taipa apresenta uma diferença irrelevante de 0,2 kW·h/m² entre junho e setembro, com o ar condicionado (AC) resultando em ganhos praticamente nulos durante todo o ano.

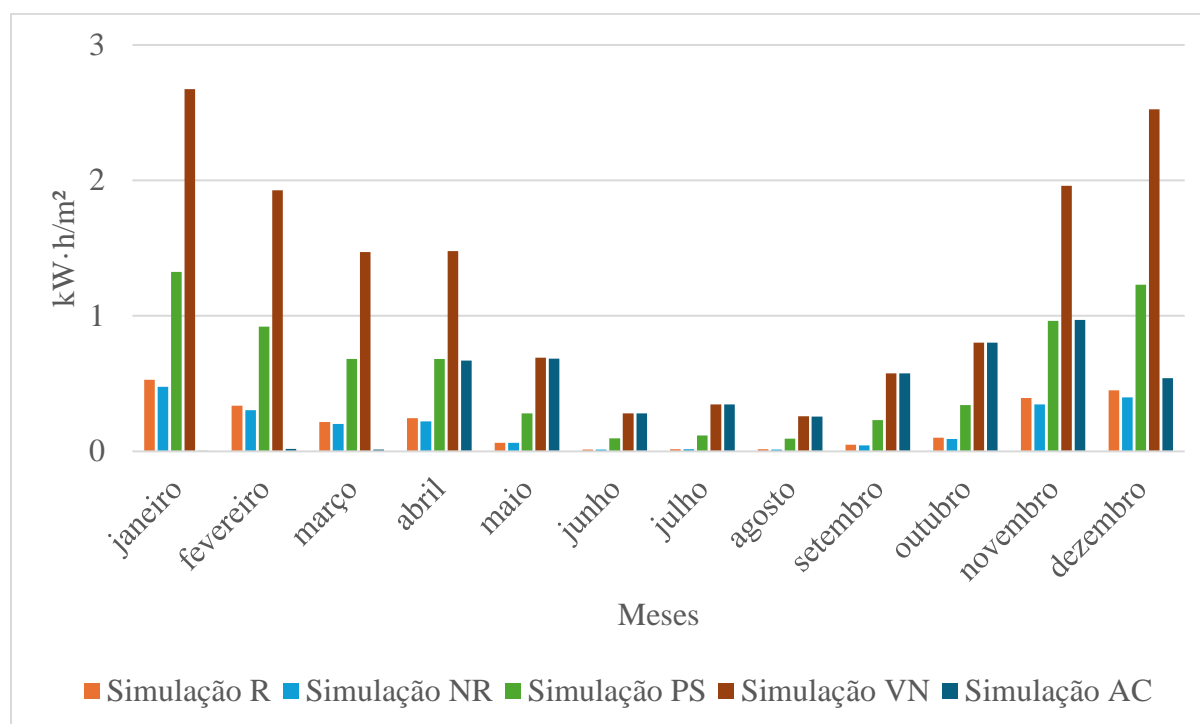


Figura 4.20 - Ganhos de calor pela envolvente opaca em Faro Taipa.

No que concerne às perdas de calor na simulação R, a solução ETICS em Faro apresenta valores entre 5 e 6 kW·h/m² nos meses de inverno, e entre 7 e 8 kW·h/m² nos restantes meses. A PS reduz estas perdas em cerca de 1 kW·h/m² todos os meses, e VN mantém valores iguais aos da PS. A simulação AC mostra perdas próximas dos valores da simulação R em janeiro, fevereiro e dezembro, com valores ligeiramente inferiores em março, abril e outubro, e perdas mínimas de 5 kW·h/m² em julho, indicando uma diferença de quase 2 kW·h/m² em relação à ventilação noturna.

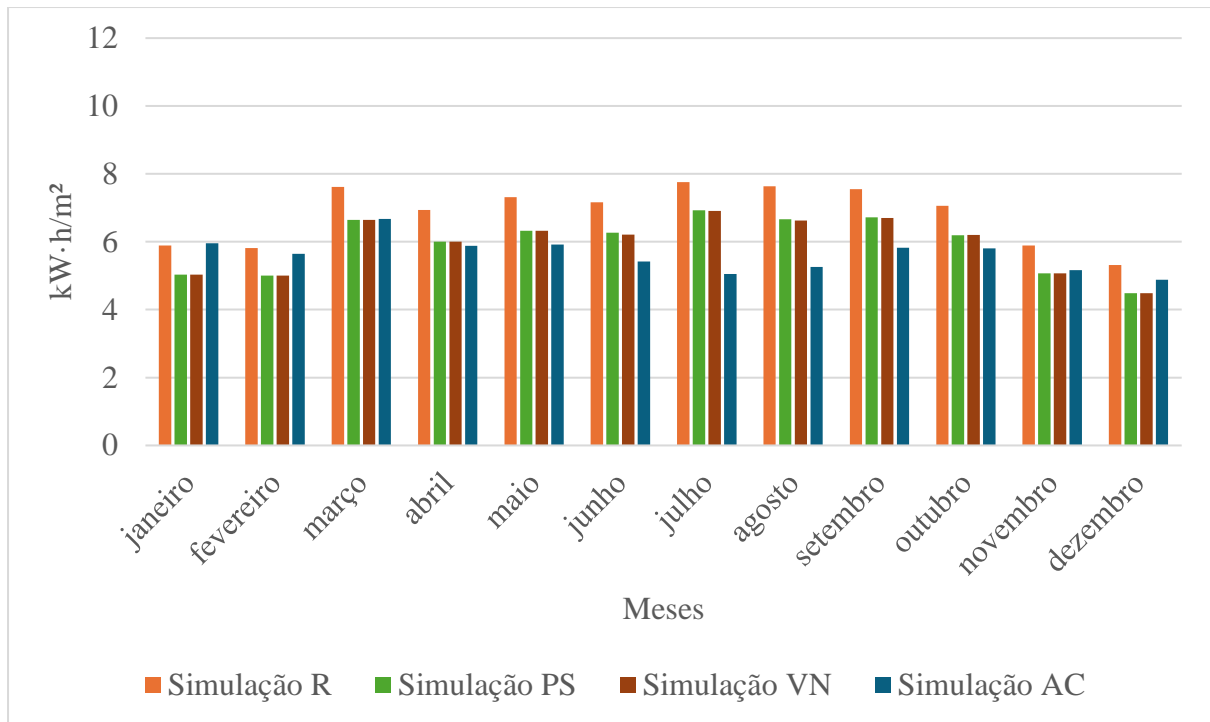


Figura 4.21 - Perdas de calor pela envolvente opaca em Faro ETICS.

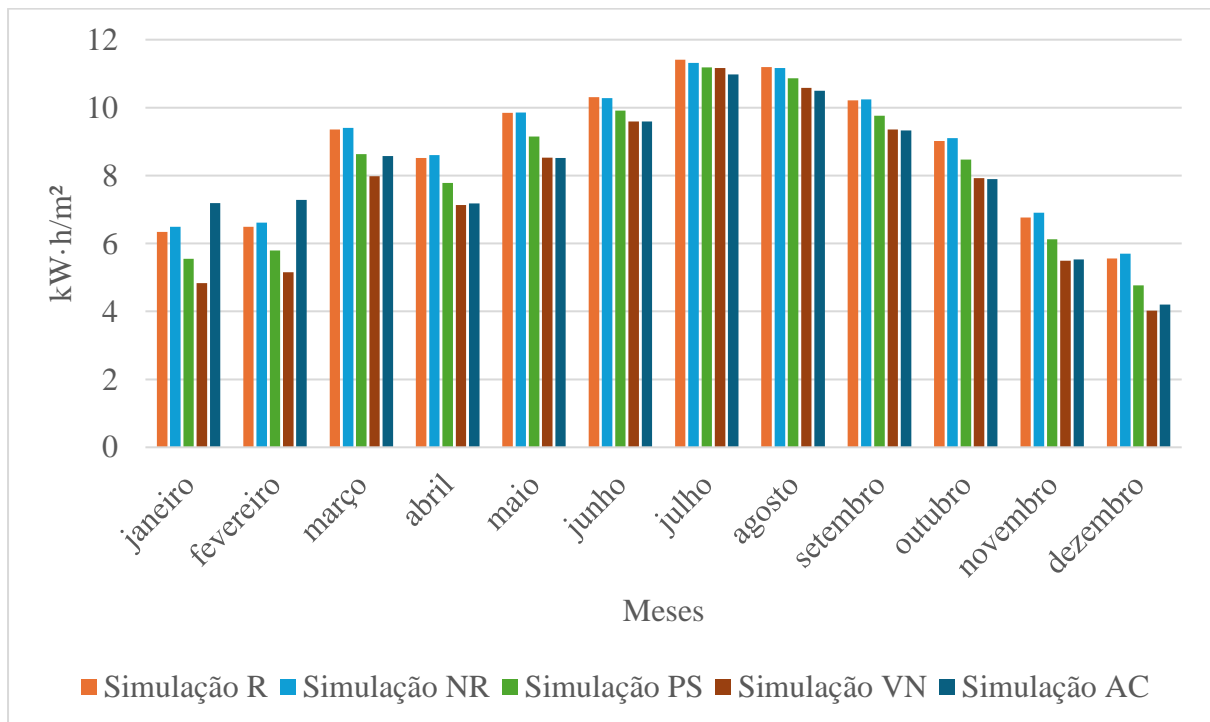


Figura 4.22 - Perdas de calor pela envolvente opaca em Faro Taipa.

Em comparação, a solução R em taipa em Faro apresenta perdas de calor superiores às de ETICS, atingindo mais de 10 kW·h/m² entre junho e setembro, com um pico de 11,41 kW·h/m² em julho e 11,17 kW·h/m² em agosto. No inverno, as perdas são de cerca de 6 kW·h/m², ligeiramente inferiores a ETICS. As proteções solares na taipa reduzem as perdas

em cerca de $1 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ nos meses de inverno, com reduções quase nulas no verão. A ventilação noturna (VN) reduz as perdas em $0,2 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ entre junho e setembro, com o AC a resultar num aumento das perdas em janeiro e fevereiro, mantendo valores semelhantes à VN de abril a novembro. As maiores perdas em janeiro e fevereiro devem-se à maior diferença de temperaturas entre o interior e exterior decorrentes do aquecimento do edifício.

A comparação das simulações R e NR para os casos de taipa em Évora e Faro revela que as diferenças entre as duas simulações são mínimas, tanto nos ganhos quanto nas perdas de calor. Em ambas as cidades, a taipa demonstra um desempenho térmico estável e eficaz, com uma ligeira superioridade nos ganhos de calor no inverno e uma capacidade de moderação no verão. As perdas de calor, embora substanciais durante os meses mais quentes, permanecem consistentes entre as simulações R e NR, indicando que as alterações de espessura introduzidas na simulação NR não afetam significativamente o comportamento térmico das soluções e que a espessura de 36 centímetros de taipa permite obter resultados positivos ao nível da análise térmica.

4.6. Necessidades de Aquecimento e Arrefecimento

Esta análise visa comparar as necessidades nos meses mais quentes, frios e anuais de aquecimento e arrefecimento entre as soluções construtivas em taipa e ETICS, bem como avaliar as diferenças nas diversas simulações realizadas para as cidades de Évora e Faro. Nesta avaliação foi considerada a comparação das soluções construtivas de taipa e ETICS nas simulações RAC, PSAC e AC, comparação das simulações RAC e NRAC para taipa e a comparação da simulação NRAC para Taipa com a simulação RAC para ETICS.

4.6.1. Comparação das Necessidades de Aquecimento em Évora

Para as necessidades de aquecimento nos meses mais frios (janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro), observa-se na Figura 4.23, que a taipa apresenta um desempenho superior ao ETICS em Évora. Na simulação RAC, a taipa necessita de $6,41 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$, enquanto o ETICS requer $7,78 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$, indicando uma redução significativa de energia necessária para aquecimento ao utilizar a solução construtiva em taipa com os valores regulamentares. Contudo, na simulação NRAC, a taipa requer $9,41 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$, um aumento considerável em relação à simulação RAC, demonstrando que a diminuição da espessura em 24 centímetros impacta as necessidades de aquecimento nos meses mais frios. A introdução das proteções solares tem um elevado impacto tanto na solução PSAC com ETICS como com taipa. Valores, sobre os quais a introdução da ventilação noturna nos meses de verão não tem qualquer impacto, uma vez que se está a estudar as necessidades de aquecimento nos meses mais frios.

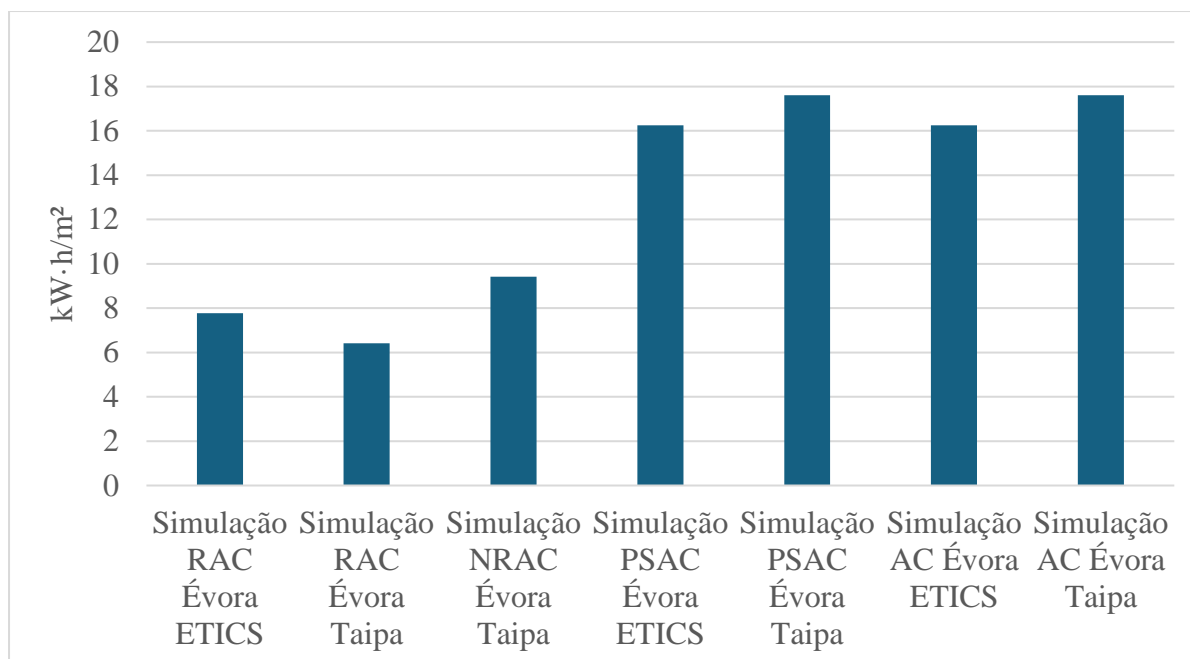


Figura 4.23 - Necessidades de Aquecimento em Évora.

4.6.2. Comparação das Necessidades de Arrefecimento em Évora

Como é observável na Figura 4.24, nos meses mais quentes (maio, junho, julho, agosto e setembro), a taipa demonstra uma clara vantagem sobre o ETICS.

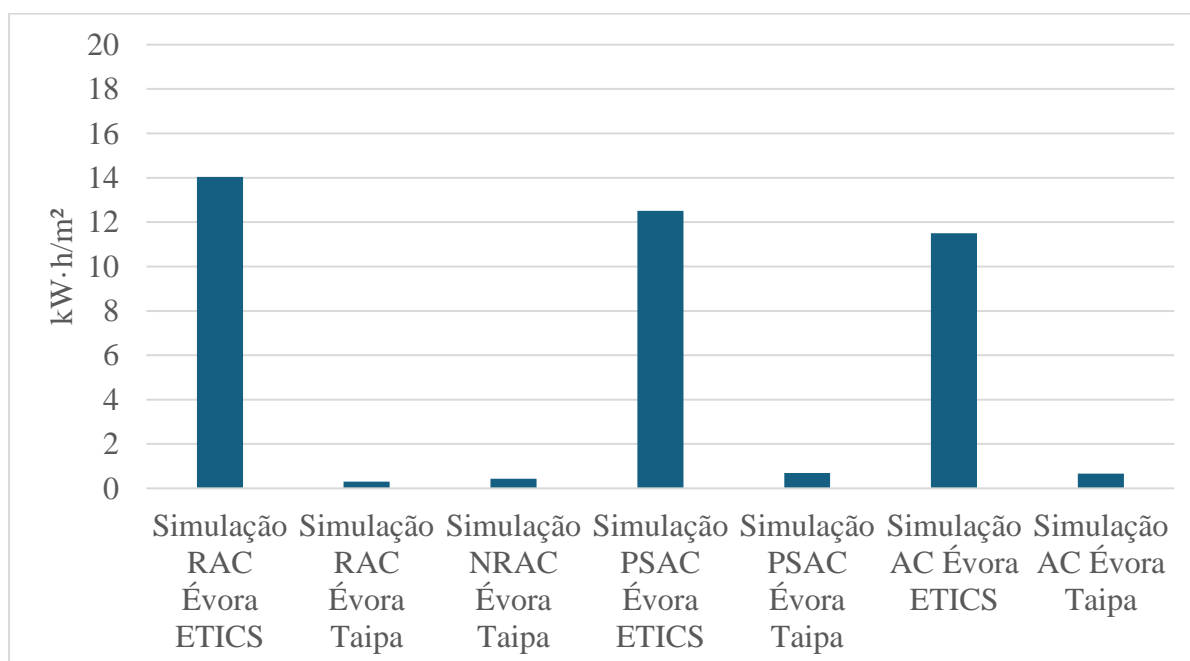


Figura 4.24 - Necessidades de Arrefecimento em Évora.

Em Évora, a simulação RAC mostra uma necessidade de arrefecimento de apenas 0,3 kW·h/m² para taipa, quase 50 vezes inferior em comparação com os 14,04 kW·h/m² para ETICS. Esta enorme diferença destaca a capacidade da taipa de moderar a temperatura interna durante os meses quentes, devido à sua elevada inércia térmica.

A necessidade de arrefecimento para a simulação, NRAC, é de 0,43 kW·h/m², valor ligeiramente superior ao caso regulamentar, mas que ainda assim continua a ser muito inferior ao valor da solução com ETICS. A introdução das proteções solares e da ventilação natural na solução construtiva com ETICS mostra ser positiva, a primeira reduz as necessidades nos meses mais quentes para 12,51 kW·h/m² e a segunda para 11,50 kW·h/m².

Na taipa a introdução das proteções solares na vertente sul do edifício aumenta as necessidades anuais, com um acréscimo de quase 0,2 kW·h/m². Já a introdução da ventilação na taipa mostra resultados positivos, mas com pouco impacto, uma vez que o efeito combinado das medidas reduz apenas 0,03 kW·h/m² relativamente à solução anterior.

4.6.3. Necessidades Totais Anuais em Évora

Analisando as necessidades totais anuais de aquecimento e arrefecimento (Figura 4.25), verifica-se que a taipa oferece uma vantagem significativa em ambas as cidades.

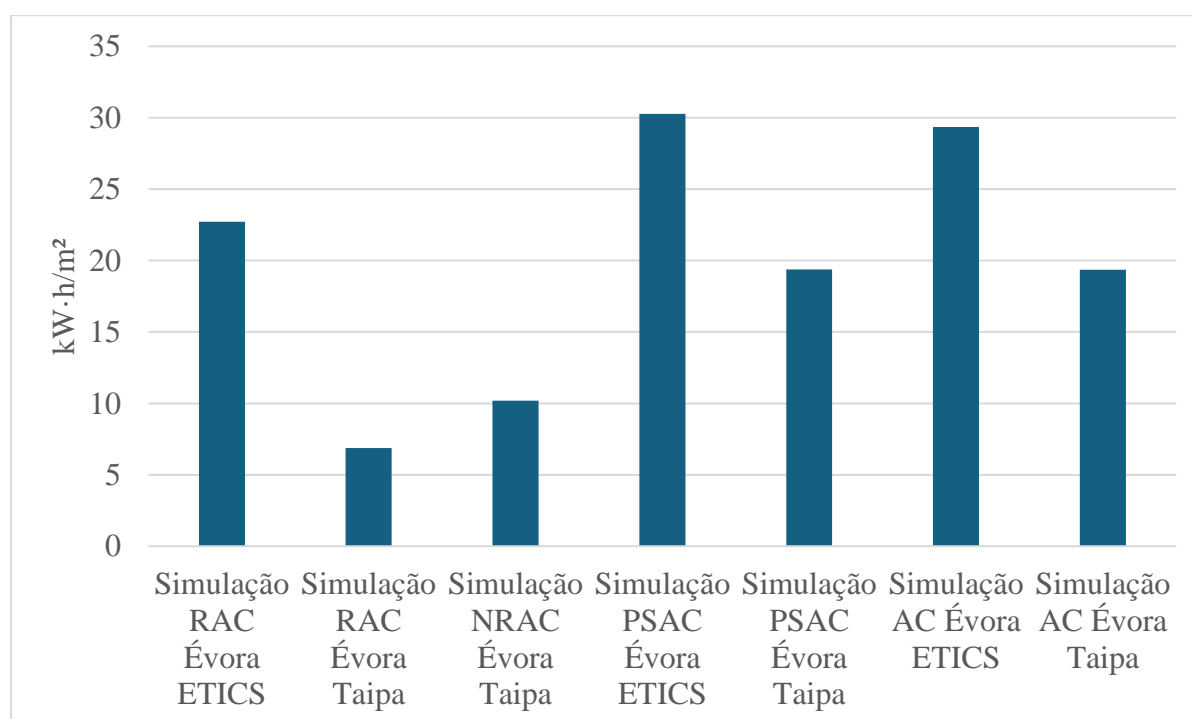


Figura 4.25 - Necessidades de Totais em Évora.

Em Évora, a simulação RAC para taipa mostra uma necessidade total de 6,87 kW·h/m², contra 22,67 kW·h/m² para ETICS, mais do triplo das necessidades. Mesmo na simulação NRAC, a taipa apresenta 10,19 kW·h/m², ainda consideravelmente inferior ao ETICS. Em Évora, a simulação PSAC é desvantajosa para as duas soluções construtivas, visto que para a

taipa requer 19,38 kJ/m² e 30,27 kJ/m² para ETICS. Para as duas soluções construtivas, a introdução da ventilação natural mostra reduzir as necessidades totais das soluções, no entanto o impacto da introdução desta medida é mais significativo para a solução ETICS, reduzindo as necessidades anuais por área de pavimento em quase 1 kW·h/m². A grande diferença entre os resultados verificados entre as duas soluções construtivas deve-se às características dos materiais que as compõem, principalmente pela inércia térmica da taipa que por este meio também é verificada.

4.6.4. Comparação das Necessidades de Aquecimento em Faro

Em Faro, a situação é ligeiramente diferente (Figura 4.26). O clima ameno de Faro apresenta necessidades de aquecimento bastante inferiores às de Évora, cidade que apresenta temperaturas muito baixas nos meses mais frios.

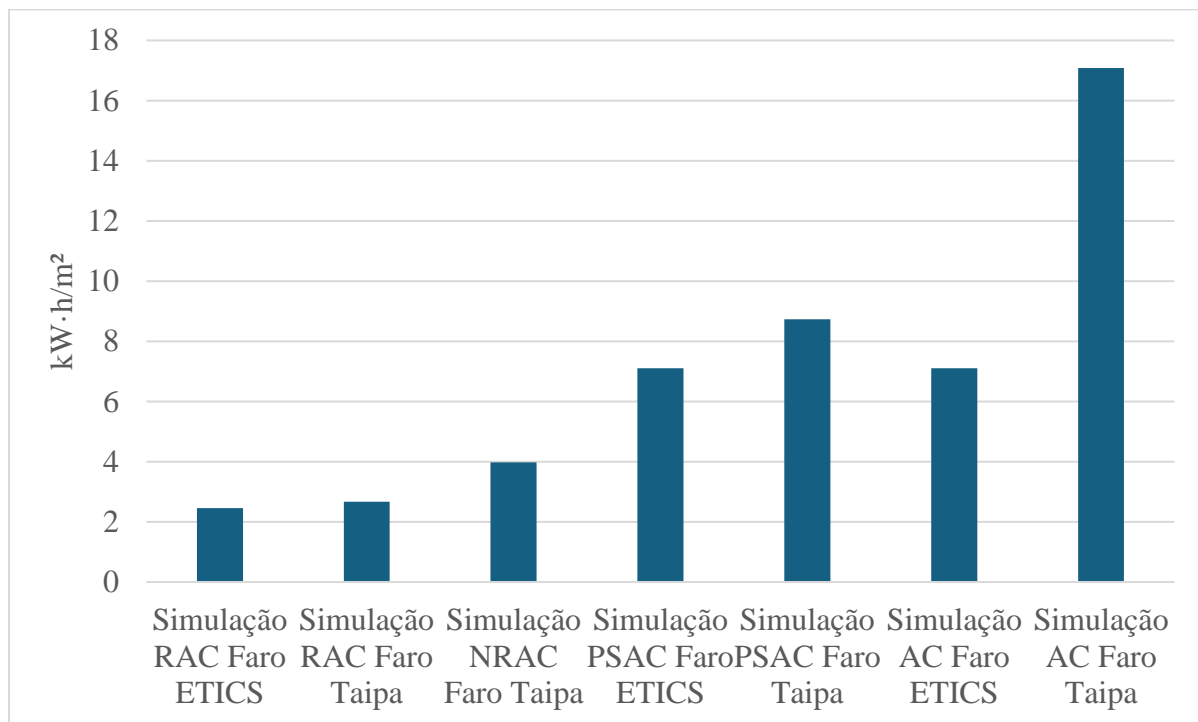


Figura 4.26 - Necessidades de Aquecimento em Faro.

Na simulação RAC, as necessidades de aquecimento são baixas tanto para a taipa, com 2,67 kW·h/m², como para o ETICS, 2,45 kW·h/m². Na simulação NRAC, as necessidades aumentam para 3,97 kW·h/m². A introdução dos dispositivos de sombreamento horizontais fixos na parede orientada a sul, leva a aumentos das necessidades de aquecimento nas duas soluções construtivas, o que não é positivo. As dimensões das palas, como largura, comprimento e altura em relação à janela, foram ajustadas com o objetivo de reduzir as necessidades de arrefecimento nos meses mais quentes, sem causar um impacto negativo substancial no inverno. O simulador utilizado indicou que este dimensionamento oferecia o melhor equilíbrio para um

edifício localizado a uma latitude próxima de Évora e Faro, com maior sombreamento no verão e um impacto reduzido nos meses frios. No entanto, os resultados mostram um aumento nas necessidades de aquecimento devido ao sombreamento indesejado durante o inverno. Este aumento, embora indesejado, deve ser visto em conjunto com o efeito combinado de outras estratégias. Para as simulações AC das duas soluções construtivas, não há alteração de valores, uma vez que o incremento de ventilação noturna não ocorre neste período do ano.

4.6.5. Comparação das Necessidades de Arrefecimento em Faro

Em Faro, a vantagem da taipa também é muito evidente (Figura 4.27). A simulação RAC para taipa apresenta uma necessidade de arrefecimento de 0,20 kW·h/m², enquanto ETICS requer 14,93 kW·h/m², valor quase 75 vezes superior.

A simulação NRAC aumenta muito ligeiramente as necessidades de arrefecimento para a 0,27 kW·h/m², mas a taipa continua a ser substancialmente mais eficiente do que o ETICS. Na solução de arquitetura vernácula a introdução de proteções solares e da ventilação noturna gera alterações irrelevantes. Já no caso ETICS, a introdução dos dispositivos de sombreamento faz diminuir as necessidades de arrefecimento em 1,56 kW·h/m² e a ventilação noturna diminui 1,07 kW·h/m².

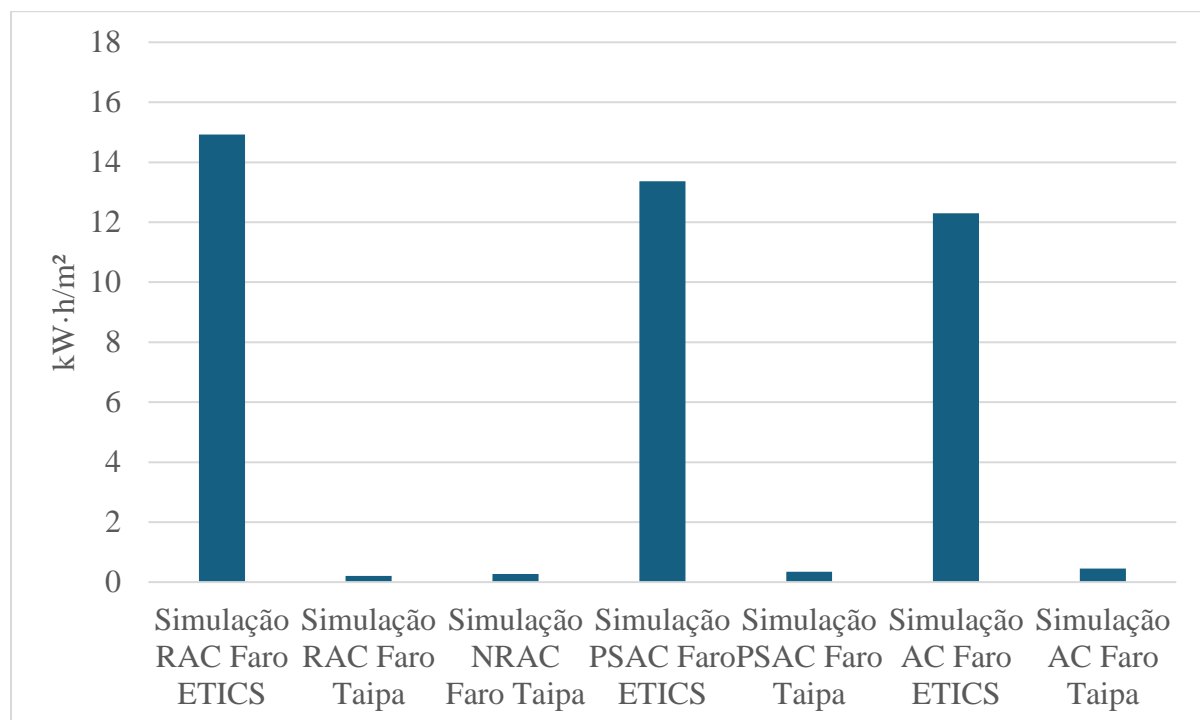


Figura 4.27 - Necessidades de Arrefecimento em Faro.

4.6.6. Necessidades Totais Anuais em Faro

Em Faro, Figura 4.28, a taipa também apresenta menores necessidades totais. Na simulação RAC, são necessários 2,88 kW·h/m², em contraste com 19,01 kW·h/m² para ETICS. Na simulação NRAC, as necessidades aumentam para 4,28 kW·h/m², mas continuam a ser inferiores às do ETICS. A introdução das proteções solares mostram que o seu saldo não é positivo para nenhuma das soluções construtivas, uma vez que o seu objetivo seria diminuir as necessidades de arrefecimento, algo que faz, mas que tem um impacto negativo bastante superior no aumento das necessidades de aquecimento. O saldo entre o impacto do aumento das necessidades de aquecimento e a redução das necessidades de arrefecimento devido à introdução das proteções solares é negativo, aumentando nas necessidades anuais da solução ETICS 2,83 kW·h/m² e na taipa 5,11 kW·h/m², algo que não é desejado, mas este efeito pode ser exacerbado pela interação com outras estratégias adotadas. Da introdução da ventilação noturna não se pode dizer o mesmo, visto que diminui as necessidades totais para os dois casos, sendo tal como para Évora mais impactante na solução convencional, reduzindo 1,07 kW·h/m² às necessidades anuais.

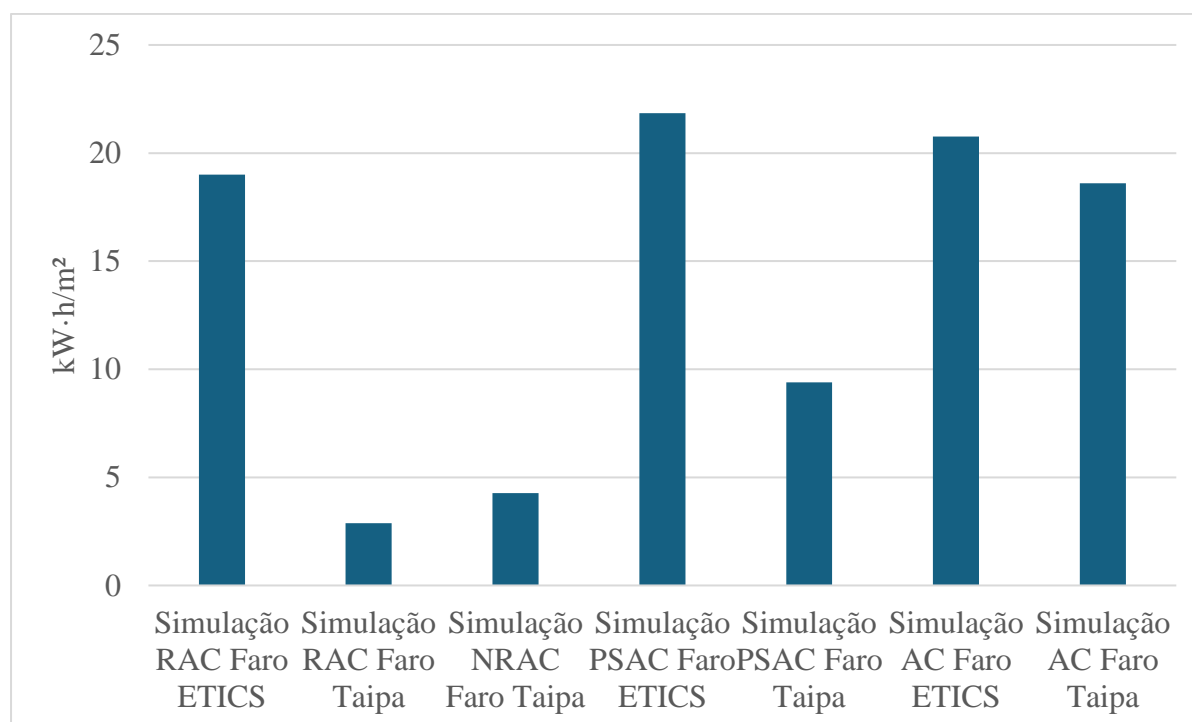


Figura 4.28 - Necessidades Totais em Faro.

4.6.7. Considerações Finais

Os resultados indicam que a taipa é uma solução construtiva altamente eficaz tanto em Évora quanto em Faro, especialmente na redução das necessidades de arrefecimento durante

os meses quentes, uma vez que as necessidades das soluções vernáculas neste período representam 1 a 3% das necessidades de arrefecimento no período homólogo para a solução convencional. A elevada inércia térmica da taipa permite uma moderação mais eficaz das temperaturas internas, reduzindo a necessidade de ar condicionado. Estudos recentes [73] corroboram estas conclusões ao demonstrar que a combinação de estratégias passivas, como ventilação noturna e o sombreamento, podem reduzir as necessidades de arrefecimento até 31,8% e mitigar as temperaturas internas máximas até 5,15°C durante os períodos mais quentes. No período que contém os meses mais frios as necessidades de aquecimento são relativamente próximas, com as diferenças já explicitadas, pelo que são as necessidades de arrefecimento no período mais condicionante do ano para as duas localizações que fazem a diferença nas necessidades totais.

A análise das necessidades de aquecimento e arrefecimento neste estudo não podem servir como termo de comparação com os valores obtidos através dos métodos de certificação energética. Isto porque a regulamentação vigente, não considera perfis reais de ocupação e uso dos edifícios, algo que não reflete fielmente as necessidades energéticas reais dos habitantes. Os perfis de ocupação são críticos para uma avaliação precisa das necessidades energéticas e, ao ignorá-los, a regulamentação corre o risco de subestimar ou superestimar as exigências de aquecimento e arrefecimento. A introdução de perfis de ocupação mais realistas nas avaliações regulamentares poderia fornecer uma representação mais precisa do comportamento energético dos edifícios, ajustando-se melhor com os modos de habitar dos portugueses.

Esta abordagem não só garantiria uma avaliação mais fiel das exigências energéticas de aquecimento e arrefecimento, como poderia resultar em políticas e estratégias de construção mais eficazes, promovendo uma eficiência energética superior e um melhor conforto térmico nas habitações, permitindo adaptar as soluções construtivas aos padrões de uso quotidiano dos portugueses. O estudo de Idrissi Kaitouni et al.[73], em que foram realizadas simulações dinâmicas e em que foi criado um protótipo físico para validação dos resultados, também sugere que estratégias como a ventilação noturna, em conjunto com materiais de elevada inércia térmica como a taipa, podem reduzir significativamente as horas de sobreaquecimento e o consumo energético associado aos sistemas de climatização, mostrando que os resultados da presente dissertação se enquadram com os resultados obtidos noutros estudos com metodologia de análise semelhante.

O sombreamento ajustável e a ventilação natural, que poderiam ser otimizados com base nos horários e modos de ocupação, maximizando o conforto térmico e reduzindo a dependência de sistemas mecânicos de climatização. Em adição a isto, a promoção do uso de materiais locais com elevada inércia higrotérmica, como a taipa, ajustados às condições climáticas específicas e à ocupação do edifício, poderia contribuir significativamente para melhorar o desempenho energético. A taipa, pela sua capacidade de moderação térmica, mostrou-se particularmente eficaz na redução das necessidades de arrefecimento nos meses quentes, o que é crucial em regiões como Évora e Faro, onde estas necessidades constituem a maior fatia do consumo energético total.

Para isso, a regulamentação também deveria rever a sua abordagem estática, e considerar as vantagens de materiais com alta inércia térmica em detrimento de soluções convencionais

que muitas vezes descuram o comportamento passivo dos edifícios. A adoção destas práticas poderia ser apoiada por programas de incentivo à reabilitação e construção de edifícios com materiais vernáculos combinando tradição com inovação, de forma a promover construções mais sustentáveis e eficientes. A aplicação de tais estratégias e políticas, baseadas em perfis de ocupação realistas, permitiria uma maior eficiência energética e uma melhor adequação das habitações aos modos de vida dos portugueses, resultando em edifícios mais confortáveis e sustentáveis.

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusão

O principal objetivo desta dissertação foi analisar e comparar o comportamento térmico e energético de um edifício de habitação, com paredes em taipa, com uma solução convencional de alvenaria simples de tijolo furado com isolamento térmico pelo exterior (ETICS). Para atingir este objetivo, foram realizadas simulações dinâmicas com a ferramenta *EnergyPlus*, utilizando diferentes contextos climáticos representativos de duas cidades portuguesas onde a construção em taipa é utilizada.

A metodologia adotada centrou-se na criação de modelos detalhados do edifício, com duas abordagens construtivas distintas. As simulações permitiram obter dados sobre o desempenho das soluções construtivas face às variações de temperatura e humidade ao longo do ano, analisando as perdas e ganhos de calor e as necessidades de aquecimento e arrefecimento. Adicionalmente, foram implementadas estratégias bioclimáticas, como o uso de palas de sombreamento e ventilação noturna, para avaliar o impacto destas medidas nos parâmetros analisados. Estas estratégias foram aplicadas progressivamente para observar o efeito combinado de cada solução sobre o desempenho energético.

A temperatura interior é um fator crítico na análise do conforto térmico e do desempenho energético dos edifícios. A solução em taipa demonstrou uma elevada capacidade de manter temperaturas interiores mais estáveis e próximas do intervalo de conforto estabelecido entre os 18°C e os 27°C ao longo do ano, em comparação com o sistema ETICS. Os dados indicam que, em Évora, durante os dias de maior calor, a temperatura máxima interior no edifício construído em taipa com espessura regulamentar foi de 28,18°C, enquanto na solução ETICS essa temperatura atingiu 39,71°C. Este resultado reflete a capacidade da taipa de amortecer as variações de temperatura, limitando o sobreaquecimento e promovendo um ambiente interior mais confortável. A diferença de mais de 11°C entre as duas soluções construtivas demonstra a capacidade da taipa na moderação das temperaturas, resultado diretamente relacionado com a sua elevada inércia térmica. Tal como referido no capítulo 4.3.4. Desempenho da Inércia Térmica, os valores de temperaturas interiores da taipa com espessura não regulamentar são muito próximos dos valores regulamentares, mostrando que a regulamentação vigente é muito restritiva para os edifícios em taipa. Este comportamento térmico evidencia o efeito amortecedor da taipa

nas variações térmicas diárias, fator crucial para assegurar o conforto térmico dos ocupantes, especialmente em climas com grandes variações diárias de temperatura, como é exemplo Évora.

No que diz respeito à humidade relativa interior, a taipa também apresentou um desempenho superior, particularmente em Évora, onde as características do clima seco favorecem o comportamento higroscópico da taipa. A inércia higroscópica deste material permitiu manter a humidade relativa interior dentro de uma faixa mais estável, variando entre 45% e 55% ao longo do ano. A análise dos dados mostra que, durante os meses de inverno em Évora, a humidade relativa interior no edifício com taipa foi, em média, inferior à observada na solução ETICS e no verão, a humidade relativa interior na taipa foi superior à de ETICS. Estes resultados demonstram a capacidade da taipa de regular a humidade interior de forma mais eficiente do que a solução ETICS. Em Faro a taipa teve um desempenho ligeiramente inferior, com a humidade relativa interior mensal variando entre 55,9% e 67,8%.

A análise dos ganhos e perdas de calor pelas envolventes opacas revelou que a solução em taipa apresentou um desempenho superior em comparação com a solução ETICS, tanto em Évora quanto em Faro. A análise dos ganhos e perdas de calor pelas envolventes opacas revelou diferenças significativas entre as soluções estudadas. A taipa R apresentou para as duas cidades menores ganhos de calor durante o verão relativamente à solução ETICS. Estes resultados refletem a eficácia da taipa R na redução da entrada de calor, especialmente durante os meses mais quentes, contribuindo para uma menor necessidade de arrefecimento. No inverno, a taipa R também se destacou por apresentar menores perdas de calor em Évora e Faro, comparado com os valores registados pela solução ETICS. Este desempenho superior da taipa R na retenção de calor durante os meses frios traduz-se numa menor necessidade de aquecimento, reforçando a sua eficiência energética em ambos os climas.

Relativamente à taipa NR, apesar de apresentar um desempenho inferior à taipa R, manteve-se eficiente quando comparada com a solução ETICS. Em Évora, os ganhos de calor atingiram valores no verão, ligeiramente superiores aos da taipa regulamentar, mas ainda significativamente inferiores aos valores registados pela solução ETICS. No inverno, as perdas de calor na taipa NR foram um valor superior à taipa R, mas ainda consideravelmente mais eficiente do que a solução ETICS. Estes resultados sugerem que, mesmo com uma espessura reduzida em 24 centímetros, a taipa não regulamentar oferece um desempenho térmico superior ao de um edifício com solução construtiva convencional cujas envolventes opacas cumprem o regulamento da térmica em Portugal.

A análise das necessidades totais anuais de aquecimento e arrefecimento evidencia uma vantagem clara da taipa, tanto na sua forma regulamentar como não regulamentar, em comparação com o sistema ETICS. Em ambas as cidades, a inércia térmica da taipa contribui significativamente para a redução das necessidades energéticas, tornando-a uma solução mais eficiente. Os resultados quantitativos evidenciam que, em edifícios construídos com taipa regulamentar, é possível alcançar uma diminuição substancial das necessidades anuais, com reduções superiores a 60% quando comparadas com o sistema ETICS. Mesmo com espessuras não regulamentares, a taipa continua a oferecer um desempenho energético vantajoso, reforçando a ideia de que a regulamentação atual, que exige espessuras elevadas, pode e deve ser revista. A

flexibilização das exigências regulamentares relativas à espessura das paredes de taipa, combinada com a adoção de estratégias passivas adequadas, pode promover uma construção mais eficiente e sustentável.

As estratégias bioclimáticas aplicadas nas simulações, como o sombreamento horizontal e a ventilação noturna, também foram avaliadas para analisar o seu impacto na melhoria do conforto térmico e na redução das necessidades energéticas. A colocação de palas de sombreamento fixo nas fachadas orientadas a sul ajudou a minimizar a incidência direta de radiação solar, particularmente nos meses de verão, reduzindo o sobreaquecimento, no entanto esta estratégia bioclimática mostrou ser a que menor impacto teve. A ventilação noturna demonstrou ser uma estratégia eficaz na redução das temperaturas interiores durante os meses mais quentes. Esta técnica permitiu a renovação do ar durante a noite, quando as temperaturas exteriores eram mais baixas, o que possibilitou ter as temperaturas interiores mais frescas ao amanhecer. A ventilação noturna reduziu as temperaturas máximas interiores nos meses de verão, o que resultou numa diminuição de 10% nas necessidades de arrefecimento nas soluções convencionais.

Ao nível da regulamentação, as simulações demonstraram que a redução da espessura das paredes de taipa para 36 cm ainda resultou num desempenho energético superior ao da solução convencional, que cumpre a legislação portuguesa atual. Conclui-se que, ao nível do comportamento térmico, em edifícios térreos a exigência de espessuras elevadas de 60 cm é excessiva. A solução com taipa de 36 cm conseguiu manter temperaturas interiores estáveis e dentro da faixa de conforto estabelecida durante cerca de 75% do ano, em comparação com os 80% alcançados com a espessura regulamentar de 60 cm.

Os resultados também apontam para a importância da integração das técnicas vernáculas na regulamentação térmica. A elevada inércia térmica da taipa, combinada com estratégias passivas como o sombreamento adaptativo e a ventilação natural, mostrou-se eficaz na redução das necessidades de arrefecimento e aquecimento. As regulamentações vigentes não valorizam devidamente estas características, focando-se apenas no coeficiente de transmissão térmica, desconsiderando a contribuição significativa da inércia térmica para o conforto térmico e eficiência energética.

Com base nos resultados obtidos, considera-se que a regulamentação térmica deveria ser ajustada para permitir espessuras inferiores a 60 cm, integrar a capacidade de armazenamento térmico dos materiais, como a taipa, ao lado do coeficiente de transmissão térmica, considerar mais categorias valores de massa superficial na regulamentação nacional, para incluir materiais como a taipa, que de acordo com os valores regulamentares exigidos pertencem à classificação de inércia térmica forte, sendo três vezes superiores aos valores estabelecidos no regulamento.

Os dados apresentados evidenciam que a taipa, quando adequadamente utilizada em conjunto com estratégias passivas, tem um desempenho térmico e energético superior ao das soluções mais convencionais, como o sistema ETICS. Este trabalho revela que, para edifícios térreos, especialmente nos zonamentos climáticos estudados, a redução da espessura das paredes de taipa para 36 cm mantém níveis aceitáveis de conforto térmico e eficiência energética, sem comprometer a habitabilidade.

A construção em taipa pode, assim, ser promovida como uma solução moderna e viável para os desafios energéticos e ambientais do setor da construção. Esta dissertação não só apresenta evidências concretas da eficácia desta técnica, mostrando que a taipa pode ser uma solução eficaz para os desafios do setor, combinando o melhor das tradições construtivas com as exigências modernas de eficiência energética, para criar edifícios que sejam simultaneamente sustentáveis, eficientes e adaptados às condições climáticas locais.

5.2. Propostas de Trabalhos Futuros

Para dar continuidade ao trabalho desenvolvido, são sugeridos alguns aspectos de interesse para investigações futuras relacionadas com este tema. É importante aprofundar a modelação dinâmica da taipa em programas que analisem de forma mais completa o comportamento higroscópico dos materiais vernáculos. Essas simulações podem fornecer uma visão mais detalhada e precisa do desempenho higrotérmico e de conforto no interior das construções.

Em segundo lugar, a validação experimental das simulações em construções reais de taipa é essencial. A monitorização contínua do desempenho térmico e energético dos edifícios permitirá ajustar os modelos de simulação e validar as previsões teóricas com dados empíricos. Propor revisões na regulamentação térmica existente, com base em evidências científicas e dados empíricos, é essencial para acomodar melhor as técnicas de construção vernácula e as suas vantagens. A revisão legislativa deverá promover práticas construtivas mais sustentáveis e eficientes.

Além disso, a realização de análises de custo-benefício que considerem não apenas os custos iniciais de construção, mas também os custos operacionais e de manutenção ao longo do ciclo de vida dos edifícios, permitirá uma comparação mais abrangente das vantagens económicas das construções vernáculas face às convencionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fernandes, J., & Mateus, R., Energy efficiency principles in Portuguese vernacular architecture, em BSA 2012: 1st International Conference on Building Sustainability Assessment, pp. 561–572, 2012. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/19845>
- [2] União Europeia, Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia. Jornal Oficial da União Europeia, L 1, 2003, pp. 65–71. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0091&qid=1706533439451>
- [3] União Europeia, Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia. Jornal Oficial da União Europeia, L 153, 2010, pp. 124–146. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0031&qid=1706533599971>
- [4] União Europeia, Diretiva 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia. Jornal Oficial da União Europeia, L 156, 2018, p. 75–91. Acedido: 18 de outubro de 2023. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844>
- [5] Diário da República, Decreto-Lei n° 101-D/2020, 1ª série, n° 237, 2020, pp. 21–45. Acedido: 16 de novembro de 2023. Disponível em: <https://dre.pt/application/file/a/150570803>
- [6] Henriques, F. M. A., Comportamento Higrótérmico de Edifícios. Monte da Caparica: UNL-FCT, 2019. ISBN 978-989-20-3993-0.
- [7] ISO, ISO 6946, Components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance. Londres, Reino Unido, 2021. Acedido: 4 de setembro de 2024. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/65708.html#lifecycle>.
- [8] DGEG, Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios, Lisboa: ADENE, 2021. Disponível em: <https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2021/07/ManualSCE.pdf>.
- [9] Santos, C. A. & Matias, L., Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios – ITE 50, LNEC. Lisboa, 2010.
- [10] Merriam Webster Dictionary [Website]. Springfield, MA: MerriamWebster. Acedido: 3 de março de 2023. Disponível em: <https://www.merriam-webster.com/>
- [11] S. Verbeke e A. Audenaert, Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 2300–2318, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.083.
- [12] Brito, A. C., Contribuição da inércia térmica na eficiência energética de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2015. Tese de Doutoramento. doi: <https://doi.org/10.11606/T.3.2016.tde-13062016-102613>.
- [13] Santos, C. A. & Rodrigues, R., Coeficientes de transmissão térmica de elementos opacos da envolvente dos edifícios – ITE 54, LNEC. Lisboa, 2010.

- [14] Palme, M., Guerra, J., & Alfaro, S., Earth of the Andes: Comparing techniques and materials used in houses in San Pedro de Atacama, em Proceedings - 28th International PLEA Conference on Sustainable Architecture + Urban Design: Opportunities, Limits and Needs - Towards an Environmentally Responsible Architecture, 2012.
- [15] Fernandes, J., Mateus, R., Bragança, L., Correia da Silva, J., Portuguese vernacular architecture: The contribution of vernacular materials and design approaches for sustainable construction, *Architectural Science Review*, vol. 58, n. 4, pp. 324–336, 2015, doi: 10.1080/00038628.2014.974019.
- [16] Koch-Nielsen, H., Stay Cool: A Design Guide for the Built Environment in Hot Climates. Londres: Taylor and Francis Ltd, 2002. ISBN: 978-1-90291-629-3.
- [17] Fernandes, J., Mateus, R., Bragança, L., da Silva, J., & Silva, S., An analysis of the potentialities of Portuguese vernacular architecture to improve energy efficiency, 30th International PLEA Conference: Sustainable Habitat for Developing Societies: Choosing the Way Forward - Proceedings, vol. 3, pp. 69–76, 2014.
- [18] Fanger, P. O., Assessment of thermal comfort in practice, *British Journal of Industrial Medicine*, pp. 313–324, 1973, url: <https://www.jstor.org/stable/27722846>.
- [19] Jerónimo, R. S. M., Avaliação do Desempenho Higrotérmico e do Conforto de Edifícios Rurais Reabilitados, Universidade do Porto, 2015. Tese de Doutoramento. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/78348>.
- [20] ASHRAE, ASHRAE Standard 55, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta, GA, 2020. Acedido: 1 de outubro de 2023. Disponível em: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>.
- [21] Fanger, P.O., Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. New York: McGraw-Hill, 1970. ISBN: 0070199159.
- [22] Matias, L., Desenvolvimento de um modelo adaptativo para definição das condições de conforto térmico em Portugal – TPI 65. Lisboa: LNEC, 2009. ISBN: 978-972-49-2207-2.
- [23] Montaner, J. M., Depois do Movimento Moderno: Arquitetura da segunda metade do século XX, Barcelona: Gustavo Gili, 2001. ISBN: 9788584520039.
- [24] Gonçalves, H., & Graça, J. M., Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal, Lisboa: DGGE / IP. 2004. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.9/1323>.
- [25] Fernandes, J., Silva, S. M., Mateus, R., e Teixeira, E. R., Analysis of the Thermal Performance and Comfort Conditions of Vernacular Rammed Earth Architecture From Southern Portugal, *Materials Science and Materials Engineering*, vol. 1–5, n. 2, 2020. doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11460-2.
- [26] Faria, P. & Lima, J., Rebocos de Terra. Lisboa: Argumentum, 2018. ISBN: 9789898885043.
- [27] Fernandes, J., Pimenta, C., Mateus, R., Silva, S. M., e Bragança, L., Contribution of Portuguese vernacular building strategies to indoor thermal comfort and occupants’ perception, *Buildings*, vol. 5, n. 4, pp. 1242–1264, 2015, doi: 10.3390/buildings5041242.
- [28] Ribeiro, O., Portugal, o Mediterrâneo e o Atlântico: Esboço Geográfico (2ª ed.), Lisboa: Letra Livre, 2021. ISBN: 9789898268501.
- [29] Fernandes, J. & Correia da Silva, J., Passive cooling in Évora’s traditional architecture, em 2ª PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, pp. 341–345, 2007. Disponível em: <http://palenc2007.conferences.gr/index.php?id=3045>.

- [31] J. Fernandes, R. Mateus, H. Gervásio, S. M. Silva, e L. Bragança, Passive strategies used in Southern Portugal vernacular rammed earth buildings and their influence in thermal performance, *Renewable Energy*, vol. 142, pp. 345–363, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.098.
- [32] Avrami, E., Guillaud, H., & Hardy, M., *Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2008.
- [33] Dipasquale, L., & Cerri, S., *Map of Earthen Heritage in the European Union*, Piza: Edizioni ETS, 2011. Disponível em: https://www.academia.edu/1618097/2011_Map_of_Earthen_Heritage_in_the_European_Union%0Ahttp://www.terramata.fr/site/uploads/images/Ressources/map_Earth_Europe_Terra_In-cognita_Terramata.pdf.
- [34] *Arquitectura de Terra em Portugal* (1ª ed.). Lisboa: Argumentum, 2005. ISBN: 9789728479367.
- [35] Correia M., *Taipa na Arquitectura Tradicional*, em *Arquitectura de Terra em Portugal* (1ª ed.), pp. 27–34, Argumentum, 2005. ISBN: 9789728479367.
- [36] Rodrigues, P. F., & Henriques, F. M. A., *Construções em Terra: Conservação do Património Existente e Perspectivas Futuras*, em *Patorreb*, pp. 273–282, FEUP, Porto, 2006.
- [37] Brito, J., *Paredes de Taipa e Adobe, Folhas de Tecnologia da Construção de Edifícios do Curso de Mestrado em Construção*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1999. doi: 10.13140/RG.2.1.3988.8722.
- [38] Pereira, C. S., *A técnica da taipa em Portugal: Da transmissão do saber-fazer ao ensino formal*, Universidade de Lisboa, 2018. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.5/18149>.
- [39] Ferreira, M. S., *Caracterização da construção com terra da região de Leiria. Contributo para a sua conservação*, FCT UNL, 2017. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/28408>.
- [40] Correia, M., & Merten, J., *A Taipa Alentejana: Sistemas Tradicionais de Protecção*, Madrid, 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/268978305>
- [41] Duarte, S. R., *Construir com a Terra: Uma Proposta de Intervenção no Bairro do Barruncho, Odivelas*, Universidade Técnica de Lisboa, 2013. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.5/6943>.
- [42] *Diário da República, Decreto-Lei nº 40/90: Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*, 1ª série, nº 31, 1990, pp. 490–504. Acedido: 18 de novembro de 2023. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/40-1990-334611>
- [43] *Diário da República, Decreto-Lei nº 118/98: Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios*, 1ª série, nº 105, 1998, pp. 2114–2129. Acedido: 21 de novembro de 2023. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/118-1998-517194>
- [44] *Diário da República, Decreto-Lei nº 78/2006*, 1ª série, nº 67, 2006, pp. 2411–2415. Acedido: 22 de novembro de 2023. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/78-2006-672458>
- [45] *Diário da República, Decreto-Lei nº 118/2013*, vol. 159, 1ª série, nº 159, 2013, pp. 4988–5005. Acedido: 22 de novembro de 2023. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/118-2013-499237>
- [46] *Diário da República, Decreto-Lei nº 102/2021*, 1ª série, nº 225, 2021, pp. 6–15. Acedido: 24 de novembro de 2023. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/102-2021-174614573>

- [47] Diário da República, Portaria nº 138-G/2021, 1ª série, nº 126, 2021, pp. 2–6. Acedido: 27 de novembro de 2023. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/138-g2021-166296490>
- [48] Diário da República, Portaria nº 138-H/2021, 1ª série, nº 126, 2021, pp. 7–11. Acedido: 27 de novembro de 2023. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/138-h2021-166296491>
- [49] Diário da República, Portaria nº 138-I/2021, 1ª série, nº 126, 2021, pp. 12–53. Acedido: 1 de dezembro de 2023. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/138-i-2021-166296492>
- [50] Universidade de Coimbra. – Itecons [Website]. Coimbra: Universidade de Coimbra. Acedido: 15 de setembro de 2024. Disponível na WWW: <https://www.itecons.uc.pt/p3e/index.php>
- [51] J Gomes, R., & Folque, J., O Uso da Terra Como Material Construção, Circular de Informação Técnica, vol. 9, Série D, Lisboa: LNEC, 1953.
- [52] DIN, DIN 18951: Código Alemão de Construção em Terra. Berlim: Deutsches Institut für Normung, 1951.
- [53] DIN, DIN 18942: Materiais e produtos de terra. Berlim: Deutsches Institut für Normung, 2024.
- [54] Alemanha. D. I. Normen, *DIN 18945: Blocos de terra - Termos e definições, requisitos, métodos de ensaio*. Berlim, 2018.
- [55] Alemanha. D. I. Normen, *DIN 18946: Argamassas de terra para alvenaria - Requisitos, ensaio e marcação*. Berlim, 2018.
- [56] DIN, DIN 18945: Blocos de terra - Termos e definições, requisitos, métodos de ensaio. Berlim: Deutsches Institut für Normung, 2024.
- [57] DIN, DIN 18946: Argamassas de terra para alvenaria - Requisitos, ensaio e marcação. Berlim: Deutsches Institut für Normung, 2024.
- [58] CSIRO. CSIRO, Bulletin 5 National Building Technology Centre: Earth Wall Construction. Chatswood, Australia, 1987.
- [59] Standards Australia & Walker, P., The Australian Earth Building Handbook. Sydney, Australia: Standards Australia International Ltd, 2001.
- [60] CID, New Mexico Earthen Building Materials Code. Santa Fé, New México: Department of Construction Industries Division, 2006.
- [61] ASTM International, ASTM E2392/E2392M-23 - Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems. 2016. doi: 10.1520/E2392_E2392M-23.
- [62] NZS, NZS 4297: 2020. Wellington, New Zealand, 2020.
- [63] NZS, NZS 4298: 2020. Wellington, New Zealand, 2020.
- [64] NZS, NZS 4299: 2020. Wellington, New Zealand, 2020.
- [65] NBR, NBR 17014: Taipa de pilão – Requisitos, procedimentos e controlo. São Paulo, Brasil, 2022.
- [66] Del Río, G. B., Barrios, P. B., & Ministerio de Obras Públicas y Transportes Secretaría General Técnica, Bases para el Diseño y Construcción con Tapial. Madrid: Ministerio de Obras Públicas, 1992.
- [67] Gomes, M. I., Santos, T., Pereira, C., & Faria, P., Construção Com Base Em Terra: Contributo Para a Ecoeficiência Na Construção, em Sga'19, pp. 1–9, 2019.
- [68] Instituto de Meteorologia de Portugal & Agencia Estatal de Meteorologia de Espanha, Atlas Climático Ibérico: Temperatura do ar e precipitação (1971-2000). Lisboa: IPMA, 2011. doi: <https://doi.org/10.31978/784-11-002-5>.
- [69] DGEG, Guia SCE - Parâmetros de cálculo, Lisboa: ADENE, 2020.

- [70] S.-G. Transformados, Catálogo Geral de Painéis e Perfis. Acedido: 9 de Março de 2024. Disponível em: <https://www.panelesach.pt/>
- [71] Insol Ltd. – Overhang Annual Analysis Shading Calculators [Website]. Auckland: Insol Ltd.. Acedido: 22 de abril de 2024. Disponível na WWW: <https://www.insol.co.nz/overhang-annual-analysis-shading-calculators>.
- [72] M. S. Fernandes, B. Coutinho, e E. Rodrigues, The impact of climate change on an office building in Portugal: Measures for a higher energy performance, *Cleaner Production*, vol. 445, Março, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141255.
- [73] S. Idrissi Kaitouni et al., Energy and hygrothermal performance investigation and enhancement of rammed earth buildings in hot climates: From material to field measurements, *Energy and Buildings*, vol. 315, Abril, p. 114325, 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114325.



2024

SALVADOR THIRAN CARDOSO DE
MENEZES

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM EDIFÍCIO
DE CONSTRUÇÃO VERNÁCULA