

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Aryadne Gomes de Macedo

Resiliência dos Sistemas Construtivos em Terra às
Alterações Climáticas

Julho de 2023



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Aryadne Gomes de Macedo

Resiliência dos Sistemas Construtivos em Terra às
Alterações Climáticas

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Profº Doutor Ricardo Filipe Mesquita Silva Mateus

Trabalho efetuado sob a orientação da
Profª Fabiana Bartalini Von Der Osten

Julho de 2023

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-SemDerivações
CC BY-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Agradecimentos

Primeiramente, deixo meu agradecimento ao Doutor Jorge Fernandes, que esteve presente em todos os processos da dissertação, transmitindo seus conhecimentos na área e edificando o andamento da construção da dissertação. Agradeço também ao meu orientador, Professor Doutor Ricardo Mateus, pelo acompanhamento ao longo desta jornada, todo o apoio, exigência e transmissão de conhecimentos.

À minha mãe, Lisolete, e minha irmã, Daphnny, por serem meus exemplos de força e perseverança, pelo apoio incondicional, amor, carinho e compreensão, por terem sido sempre meu porto seguro.

Mãe, obrigada por todos os sacrifícios e desafios que traçaste para que pudéssemos, Daphnny e eu, alcançar nossos sonhos, és todo o meu amor e força, estás em tudo que sou e faço.

Mana, melhor amiga, exemplo, mesmo longe sempre estiveste presente, és o meu maior exemplo de dedicação e persistência, agradeço-te muito por ser tudo aquilo que me completa e mais, minha metadinha.

À minha avó, Minervina, por ter estado sempre ao meu lado, dando seu amor e carinho, ajudando em cada passo que eu precisava dar. Seu colo é conforto e é paz, jamais serei capaz de agradecer por tudo que me ensinaste e fizeste por mim.

Ao meu avô, Anacleto (*in memoriam*), meu agradecimento mais que especial, graças à sua força e amor incondicional pudemos todas lutar por nossos sonhos, nunca deixou-nos desistir e sempre nos apoiou a todas com suas próprias mãos. Sempre foi e será meu exemplo para continuar em frente e, apesar de não poder retribuir a ti por tudo que fizeste, continuarei a dar cada passo pensando em ti, és o meu eterno Professor.

Ao meu amigo, Guilherme, por sempre com sua atenção e compreensão ter, durante esse percurso, me trazido tranquilidade e bem-estar, foste um grande pilar na minha caminhada pessoal e acadêmica. Agradeço também a seus pais, Odinez e Carlos, e sua irmã, Kauana, por terem estado presentes em toda essa minha caminhada, foram um grande apoio em todos os momentos para mim e, por isso, muito obrigada.

Às minhas queridas amigas desde a infância, Maria Teresa, Fernanda, Karin, Ana Julia, Bárbara e Stephanie. Apesar de termos seguido percursos académicos diferentes, cresceram comigo e sempre me apoiaram, ajudando a me tornar quem sou hoje.

Meu Cunhado, Pedro, e meus colegas durante a parte mais difícil do meu percurso acadêmico, por estar em outro País, longe de familiares, Martim, Natália e outros, muito obrigada pelo apoio e presença neste momento importante da minha vida.

A todos os professores da Pontifícia Universidade Católica do Paraná e Universidade do Minho que fizeram parte desta etapa da minha vida, transmitindo seus conhecimentos, ajudando e motivando a nós, alunos, a alcançarmos o profissionalismo e excelência necessários na área de Engenharia Civil.

Agradeço também a Deus, por trilhar meu caminho, colocando em meu destino pessoas tão especiais.

A todas estas e outras pessoas que estiveram presentes durante o meu percurso de maneira direta ou indireta, o meu mais sincero...

Muito obrigada!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

No contexto das alterações climáticas, as buscas por meios para a diminuição de danos relacionados têm sido cada vez mais assíduas, principalmente para a diminuição de emissão dos gases de efeito de estufa (GEE), responsáveis por estas alterações. Tendo em vista que a União Europeia (UE) é o terceiro maior emissor destes gases, estabeleceu-se o Pacto Ecológico Europeu (Green Deal), uma estratégia para o crescimento do objetivo de descarbonização no espaço europeu. Dentro disto, instituíram-se metas nos três principais setores que utilizam grandes quantidades de energia, sendo um deles o da construção. A construção é considerada um setor chave nas estratégias europeias a longo prazo, pois os edifícios, em sua construção e utilização, são responsáveis pela emissão de cerca de 35% dos GEE na UE.

Na busca de formas para sanar esta situação, trazendo energia mais limpa e edifícios mais eficientes, voltou-se para o estudo dos materiais de construção utilizados na arquitetura vernácula. Entre as soluções estudadas, encontram-se os sistemas construtivos feitos à base de terra. Estes sistemas apresentam um menor impacto ambiental do que os materiais convencionais e contribuem para a redução de desperdícios e de consumos energéticos. Isto porque têm um ótimo desempenho térmico (pela sua alta inércia térmica), principalmente na estação de arrefecimento, para além de utilizarem técnicas tradicionais e materiais locais para sua construção.

Dessa forma, este trabalho dá continuidade a estudos que analisam o desempenho térmico deste material para o cenário climático atual e os previstos para o final do século XXI, com base no Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), comparados ao desempenho da alvenaria convencional.

Palavras-Chave: Alterações climáticas, arquitetura vernácula, construções em terra, impacto ambiental, sustentabilidade.

Abstract

In the context of climate change, the search for ways to reduce related damages has been increasing assiduously, especially to reduce the emission of greenhouse gases (GHG), responsible for these changes. Considering that the European Union (EU) is the third largest emitter of these gases, the Green Deal was established, which is a strategy for the growth of the decarbonization objective in the European space. Within this, goals were established in the three main sectors that use large amounts of energy, one of which is the construction sector. It is considered a key sector in European long-term strategies, since buildings, in their construction and use, are responsible for the emission of about 35% of GHGs in the EU.

In searching for ways to remedy this situation by bringing in cleaner energy and more efficient buildings, researchers turned to study materials used in vernacular architecture. Among the solutions studied are earth-based construction systems. These systems have a lower environmental impact than conventional materials and contribute to the reduction of waste and energy consumption. This is because it has excellent thermal performance (due to its high thermal inertia), mainly in the cooling season, besides using traditional techniques and local materials for its construction.

Thus, this work continues the studies that analyse the thermal performance of this material for the current climate scenario and those predicted for the end of the XXI century, based on the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), compared to the performance of the conventional construction.

Keywords: Climate change, vernacular architecture, earth constructions, environmental impact, sustainability.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
Abreviaturas e Siglas	xiv
1. FUNDAMENTAÇÃO E OBJETIVOS	15
1.1. Introdução.....	15
1.2. Objetivos	16
2. ENQUADRAMENTO.....	17
2.1. Alterações Climáticas.....	17
2.2. Modelos de Previsão de Alterações Climáticas.....	19
2.2.1. Modelos de Circulação Geral Acoplados Oceano-Atmosfera (AOGCMs).....	19
2.2.2. Modelos do Sistema Terra (ESM)	20
2.3. Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).....	21
2.4. Histórico Construtivo em Portugal	25
2.4.1. Edifícios Vernáculos	25
2.4.1.1. Edifícios em Terra	25
2.4.1.2. Taipa	31
2.4.1.3. Blocos de Terra Comprimida.....	34
2.5. Propriedades Térmicas da Envolvente das Construções.....	36
2.6. Comportamento Térmico das Construções em Terra – Estado da Arte.....	41
2.7. <i>DesignBuilder</i>	44
3. ESTUDO DE CASO.....	47
3.1. Modelo e Localização.....	47
3.2. Zonas Climáticas	51
3.3. Soluções Construtivas.....	55
3.3.1. Edifício em Alvenaria Comum	59
3.3.2. Edifício em Blocos de Terra Comprimida	60
3.3.3. Edifício em Taipa	61
3.4. Simulação Energética	63
3.4.1. Definição dos Cenários Climáticos.....	63
3.4.2. Definição dos cenários no software <i>DesignBuilder</i>	67

3.4.2.1. Meteonorm Software.....	67
3.5. Definição dos Detalhes de Dados no Software DesignBuilder	71
3.6. Parâmetros Analisados	78
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS TEMPERATURAS NO INTERIOR DOS EDIFÍCIOS	80
4.1. Cenário Climático Atual.....	80
4.1.1. Inverno.....	81
4.1.2. Primavera.....	82
4.1.3. Verão.....	84
4.1.4. Outono	85
4.2. Cenário Climático RCP8.5.....	87
4.2.1. Inverno.....	87
4.2.2. Primavera.....	89
4.2.3. Verão.....	90
4.2.4. Outono	91
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS NECESSIDADES TÉRMICAS DOS EDIFÍCIOS	93
5.1. Sem Ventilação Natural.....	93
5.1.1. Cenário Climático Atual.....	93
5.1.2. Cenário Climático RCP8.5.....	96
5.1.3. Diferença entre Cenários Climáticos.....	97
5.2. Ventilação Natural.....	97
5.2.1. Cenário Climático Atual.....	99
5.2.2. Cenário Climático RCP8.5.....	101
5.2.3. Comparativo Necessidades Térmicas com Ventilação Entre Cenários.....	102
6. CONCLUSÃO	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
APÊNDICE.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Alterações da temperatura média global da superfície entre 2006 e 2100 em relação ao período 1986 a 2005 [8]	23
Figura 2 - Muralha da China com utilização de Taipa [16]	26
Figura 3 - Ruínas de Chanchán, Peru [17].....	26
Figura 4 - Cidade de Shibam, Iémen. [18].....	27
Figura 5 - Distribuição geográfica das construções tradicionais portuguesas em terra: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique.....	28
Figura 6 - Diagrama das técnicas construtivas com terra, estabelecido pelo CRATerre [21].	29
Figura 7 - Molde de cofragem [22]	31
Figura 8 - Componentes de um taipal tradicional [22]	32
Figura 9 - Utensílios utilizados no processo de construção tradicional em taipa [22]]	32
Figura 10 - Arquitetura Moderna com a utilização da Taipa [24]	33
Figura 11 - Bloco de Terra Comprimida (Autor, 2022).	34
Figura 12 - Arquitetura Moderna com a utilização de BTC [25]	35
Figura 13 - Transferência de calor entre dois ambientes por meio de uma parede [27].	36
Figura 14 - Efeito da inércia térmica com isolamento térmico pelo exterior [28].	39
Figura 15 - efeito da inércia térmica com isolamento térmico pelo interior [28].....	39
Figura 16 - Estrutura hierárquica do modelo de simulação no programa <i>DesignBuilder</i>	44
Figura 17 - Dados de entrada de uma simulação computacional [46].	45
Figura 18 - Parâmetros mínimos necessários para avaliação de desempenho térmico por programas de simulação [47].	46
Figura 19 – Vista 1	47
Figura 20 – Vista 2	47
Figura 21 - Piso térreo do edifício.....	48
Figura 22 - 1º andar do edifício.	48
Figura 23 - Localização do Edifício em Estudo [GoogleEarth]	49
Figura 24 - Terreno para construção do edifício.....	50
Figura 25 – Constituição da laje térrea do edifício.	56
Figura 26 – Constituição da laje entre pisos do edifício.	57
Figura 27– Constituição da laje de cobertura do edifício.....	57

Figura 28– Constituição do telhado do edifício	58
Figura 29 - Ilustração da estrutura do telhado	58
Figura 30 – Constituição do exterior para o interior da parede em alvenaria comum.....	59
Figura 31 - Constituição do exterior para o interior da parede em BTC.....	60
Figura 32 – Constituição da parede em taipa.	61
Figura 33 – Clima na Região de Évora [48].....	63
Figura 34 - Horas de luz solar e crepúsculo em Évora [48].....	64
Figura 35 - Histórico de temperatura em Évora [48]	64
Figura 36 - Histórico de temperatura de Évora no inverno [48]	65
Figura 37 - Histórico da temperatura de Évora no verão [48]	65
Figura 38 - Temperaturas médias por mês na região de Évora [48]	65
Figura 39 - Página de inserção do local que se pretende analisar no <i>Meteonorm</i>	68
Figura 40 - Página em que se define os dados climatológicos no <i>Meteonorm</i>	68
Figura 41 - Página em que se define o cenário climático no <i>Meteonorm</i>	69
Figura 42 - Página de definição de parâmetros no <i>Meteonorm</i>	69
Figura 43 - Página de apresentação de resultados do <i>Meteonorm</i>	70
Figura 44 – Inserção Detalhes de Dados no <i>DesignBuilder</i>	71
Figura 45 - Dados Gerais de Ganhos no <i>software DesignBuilder</i>	73
Figura 46 – Controles do Ambiente no <i>DesignBuilder</i>	74
Figura 47 – Sistema HVAC para definição de necessidades energéticas dos edifícios no <i>DesignBuilder</i>	75
Figura 48 – Definição das aberturas no <i>DesignBuilder</i>	76
Figura 49 – Schedule de sombreamento definida no <i>DesignBuilder</i> [3]	77
Figura 50 – Temperatura no Interior dos Edifícios para o cenário climático atual, sem sistema HVAC em funcionamento em comparação com a temperatura exterior.	80
Figura 51 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático Atual	81
Figura 52 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático Atual de 15 de abril a 16 de maio	83
Figura 53 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático Atual	84
Figura 54 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático Atual	86
Figura 55 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático RCP8.5	87

Figura 56 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático RCP8.5 de 21 de janeiro a 21 de fevereiro.	88
Figura 57 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático RCP8.5 de 15 de abril a 16 de maio.....	89
Figura 58 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático RCP8.5 de 15 de julho a 16 de agosto.	90
Figura 59 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático RCP8.5.....	91
Figura 60 - Necessidades Térmicas para o Cenário Climático Atual por m ²	93
Figura 61 - Necessidades Térmicas para o Cenário Climático RCP 8.5 por m ²	96
Figura 62 – Inserção da Ventilação Natural.....	98
Figura 63 – Cronograma Ventilação Natural.....	99
Figura 64 - Necessidades Térmicas para o Cenário Climático Atual por m ² com Ventilação natural.	100
Figura 65 - Necessidades Térmicas para o Cenário Climático RCP 8.5 por m ² com Ventilação Natural.	101
Figura A. 1 - Temperatura Exterior para o cenário climático de 2020.	110
Figura A. 2 - Temperatura Exterior para o Cenário Climático RCP 8.5.	110
Figura A. 3 - Temperatura no Interior dos edifícios com HVAC no cenário climático atual.	111
Figura A. 4 - Temperatura no Interior dos edifícios com HVAC no cenário climático RCP8.5.	111
Figura A. 5 - Temperatura no Interior dos edifícios com HVAC e ventilação natural no cenário climático atual.	112
Figura A. 6 - Temperatura no Interior dos edifícios com HVAC e ventilação natural no cenário climático RCP8.5.	112

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos 4 RCP's [2]	22
Tabela 2 - Resumo dos cenários e aumentos de temperatura para os anos em estudo.	24
Tabela 3 - Classe de Inércia Térmica, segundo o Manual SCE.	39
Tabela 4 - Coordenadas e altitude do edifício em estudo	49
Tabela 5 - Valores de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de aquecimento	51
Tabela 6 - Zona climática de inverno.	51
Tabela 7 - Valores de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de arrefecimento.	52
Tabela 8 – Zona climática de verão.....	52
Tabela 9 - Determinação do bztu.	53
Tabela 10 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos dos elementos da envolvente opaca dos edifícios de habitação - Portugal Continental $U_{\text{máx}}$ [W/(m ² . °C)].	54
Tabela 11 - Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados com condição fronteira exterior ou interior com ganhos solares, $g_{\text{tot,máx}}$	54
Tabela 12 - Verificação do coeficiente de transmissão térmica (U) para a laje térrea	56
Tabela 13 - Verificação do coeficiente de transmissão térmica (U) para a laje de cobertura	59
Tabela 14 - Verificação do coeficiente de transmissão térmica (U) para a parede em alvenaria convencional.....	60
Tabela 15 - Verificação do coeficiente de transmissão térmica (U) para a parede em BTC.....	61
Tabela 16 - Verificação do coeficiente de transmissão térmica (U) para a parede em taipa.....	62
Tabela 17 - Aumentos de temperatura previstos para os anos em estudo, segundo IPCC.	66

Abreviaturas e Siglas

AOGCM's	Modelos de Circulação Geral Acoplados Oceano-Atmosfera
AR5	Quinto Relatório do IPCC
AVAC	Sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method</i>
BTC	Bloco de Terra Comprimida
BTCE	Bloco de Terra Comprimida Estabilizado
CFD	<i>Contract for Difference</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
ECP's	Recursos de Concentração Alargados
EPW	<i>EnergyPlus Weather Data File</i>
ESM	Modelos do Sistema Terra
GEE	Gases do Efeito Estufa
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MM5	<i>Fifth-Generation PSU/NCAR Mesoscale Modeling System</i>
MSCE	Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios
Msi	Massa Superficial Útil
NCAR	<i>University National Center for Atmospheric Research</i>
OPR	Gabinete do Governador de Planeamento e Investigação
ONU	Organização das Nações Unidas
RCP's	<i>Representative Concentration Pathways</i>
R.I	Revolução Industrial
R _{tot}	Resistência Térmica Total
U	Coeficiente de Transmissão Térmica
UE	União Europeia

1. FUNDAMENTAÇÃO E OBJETIVOS

1.1. Introdução

Estudos recentes mostram que o material terra, quando utilizado como método construtivo em suas diferentes possibilidades de forma (taipa, Bloco de Terra Comprimida (BTC), Adobe, etc), além de ser um material que causa um menor impacto ambiental, por ser considerado sustentável, ainda tem um excelente desempenho em questões térmicas, principalmente em se tratando das estações de arrefecimento [1].

Como também mostram outros estudos, a probabilidade de aumento de temperaturas para os próximos anos é já considerada um facto, pois, mesmo que sejam tomadas as devidas providências, a temperatura mundial irá aumentar [2].

Sendo assim, tem-se considerado cada vez mais este material para as construções futuras, por ter um menor impacte ambiental (diminuindo a inclinação da curva de aumento da temperatura) e porque, muito provavelmente, terá um melhor desempenho neste cenário de aquecimento global quando comparado aos materiais construtivos mais comumente utilizados [1] [3].

O objetivo deste trabalho é, dessa forma, dar continuidade a estes estudos, a partir de uma análise comparativa entre o desempenho do material terra em duas formas (taipa e BTC) e o da alvenaria convencional em diferentes cenários de aumento de temperaturas com o aquecimento global (cenários estes com base no Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)), comparando as necessidades de climatização (utilização de equipamentos para o controle da temperatura dos ambientes internos) de uma residência comum, de mesma arquitetura, para as três soluções construtivas.

O objetivo final passa por analisar se a utilização de sistemas construtivos em terra, apresenta vantagens em relação ao sistema comum de construção, na resposta aos aumentos previstos da temperatura global, contribuindo para a menor necessidade de climatização e, desta forma, para a sustentabilidade na construção.

1.2. Objetivos

Baseado num caso de estudo, pretende-se analisar o modo como os princípios da arquitetura vernácula utilizados no Sul do País e os sistemas construtivos em terra responderão ao aumento expectável da temperatura, a partir de diferentes cenários conhecidos das alterações climáticas. Adicionalmente, proceder-se-á à comparação da resposta entre os sistemas construtivos convencionais e em terra.

Para atingir estes objetivos, a dissertação assenta nas seguintes etapas:

1. Definir um modelo simplificado do edifício a estudar, incorporando as estratégias de sustentabilidade já identificadas nos edifícios do Sul do País;
2. Definir cenários de alterações climáticas a estudar e adaptar o ficheiro climático do local que for definido para o estudo, considerando as diferentes temperaturas esperadas;
3. Desenvolver o modelo de simulação energética do caso de estudo no *DesignBuilder*;
4. Definir cenários a analisar (alterações climáticas, diferentes sistemas construtivos: edifício com sistema construtivo convencional; em taipa; e com BTC);
5. Quantificar e analisar o consumo energético do edifício para os diferentes cenários;
6. Discutir os contributos dos edifícios de elevada inércia térmica na resposta ao aumento de temperatura.

2. ENQUADRAMENTO

2.1. Alterações Climáticas

As temperaturas médias globais aumentaram significativamente desde a Revolução Industrial (R.I), sendo a última década (2010-2019) a com registros de temperaturas mais elevadas [4]. Dados mostram ainda que o ano de 2020 foi o ano com registro das temperaturas mais altas na Europa [5]. O maior indicador destas altas temperaturas é o aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE).

Grande parte das atividades humanas requer o consumo de energia, o qual, na sua grande maioria, provém da queima de combustíveis fósseis. A utilização de energia proveniente desta provoca a libertação de dióxido de carbono (CO_2) – entre outros gases de efeito estufa – para a atmosfera, causando as alterações climáticas, já fortemente notáveis.

Em comparação ao século XIX, a temperatura média, atualmente, é de 0,94 a 1,03°C mais elevada. Cientistas ainda consideram que, ainda neste século, esta temperatura se elevará em 2°C em comparação aos níveis pré-industriais [4].

Dentro deste contexto de emissões de gases do efeito estufa (GEE) e das alterações climáticas, foi assinado, em dezembro de 2015, o Acordo de Paris [6]. Esse tem como principal objetivo estagnar o aumento da temperatura média mundial abaixo destes 2°C em relação ao nível pré-industrial. Para isso, foram definidas estratégias com o objetivo da diminuição do consumo energético e das emissões de carbono associadas. Tendo, então, como objetivo final até 2050 atingir uma redução de 100% de emissões de carbono, em comparação aos níveis emitidos no ano de 1990. Para isso, foram estabelecidas metas de redução de consumo de energia e, também, um aumento do uso de energias advindas de fontes renováveis, como, por exemplo, energia eólica e solar [6].

Tendo em vista que a União Europeia (UE) é o terceiro maior emissor de GEE, depois apenas da China e dos Estados Unidos da América, dentro da UE foi, então, estabelecido o Pacto Ecológico Europeu (Green Deal), sendo este uma estratégia de crescimento deste objetivo de descarbonização dentro da Europa até o ano de 2050. Para isso, foram estabelecidas metas dentro dos três principais setores que utilizam de grandes quantidades de energia, nomeadamente o setor da indústria, do transporte e dos edifícios [7].

O setor dos edifícios é considerado um setor chave nas estratégias europeias a longo prazo, quando se trata de consumo de energia, utilização eficiente de recursos e alterações climáticas. Isto porque, na Europa, os edifícios consomem cerca de 40% de toda a energia consumida dentre os setores, sendo o que apresenta maior consumo entre todos, seguindo-se do setor de transportes (32%). Esse é também responsável por cerca de 35% da emissão de GEE no espaço europeu.

Desta forma, deve-se enveredar para a diminuição deste consumo no meio onde esses impactes são mais evidentes, neste caso, no setor construtivo. Devendo-se, assim, ter atenção à questão da energia consumida no processo de construção dos edifícios, como, por exemplo, as soluções construtivas utilizadas, as quais impactam diretamente no consumo energético de utilização destes, principalmente na parte de aquecimento e arrefecimento dos ambientes internos.

2.2. Modelos de Previsão de Alterações Climáticas

Segundo o Painel Internacional para as Alterações Climáticas (IPCC), em 2013, durante o século XXI haverá um acentuamento nas alterações climáticas advindas das emissões de GEE originadas por atividades antropogénicas [8]. A escala dos impactes provocados por estas alterações será distinta nas diversas regiões, com graus de vulnerabilidade diferentes.

Os modelos climáticos são, dentro deste contexto, as principais ferramentas utilizadas para as simulações climáticas e escala de tempo (de sazonal a decanal); projeções de alterações do clima; e investigação das possíveis respostas do sistema climático a diferentes políticas.

Existem diversos modelos climáticos utilizados para realização destas previsões, podendo estes serem simples modelos de realização de balanços energéticos, até modelos com uma elevada complexidade, os quais necessitam de computadores especializados. Os últimos, permitem modelar o sistema Terra (Earth System Models – EMS) e serão discutidos a seguir [2].

Para a aplicação destes modelos, são utilizadas simulações paleoclimatológicas, históricas, estudos e processos de sensibilidade, projeções das mudanças climáticas futuras a partir de simulações de curto prazo das variações climáticas. Sendo assim, estes modelos baseiam-se em leis fundamentais da natureza, tendo em conta várias etapas para o seu desenvolvimento [9].

A partir da observação e trabalho teórico, expressam-se, em termos matemáticos, as leis da física envolvidas no sistema climático. Em seguida, com base no desenvolvimento de métodos numéricos e com o uso de supercomputadores, executam-se estas expressões matemáticas. E, por último, é realizada a criação de modelos conceptuais (parametrizações) e sua aplicação [9], [10].

2.2.1. Modelos de Circulação Geral Acoplados Oceano-Atmosfera (AOGCMs)

Os AOGCM's utilizam equações matemáticas complexas, que representam determinado número de processos de forma explícita ou por meio de parametrização física, para representar os diferentes componentes do sistema climático, como a atmosfera, biosfera, hidrosfera, criosfera e litosfera. Por meio dessas equações é possível entender como o clima na Terra se tem alterado e como poderá vir a ser no futuro. Esses modelos têm sido bastante utilizados para as previsões sazonais, descrição das principais características da atmosfera terrestre e análise das alterações climáticas [11].

A modelagem do clima de forma numérica tem como principal objetivo a possibilidade de compreensão dos mecanismos que o controlam no presente e, assim, prever as possíveis variações que poderão ocorrer no clima futuro [11].

Um exemplo de modelo de circulação geral acoplado oceano-atmosfera é o modelo desenvolvido na *Penn State* junto do University *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), conhecido como MM5 (*Fifth-Generation PSU/NCAR Mesoscale Modeling System*). Este tem um princípio de desenvolvimento com base em um Modelo Comunidade, no qual é possível a contribuição de diversos laboratórios e universidades para que haja melhorias. O seu desenvolvimento tem como principal objetivo simular ou prever circulação atmosférica de escala regional e de mesoescala, sendo um modelo de área limitada e não hidrostático [11].

2.2.2. Modelos do Sistema Terra (ESM)

Os ESM apresentam uma complexidade maior. Nele são integradas as interações da atmosfera, oceanos, criosfera, biosfera e litosfera para que as condições do clima, em geral, e também regionais sejam estimadas. Nestes modelos têm-se os processos físicos presentes em outros modelos climáticos, a interação do clima físico com os constituintes químicos presentes na atmosfera e nos oceanos e com a biosfera [2], [10], [11].

A principal diferença encontrada entre os ESM e os modelos climáticos está na possibilidade de simulação do ciclo de carbono e a química da atmosfera e oceanos. Nestes modelos há um processo de verificação que compara o comportamento do modelo com o do sistema climático [2], [10], [11].

2.3. Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)

O IPCC, Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, é formado por um grupo de cientistas e investigadores estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) que visa o monitoramento e a assessoria de toda a ciência ligada às possíveis alterações climáticas [8]

Para que seja possível a obtenção de possíveis cenários climáticos por meio da utilização de modelos climáticos, é preciso realizar a escolha de um cenário que represente a evolução das emissões dos GEE durante o período de tempo em que se pretende fazer a projeção. Sendo estes cenários reflexos do que peritos consideram possíveis emissões futuras com base em tendências ambientais, tecnológicas e socioeconómicas.

No quinto relatório do IPCC (AR5) utilizou-se uma metodologia diferente para a definição dos cenários, metodologia essa designada “Produção Paralela” [8]. Para o desenvolvimento desta, inicia-se pela identificação das mais consideráveis características para os cenários de forçamentos radiativos utilizados na modelação do clima, das quais o mais importante é o nível de forçamento radiativo para o ano de 2100. Na construção da trajetória do forçamento radiativo são consideradas diferentes combinações de diferentes cenários demográficos, económicos, tecnológicos e institucionais, tendo também em atenção possíveis medidas de mitigação das alterações climáticas.

Devido à necessidade dos modelos de informações a respeito da evolução temporal das emissões e concentrações dos GEE, os investigadores identificaram diversos cenários de emissões com trajetórias possíveis. Estes, obtidos por meio do que se tem disponível na literatura científica, levaram à evolução do forçamento radiativo, até certo nível, para o final do século XXI. Os cenários foram designados como RCP's (*Representative Concentration Pathways* ou Trajetórias Representativas das Concentrações), sendo que cada uma destas RCP's fornece apenas um cenário dos muitos possíveis [8].

RCP's usualmente se referem à porção do percurso de concentração em que se entende até 2100, para a qual os Modelos de Avaliação Integrada produziram cenários de emissão correspondentes. Já os Recursos de Concentração Alargados (ECP's) descrevem extensões dos RCP's de 2100 a 2500, os quais foram calculados utilizando regras simples geradas por consultas às partes interessadas e não representam cenários totalmente consistentes [12].

A partir dessa nova metodologia, determinaram-se quatro RCP's, cada uma correspondendo a uma evolução temporal de forçamento radiativo (como representados na Tabela 1). Estas, em conjunto com simulações coordenadas a partir de modelos climáticos, foram analisadas e puderam contribuir para o 5º relatório do IPCC [9].

Tabela 1 – Características dos 4 RCP's [2]

NOME	FORÇAMENTO RADIATIVO	CONCENTRAÇÃO	PERCURSO	MODELO QUE FORNECE O RCP*
		(p.p.m.)		
RCP8.5	>8,5 W/m ² em 2100	>1.370 CO ₂ equiv. em 2100	Ascensão	MESSAGE
RCP6.0	~6W/m ² com estabilização em 2100	~850 CO ₂ equiv. (com estabilização depois de 2100)	Estabilização sem excessos	AIM
RCP4.5	~4,5W/m ² com estabilização em 2100	~650 CO ₂ equiv. (com estabilização depois de 2100)	Estabilização sem excessos	GCAM
RCP2.6	Pico em ~3W/m ² antes de 2100 e depois declina	Pico em ~490 equiv. antes de 2100 e depois declina	Pico e declínio	IMAGE
*MESSAGE, Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact, International Institute for Applied Systems Analysis, Austria; AIM, Asia-Pacific Integrated Model, National Institute for Environmental Studies, Japan; GCAM, Global Change Assessment Model, Pacific Northwest National Laboratory, USA (previously referred to as MiniCAM); IMAGE, Integrated Model to Assess the Global Environment, Netherlands Environmental Assessment Agency, The Netherlands.				

Os RCP's utilizados neste cenário incluem: um cenário com elevadas taxas de emissão dos GEE (RCP 8.5); dois cenários intermediários (RCP 4.5 e RCP 6.0); e um cenário de mitigação dos GEE (RCP 2.6). Os cenários RCP 6.0 e RCP 8.5 não incluem esforços adicionais de contenção das emissões; o RCP 2.6 representa um cenário que tem como objetivo assegurar que a temperatura aumente menos do que os 2°C previstos comparados à temperatura da era pré-industrial [8].

- O RCP 2.6 representa um caminho em que a radiação chegará a um pico de aproximadamente 3W/m² antes de 2100 e depois declinará. Com o ECP correspondente assumindo emissões constantes depois de 2100;
- Os RCP's 4.5 e 6.0 são duas vias de estabilização intermediárias nas quais o forçamento radiativo é estabilizado em aproximadamente 4,5W/m² e 6,0W/m², respetivamente, após 2100. E as ECP's correspondentes, por sua vez, assumirão concentrações constantes após 2150;
- RCP 8.5 é uma via elevada, para qual o forçamento radiativo atinge mais de 8,5W/m² até 2100 e continua a aumentar durante algum tempo. As ECP's correspondentes assumirão emissões constantes depois de 2100 e concentrações constantes depois de 2250 [12].

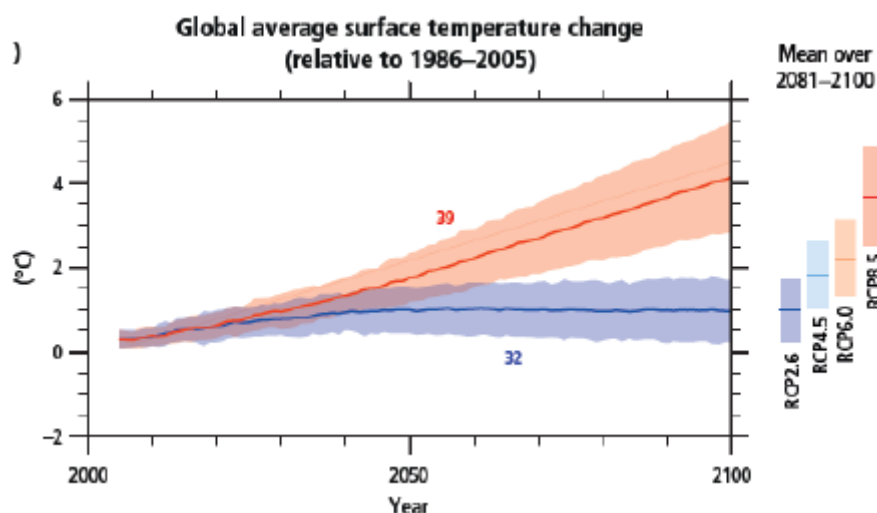


Figura 1 - Alterações da temperatura média global da superfície entre 2006 e 2100 em relação ao período 1986 a 2005 [8]

Obteve-se, a partir destes cenários, como mostrado na Figura 1, que o aumento da temperatura média global até 2035 relativo a 1986 até 2005 estará no intervalo entre 0,3 e 0,7°C. Esta avaliação baseia-se em diversas linhas de evidência, entre as quais assume-se que não haverá alterações seculares na irradiação solar global, nem grandes erupções vulcânicas.

Entre os anos de 2081 e 2100, relativamente a 1986 até 2005, pela concentração dos diversos cenários, prevê-se um aumento de 0,3 a 1,7°C para o RCP 2.6; um aumento de 1,1°C a 2,6°C para o RCP 4.5; para o RCP 6.0, de 1,4 a 3,1°C; e, para o RCP 8.5, de 2,6 a 4,8°C [8].

Relativamente à média para o final do século XXI, em relação ao período de 1986 a 2005, a alteração da temperatura global da superfície para os 3 RCP's se dará num aumento superior aos 2°C. Ainda segundo o relatório do IPCC, poderá ser verificada uma maior frequência de temperaturas extremas nas áreas continentais tanto à escala diária quanto à sazonal. Podendo ocorrer ondas de calor mais frequentemente e com maiores durações assim como, durante o inverno, extremos ocasionais de frio [8].

Dessa forma são considerados os cenários (de mitigação das emissões dos GEE, de contenção das emissões parcialmente; e um cenário em que não são feitos esforços adicionais para a contenção das emissões) para os anos de 2020, 2080 e 2100. Tendo por base as trajetórias representativas das concentrações RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5. Informações estas resumidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo dos cenários e aumentos de temperatura para os anos em estudo.

Ano	RCP	Cenário	Aumento de Temperatura Previsto (°C)
2020	2.6	mitigação das emissões dos GEE	0,3
	4.5	intermédio	0,4
	6.0	intermédio	0,5
	8.5	não incluem esforços adicionais de contenção das emissões	0,7
2080	2.6	mitigação das emissões dos GEE	0,3
	4.5	intermédio	1,1
	6.0	intermédio	1,4
	8.5	não incluem esforços adicionais de contenção das emissões	2,6
2100	2.6	mitigação das emissões dos GEE	1,7
	4.5	intermédio	2,6
	6.0	intermédio	3,1
	8.5	não incluem esforços adicionais de contenção das emissões	4,8

Com isso, segundo o AR5, conclui-se que a emissão continuada dos GEE provocará, como já referido anteriormente, um aumento significativo da temperatura durante o século XXI, além de mudanças duradouras no sistema climático como um todo. Os quais provocarão impactos críticos e irreversíveis à população e ecossistema [9].

2.4. Histórico Construtivo em Portugal

2.4.1. Edifícios Vernáculos

Bernand Rudofsky foi o primeiro a utilizar o termo vernáculo em contexto arquitetónico, quando em seu livro *“Architecture without architects: a short introduction to non-pedigreed architecture”* [13] escreveu “Por falta de um rótulo genérico chamar-lhe-emos vernacular, anónimo, espontâneo, indígena, rural, conforme o caso”. Apesar do seu vasto conhecimento do ramo da arquitetura, com inúmeros estudos a respeito da arquitetura vernácula, a sua definição desta como anónima e espontânea foi, posteriormente, considerada limitada e problemática. Isso porque a arquitetura vernácula é passada entre geração de forma empírica e com base na utilização de materiais específicos [13].

O termo “vernáculo” é derivado do latim “vernaculus” e tem como significado algo doméstico, nativo ou indígena. Na arquitetura, o termo refere-se a uma arquitetura caracterizada pela utilização de materiais e conhecimentos de um determinado local. A arquitetura vernácula representa a maior parte das construções feitas nas sociedades pré-industriais e inclui uma gama muito ampla de edifícios, tradições construtivas e métodos de construção, dependendo da região a que se refere.

Sendo as construções vernaculares práticas e simples, esta arquitetura constitui grande parte dos edifícios construídos. Mesmo assim, é um tipo de arquitetura pela qual se tem grande negligência nas histórias tradicionais de projeto, construção e reabilitação, pelo seu método “rústico” de construção.

O arquiteto estadunidense Frank Lloyd Wright descreveu a arquitetura vernácula como o “edifício popular que cresce em resposta às necessidades reais, adaptando-se ao ambiente por pessoas que não sabiam melhor do que encaixá-lo com sentimento nativo”, como referido no livro *“Dwellings: the vernacular house world wide”* de Paul Oliver. Com isso, o arquiteto sugeriu que a arquitetura vernácula é, na verdade, uma forma exordial, sem grande perspicácia na sua conceção. Mas, dentro do contexto ele também afirmou que “para nós, mais vale a pena o seu estudo do que todas as tentativas académicas altamente autoconscientes de beleza na Europa” [14].

2.4.1.1. Edifícios em Terra

O início da utilização da terra na construção não tem uma data específica, mas acredita-se que não está muito longe da realidade dizer que esta se iniciou com a criação das primeiras sociedades agrícolas, num período entre 12.000 e 7.000 a.C.. Existem resquícios que apontam exemplares de habitações em blocos de adobe na Bacia do Rio Tigres, datadas de aproximadamente 7.500 a.C.. Sendo

assim, pode-se estimar que as primeiras construções feitas com sistemas construtivos à base de terra tiveram origem há mais de 10.000 anos atrás [15].

Independente da data de início da utilização da terra como objeto da construção, é possível encontrar diversos casos de construções em terra que ainda se encontram presentes nos dias de hoje, mesmo tendo sido executadas há milhares de anos atrás [15].

Um exemplo da utilização do material em grandes construções é a própria Muralha da China, construída há aproximadamente 3.000 anos, tendo partes bastante extensas realizadas em taipa.



Figura 2 - Muralha da China com utilização de Taipa [16]

Outro exemplo de uma grande estrutura realizada a partir do uso de terra é a Pirâmide de Uxmal, localizada no México e datada aproximadamente entre os séculos VI e X. A parte exterior da estrutura é recoberta em pedras, mas todo o seu interior foi realizado em terra compactada. Assim como essa pirâmide, ainda é possível encontrar várias outras construções realizadas a partir da utilização de adobe na América Central, por ter sido um material comumente utilizado na região. Outros exemplos são as ruínas da cidade de Chanchán, localizada no Peru, e o Povoamento de Taos, no estado do Novo México, erguido entre 1.000 e 1500 d.C. [15].

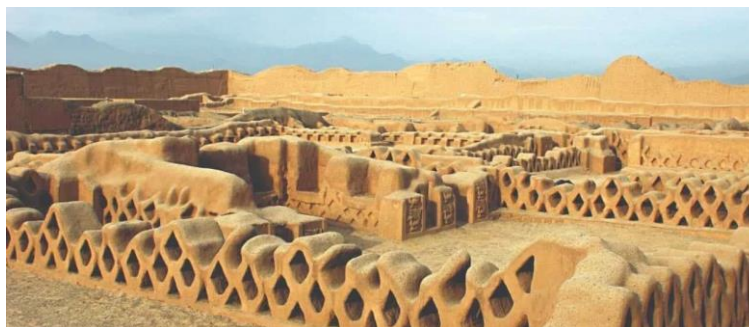


Figura 3 - Ruínas de Chanchán, Peru [17]

Os sistemas construtivos em terra também são encontrados em cidades históricas ainda habitadas, referindo-se a título de exemplo a cidade de Shibam, que remonta ao século XVI, localizada em Iémen. Nesta cidade são encontrados edifícios de até 11 andares. As paredes exteriores destes edifícios foram realizadas em adobe, tendo uma espessura relativamente grande na sua base e que, conforme aumentam os andares, se estreitam gradualmente, para diminuir o peso da estrutura e aumentar sua estabilidade [15].



Figura 4 - Cidade de Shibam, Iémen. [18]

Em Portugal, a construção em terra iniciou-se há várias centenas de anos e, apesar de no início do século XX ter começado a ser substituída pela alvenaria em barro cozido, no final deste mesmo século iniciou-se um movimento no sul do país que se caracterizou pela retomada do uso de técnicas ancestrais de construções, nomeadamente, as realizadas a partir da terra nesta região. Com isso, ainda hoje é possível encontrar edifícios antigos por Portugal, que ilustram os diferentes tipos de arquitetura vernácula do país.

A construção em terra em Portugal é uma tradição ancestral, principalmente encontrada na região sul do país. A utilização do material na região está maioritariamente ligada às condições sociais e económicas dos cidadãos, na sua maioria agricultores, que, devido à abundância, qualidade e facilidade de moldagem, elegeram a terra como um material de excelência para a construção. Isto resultou, então, em um património cultural e arquitetónico bastante rico para a região, principalmente no que diz respeito ao Alentejo [19].

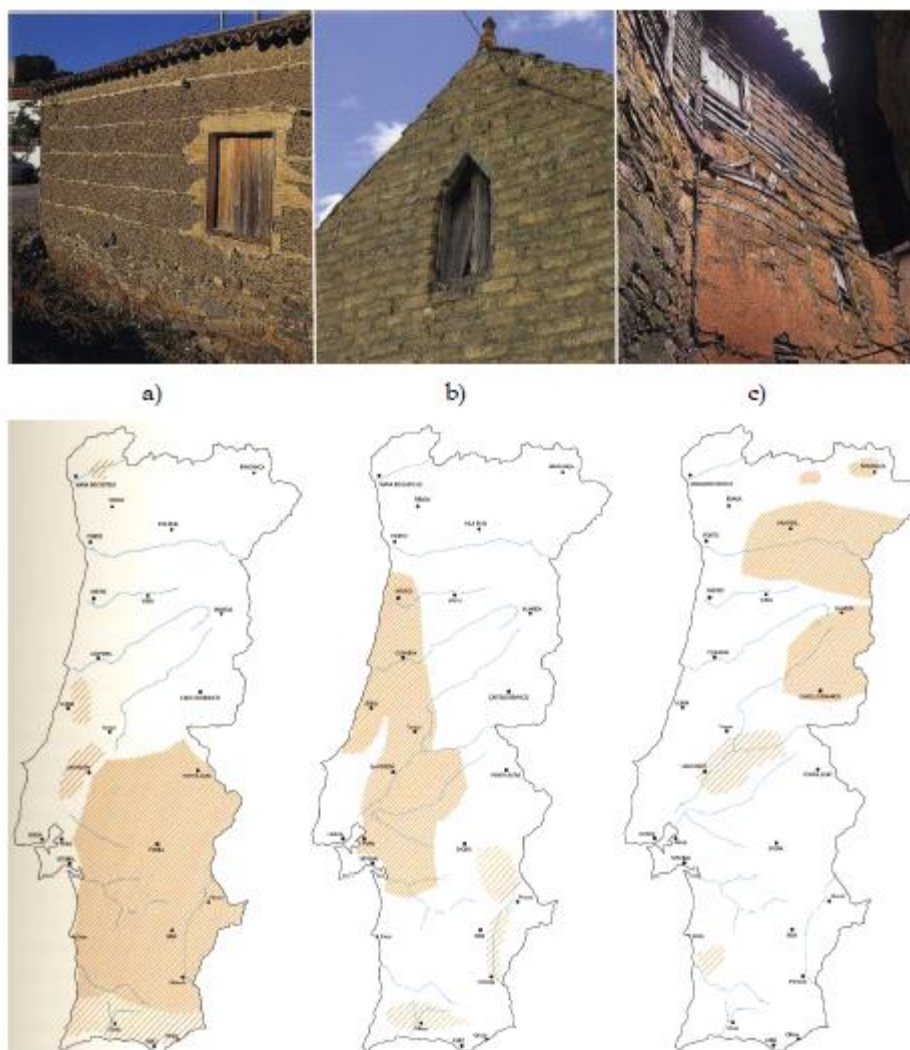


Figura 5 - Distribuição geográfica das construções tradicionais portuguesas em terra: a) Taipa; b) Adobe; c) Tabique.

De acordo com o diagrama feito com CRATerre, apresentado na Figura 6, de 1986, são considerados três tipos fundamentais de sistemas de construção em terra, tendo-se, dentro de cada tipo, 6 sistemas construtivos, resultando num total de 18. Em Portugal, entre os vários métodos de construção em terra crua, destacam-se quatro: a taipa, como sistema monolítico; os blocos de terra comprimida (BTC) e o adobe, que são sistemas de alvenaria; e o tabique, que é um sistema de enchimento ou revestimento. [20].

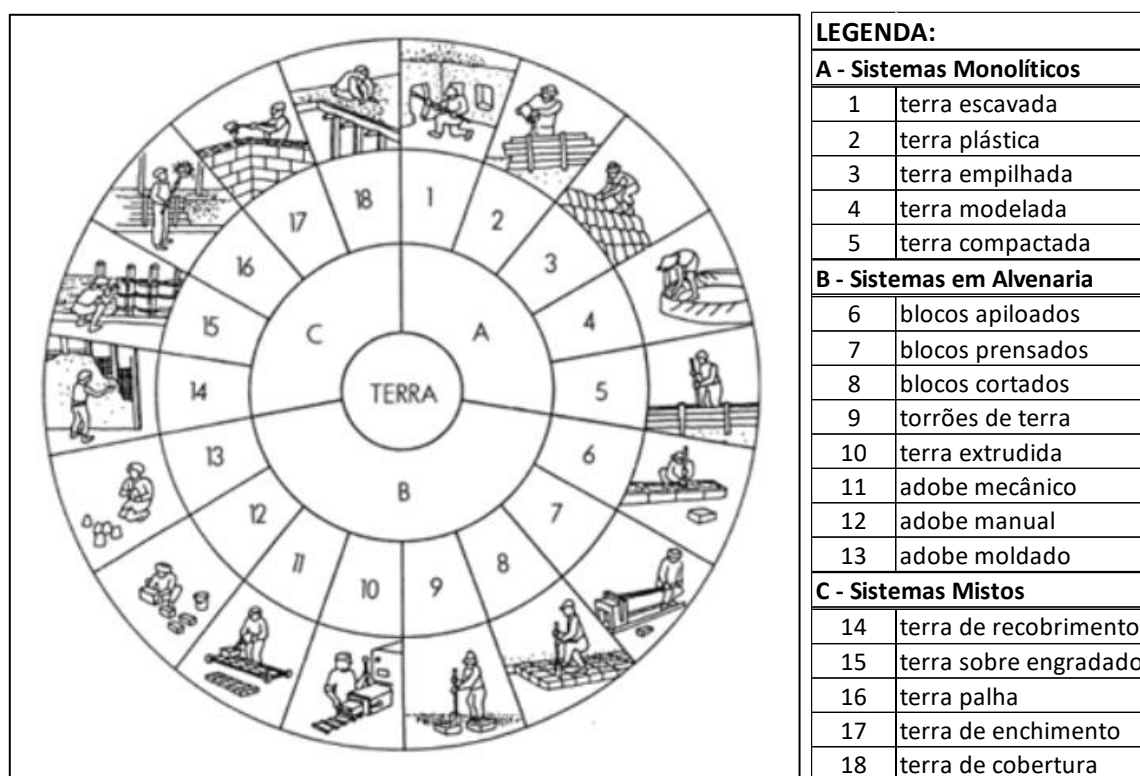


Figura 6 - Diagrama das técnicas construtivas com terra, estabelecido pelo CRATerre [21].

No caso deste estudo, serão apenas analisados os comportamentos dos sistemas realizados em taipa e em blocos de terra comprimida.

Vantagens e Desvantagens da Utilização do Material

Quando em comparação com as construções que utilizam materiais considerados modernos (alvenaria, betão, aço, etc.), a construção em terra apresenta as seguintes vantagens [22]:

- Estabilidade e equilíbrio no ambiente interior, por meio da fácil absorção e libertação de humidade, o que permite uma maior salubridade na construção;
- Apresenta uma inércia térmica ótima das paredes, ou seja, uma capacidade de armazenamento de calor, aproveitando os ganhos solares, reduzindo as necessidades energéticas do ambiente interior;
- Devido à massa elevada das paredes realizadas em terra, apresenta um ótimo isolamento acústico também;
- Sendo um material incombustível, apresenta uma boa resistência ao fogo;
- É considerado um material com reduzido potencial impacto ambiental, pois, devido à possibilidade de utilização de terra local, na grande maioria dos casos, não é necessário o transporte e o processamento do material, o que resulta numa menor utilização de energia

e, consequentemente, menores impactes ambientais. Além disto, a terra é um material reutilizável e que pode ser devolvido a seu local de origem sem ser necessário o tratamento prévio;

- É um processo construtivo simples e, por isso, adequado à autoconstrução com recurso a ferramentas simples.

Entretanto, há também algumas consideráveis desvantagens associadas à utilização da terra como material construtivo, entre elas pode-se apresentar:

- Falta de uma regulamentação adequada para a construção;
- Reduzida resistência mecânica, principalmente à tração e flexão, o que faz com que este tipo de construções apresentem uma resistência inferior (em relação às estruturas porticadas em betão armado) a ações perpendiculares ao seu plano, nomeadamente aos sismos, o que acaba por limitar a altura dos edifícios;
- Fendilhação e consequente diminuição da resistência do material, resultado da perda de água por secagem que causa retração;
- Baixa resistência à ação da água, o que implica a necessidade de estabilização por meio da introdução de ligantes (cimento, betume ou cal) ou outros métodos que possam proteger estes sistemas construtivos, como por exemplo, o prolongamento de beiral, a introdução de reboco de desgaste, entre outros;
- Necessidade de manutenções mais frequentemente do que o que ocorre em construções em alvenaria moderna, pois há a ocorrência de uma degradação mais rápida do material.

Apesar das desvantagens apresentadas, deve-se ainda levar em conta que a construção em terra pode ser bastante mais económica, o que torna viável sua utilização em países considerados em desenvolvimento. Porém, em países desenvolvidos, com a questão da sustentabilidade e necessidade de redução de emissão dos GEE, este material para a construção tem se tornado cada vez mais popular e visado. Podendo ser notável, nos últimos anos, a promoção de reabilitação e preservação de construções realizadas em terra (Centro da Terra, CRATerre, etc.), assim como tem-se visto movimentos que promovem uma maior regulamentação para a utilização da terra como um material construtivo em diversos países.

2.4.1.2. Taipa

A técnica da taipa é predominantemente encontrada em zonas mais áridas e utiliza um material arenoso com agregados (que incluem gravilha, areia, siltes e pequenas quantidades de argila), que são humedecidos com baixo teor de água. Pertencente a um sistema chamado monolítico, a taipa consiste na construção de paredes resistentes e espessas (normalmente entre 50 e 60cm), a partir da compactação da terra *in situ* entre taipais (nome dado à cofragem).

A construção em taipa foi utilizada pela primeira vez na França, no ano de 1562, mais especificamente na cidade de Lyon, também sendo conhecida por “*pisé*”. Este termo, então, foi utilizado à construção de paredes com 50cm ou mais de espessura, que são materializadas por meio da compactação da terra entre esses dois moldes colocados paralelamente e removidos após a secagem do material [22].

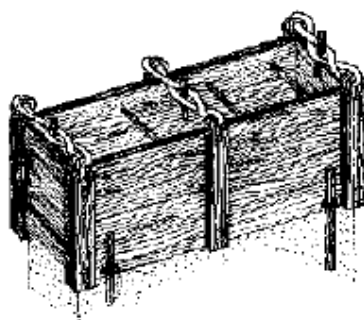


Figura 7 - Molde de cofragem [22]

A compactação da terra pode ser realizada de forma manual, com a ajuda de um maço/pilão de madeira ou, como é mais comumente realizado atualmente, com a utilização de equipamentos pneumáticos. As paredes são construídas por fiadas sucessivas em altura, sendo a fiada seguinte fixada à antecedente por meio de peças denominadas “agulhas” [23].

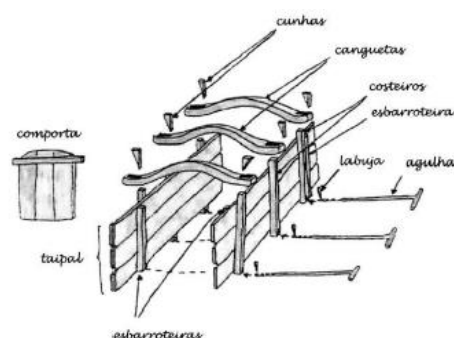


Figura 8 - Componentes de um taipal tradicional. [22]

No passado, as paredes eram construídas a partir da colocação da terra húmida entre os dois taipais de madeira desmontáveis, removidos quando a terra estivesse completamente seca. Nos dias atuais, para a melhoria e maior agilidade do processo, utiliza-se da aplicação de cofragens metálicas deslizantes, sistemas mecânicos de compactação (como citado anteriormente) e, também, da utilização de sistemas de projeção mecânica [22].

No processo tradicional da construção, os utensílios comumente utilizados são: painéis de cofragem em madeira, cavador, pá, picareta, enxada, fita e escala métricas, balde ou cesto, martelo, fio-de-prumo, mangueira de nível, nível, esquadro de madeira, fio de pedreiro, colher de trolha, serrote e pilão de madeira, como mostrado na Figura 9.

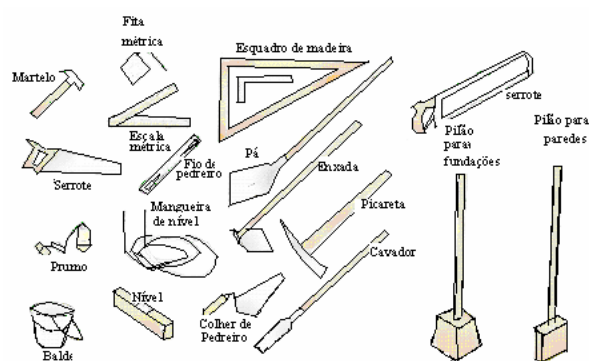


Figura 9 - Utensílios utilizados no processo de construção tradicional em taipa [22]

Com o tempo e evolução do conhecimento técnico, foi-se melhorando as características mecânicas e a durabilidade deste material. Sendo esta conseguida principalmente por meio da melhoria na técnica e nos utensílios a serem utilizados para a construção, mas também com a seleção criteriosa do solo, na utilização de aditivos (como o cimento Portland) e na técnica de compactação do solo [22].



Figura 10 - Arquitetura Moderna com a utilização da Taipa [24]

Em Portugal, a técnica construtiva em taipa é maioritariamente encontrada na região Sul, principalmente na região do Tejo até o Alentejo, tendo sido considerada a técnica mais utilizada até meados do século XX. Apesar de muitas destas construções serem encontradas em situação de abandono, principalmente nas zonas rurais, por ter caído em desuso, o aumento das preocupações ecológicas e ambientais no setor construtivo e a procura de materiais considerados mais sustentáveis fez com que houvesse uma mudança de mentalidade, trazendo a técnica de volta à atenção como possibilidade construtiva e inovando-a, trazendo a possibilidade da construção de edifícios modernos utilizando da técnica, como apresentado na Figura 10 [23].

2.4.1.3. Blocos de Terra Comprimida

Os blocos de terra comprimida são, como o adobe (sendo um descendente moderno deste), uma forma de alvenaria moldada em terra. Na produção desses, é comum otimizar a mistura de terra com a adição de argila ou areia, além de um baixo teor de ligantes minerais como, por exemplo, cimento ou cal [22].

A ideia de realizar a compactação da terra para melhorar a qualidade e o desempenho dos blocos não é nova, tendo sido os primeiros blocos de terra comprimida feitos por meio da utilização de pilões de madeira. Assim sendo, a técnica para a produção deste consiste no apiloamento da terra em formas de madeira, podendo ser realizado manualmente – com o auxílio de um pilão – ou, como mais comumente realizado, utilizando prensas ou equipamentos industriais específicos [15].

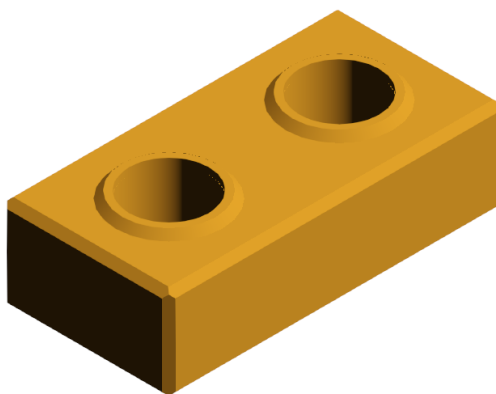


Figura 11 - Bloco de Terra Comprimida (Autor, 2022).

A *Cinva-Ram* foi a primeira prensa manual utilizada para a fabricação de BTC. Inventada nos anos 1950, no âmbito de um projeto de investigação sobre habitação rural na Colômbia, esta possibilitou a realização de habitações de baixo custo e, também, uma melhoria nas características dos blocos de adobe. As melhorias são principalmente no aumento da resistência mecânica da construção, isto porque possibilita um maior contato entre as partículas constituintes; e, também, na diminuição da porosidade, por utilizar um equipamento e não ser realizado manualmente, é mais facilmente possível ter uma diminuição dos vazios [22].

Quanto às características técnico-funcionais, estas são bastante semelhantes às do adobe. Tendo como principal diferença o facto de o adobe atingir a sua resistência máxima com o processo de cura, enquanto o BTC atinge a sua resistência máxima ao ser compactado com a prensa. Por meio da compactação da terra com uma prensa, as qualidades do material são melhoradas, além de ficarem

mais regulares, com uma densidade maior, a resistência à compressão e à ação da água (erosão e degradação) aumentam [22].

Em Portugal, as construções em alvenaria de terra são maioritariamente encontradas em zonas aluvionares, próximas aos rios, uma vez que se necessita de uma grande quantidade de água para a produção destes e um maior teor de argila. Sendo que a maior concentração de construções em alvenaria de terra no país se encontra em Aveiro, Coimbra e Tomar. Porém, quanto ao BTC, por ser considerada uma técnica moderna e de fabrico industrial, pode ser desenvolvido em qualquer região, quando na presença de uma terra com boas características para a sua produção [20]. É possível encontrar edifícios bastante modernos que utilizam da técnica, como o apresentado na Figura 12.



Figura 12 - Arquitetura Moderna com a utilização de BTC [25]

2.5. Propriedades Térmicas da Envolvente das Construções

Transferência de calor é a denominação dada ao processo em que há a transferência de uma energia entre dois sistemas em determinado gradiente de temperatura. Assim sendo, esta transferência de energia só se pode dar quando há uma diferença de temperatura entre os dois sistemas [26].

As paredes são os elementos construtivos separadores de ambientes, sendo as paredes da envolvente exterior as que separam o ambiente exterior do interior. Considerando os ambientes externo e interno como dois sistemas, é pela parede da envolvente exterior que ocorre a transferência de calor [27].

Considerando que a temperatura do ambiente interior é superior à do ambiente exterior, o fluxo de calor se dará, por meio da parede, do interior para o exterior. Sendo que o calor transferido entre o ambiente interior e exterior é processado pelas seguintes etapas: q_1 , q_2 e q_3 , como apresentado na Figura 13 [28].

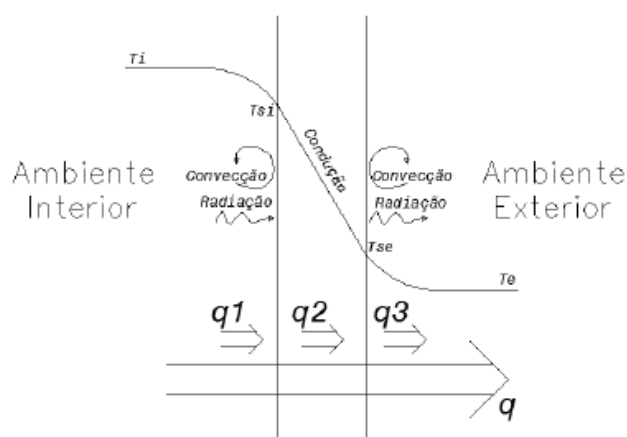


Figura 13 - Transferência de calor entre dois ambientes por meio de uma parede [27]

Na primeira etapa (q_1), a troca de calor é promovida por convecção e radiação entre o ambiente interior e a superfície interior da parede. Na segunda (q_2), a troca de calor é promovida por condução, sendo transferido por meio da parede (um sólido). E, na última etapa (q_3), a transferência de calor é novamente promovida por radiação e convecção entre a superfície exterior da parede e o ambiente exterior [27].

O principal método de controle da transferência de calor entre os ambientes externo e interno de uma construção é por meio do conhecimento do coeficiente global de transmissão térmica (U) da envolvente exterior e a inércia térmica (I) desta.

Coeficiente de Transmissão Térmica (U)

Segundo o Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios (Manual SCE), o coeficiente de transmissão térmica (U) é o parâmetro que traduz a transmissão de calor que ocorre, num regime fechado permanente, por meio de um elemento construtivo. Ou seja, é a habilidade de determinada barreira condutiva ou convectiva de transmitir calor. O valor de U de elementos constituídos por um ou vários materiais, em camadas de espessura constantes, é calculado pelo inverso da resistência térmica total (R_{tot}) do elemento. Assim sendo, o coeficiente de transmissão térmica caracteriza quanto de energia sob a forma de calor que permeia 1m^2 de superfície de uma parede, em um segundo, quando há uma diferença de temperatura entre o interior e o exterior de 1°C [29].

Dessa forma, para o cálculo do valor do U, é necessário o conhecimento das características da parede, como a espessura, os materiais utilizados e a condutibilidade térmica destes materiais. Com isto, é possível realizar o cálculo da resistência térmica de todos os elementos construtivos, a partir da equação 1.

$$R_t = R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se} \left[\text{m}^2 \frac{\text{C}}{\text{W}} \right] \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

R_t – Resistência térmica total do elemento construtivo;

R_{si} – Resistência térmica superficial interior;

R_i – Resistência térmica da camada i do elemento construtivo;

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior.

Sendo que estes valores também podem ser retirados do ITE 50 do LNEC.

Inércia Térmica (I)

Edifícios, como sistemas térmicos, têm a capacidade de absorver e armazenar energia térmica por meio da inércia térmica dos elementos construtivos que os compõem. A quantidade de energia térmica e a velocidade em que esta é absorvida determinam a inércia térmica de um edifício [27].

Dessa forma, a inércia térmica tem um papel fundamental no comportamento do edifício, considerando que a energia que os elementos construtivos acumulam pode ser utilizada para a melhora das condições de conforto térmico no interior do edifício [27].

Como exemplo, durante uma estação de aquecimento (na qual a temperatura exterior é inferior à temperatura no interior do edifício), a radiação que permeia o envidraçado e incide em superfícies com elevada inércia térmica, ou seja, elementos que armazenam elevada quantidade de energia, permite que esta energia seja posteriormente libertada quando a temperatura do espaço for mais baixa. Por outro lado, na estação de arrefecimento, a inércia térmica, em conjunto com estratégias de arrefecimento por ventilação noturna, traduz-se numa alta absorção de calor no espaço durante o dia, permitindo que o calor acumulado nos elementos construtivos possa ser liberado durante o período da noite e, assim, se reestabeleça a capacidade de acumular o calor em excesso no dia seguinte, mantendo o ambiente confortável [27].

A inércia térmica depende, teoricamente, da espessura e da difusibilidade térmica dos elementos construtivos, entretanto, por método de simplificação, em termos práticos, a massa dos elementos é considerada como índice de inércia térmica. Dessa forma, quanto mais “pesado” o elemento construtivo, mais amortecida e defasada é a onda de calor transmitida do exterior [27].

Assim sendo, segundo o Manual SCE, a inércia térmica interior, como capacidade que os elementos construtivos têm de armazenamento de calor, varia em função da massa superficial útil por metro quadrado de área interior útil do pavimento (I_i). E a expressão que determina o I_i é apresentada na equação 2 [29].

$$I_t = \frac{\sum_i M_i * r_i * S_i}{A_p} \quad [kg/m^2] \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

I_i – Massa superficial útil por metro quadrado de área interior útil de pavimento [kg/m^2];

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

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

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

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

A massa superficial útil (M_{si}) dos elementos depende também do posicionamento de cada camada no elemento construtivo e da sua constituição. Assim sendo, para além da importância da massa dos próprios elementos construtivos, ainda se deve ter em conta a constituição da camada em contato com o ambiente interior do edifício para a inércia térmica da construção [27].

Na Figura 14 é possível observar graficamente o comportamento de um edifício com isolamento térmico na parte exterior e com uma parede de elevada massa em contato com o interior, mostrando uma solução com forte inércia térmica [28].

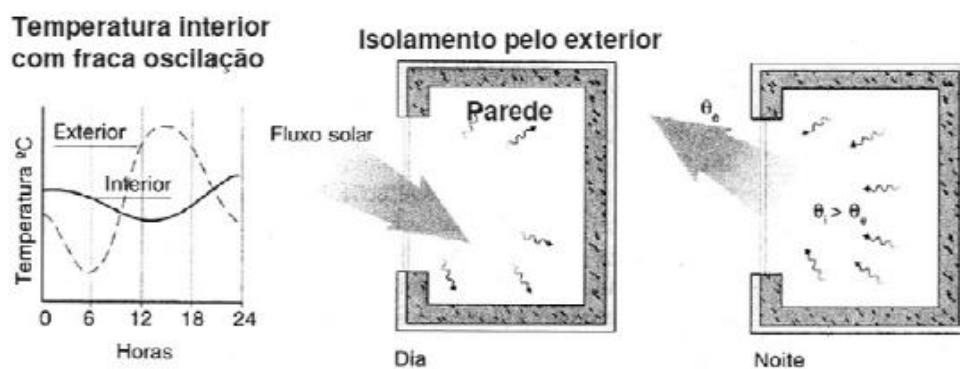


Figura 14 - Efeito da inércia térmica com isolamento térmico pelo exterior [28].

Comparando com a Figura 14, a Figura 15 ilustra graficamente o comportamento térmico de um mesmo edifício agora com o isolamento térmico pelo interior, mostrando uma solução com fraca inércia térmica [28].

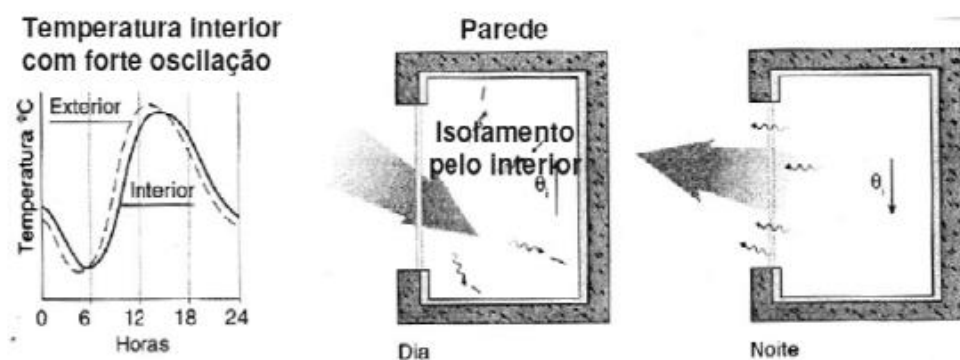


Figura 15 - efeito da inércia térmica com isolamento térmico pelo interior [28]

Para a determinação da inércia térmica, deve-se calcular a massa superficial útil por metro quadrado de área interior útil de pavimento (l_t), e utilizar da tabela apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Classe de Inércia Térmica, segundo o Manual SCE.

Classe de Inércia Térmica	l_t [kg/m ²]
Fraca	$l_t < 150$
Média	$150 \leq l_t \leq 400$
Forte	$l_t > 400$

Para a otimização do desempenho energético do edifício, é fundamental que a inércia térmica seja adaptada e integrada a outras estratégias, sendo importante a integração da inércia térmica ao isolamento térmico. Este, como mostrado no exemplo das Figura 14 e Figura 15, deve ser aplicado de forma contínua e pelo exterior, para um melhor contributo de armazenamento das temperaturas médias do clima, favorecendo o conforto no interior do ambiente. Tendo em conta que as temperaturas médias são continuamente armazenadas por materiais pesados, devem-se evitar que os extremos (frio e quente) afetem diretamente no armazenamento. Dessa forma, é o isolamento térmico, associado à inércia térmica, que pode proteger de grandes amplitudes térmicas o interior do ambiente [27].

A inércia térmica é essencial para a otimização do desempenho térmico dos edifícios, pois constitui uma estabilizante fonte de energia térmica durante a vida do útil do edifício [27].

2.6. Comportamento Térmico das Construções em Terra – Estado da Arte

A importância de estudar o comportamento térmico de construções em terra vem da escassez do conhecimento e de estudos realizados neste âmbito. Mesmo que haja um crescente interesse a respeito do tema, na parte de arquitetura em terra em geral, ainda são reduzidos os estudos relativos às características térmicas do material e seu comportamento, tanto mundial quanto nacionalmente.

Existe uma dificuldade de definir valores precisos e generalizados a respeito da condutibilidade e da inércia térmicas das construções em terra, uma vez que utiliza materiais de propriedades que variam de região para região, tendo assim uma heterogeneidade elevada ao longo de um só elemento construtivo. Embora este estudo seja no âmbito de paredes construídas em BTC's e taipa, a bibliografia utilizada é mais abrangente, incidindo também em estudos de técnicas construtivas em adobe [30].

Têm sido realizados estudos experimentais, nos últimos anos, com monitoramento *in situ* ou em células de teste exteriores (impostas às solicitações climáticas exteriores), a respeito do comportamento térmico de soluções de construções em terra. Alguns trabalhos que se destacam são os realizados por Taylor e Luther, em 2003 [31]; Allinson e Hall, em 2010 [32]; Meneses, em 2011 [33]; Goodhew, em 2000 [34]; e Soebarto, em 2009 [35].

Taylor e Luther (2003) realizaram uma análise de um caso de estudo na Austrália, no qual chegaram à conclusão de que a elevada massa, proporcionalmente à inércia térmica, das paredes em terra (com 30cm de espessura), melhorava significativamente as suas propriedades térmicas, mesmo que a resistência térmica do material seja reduzida [31].

Allinson e Hall (2010) fizeram uma análise da taipa estabilizada quanto ao seu comportamento higrotérmico, por meio de um caso de estudo, avaliado *in situ*, com o uso *software* WUFI Plus v1.2. E, em seguida, compararam o comportamento da parede com outras soluções de revestimento (folha metálica, placa de gesso pintada e somente a placa de gesso). Com isso, concluíram que a terra tem uma significativa diminuição nas amplitudes das flutuações da humidade relativa no interior do edifício e da frequência de períodos com grande humidade na superfície das paredes. Dessa forma, utilizando a terra como material construtivo, há uma diminuição na quantidade de energia utilizada nos processos de humidificação/desumidificação dos espaços interiores, se comparado com outros materiais que também foram testados [32].

Meneses et al. (2011) fizeram uma campanha experimental com a monitorização de células teste sujeitas às solicitações climáticas exteriores. Foram construídas 3 células com adobes de 3,75cm (na escala utilizada de 1:4) de espessura e com diferentes constituintes na sua composição. O objetivo era realizar a avaliação da inércia e condutibilidade térmicas das paredes em adobe para, posteriormente,

comparar com os requisitos regulamentares mínimos. Os valores resultantes da condutibilidade térmica ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$) ficaram compreendidos entre 0,59 (para a célula com aglomerado de cortiça) e 0,95 (para a célula com cal hidratado, terra moderadamente argilosa e areia) [33].

Goodhew et. al (2000) realizaram o monitoramento de 3 casos de estudos reais, apresentando valores para as propriedades térmicas da construção em terra, numa altura em que a informação nesta área ainda era escassa. No estudo, obtiveram-se valores de coeficiente de transmissão térmica (U) entre 0,7 e $1,6\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$, para espessuras de paredes entre 25 e 55cm. Considerando que a Grã-Bretanha é um país bastante exigente na regulamentação térmica dos edifícios (tendo um valor de U máximo próximo aos $0,35\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), os resultados obtidos ficaram muito longe dos requisitos mínimos impostos [34].

Soebarto (2009), por sua vez, também realizou uma caracterização de 3 amostras, porém agora realizados em construções em taipa. Nesta investigação foi obtido um valor de $1,25\text{W/m} \cdot \text{K}$ para a condutibilidade térmica da taipa (regulamentado pela AIRAH [*Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating*, 2000] para uma taipa com massa volúmica de 1540kg/m^3). Com isso, concluiu-se que, numa situação de estação de aquecimento, a diferença das temperaturas interiores dos edifícios sem isolamento e das com isolamento poderia variar em 5°C , enquanto na situação de uma estação de arrefecimento, os valores obtidos foram similares nas 3 soluções [35].

Quanto à avaliação experimental do comportamento térmico da terra com a adição de outros materiais, são destacados os estudos desenvolvidos por Goodhew e Griffiths, realizado em 2004 e de Hall, realizado em 2005.

Goodhew e Griffiths, em 2004, baseando-se nas pesquisas de Goodhew (de 2000), apresentaram soluções construtivas para as paredes, baseando-se nos objetivos impostos pela regulamentação. Ao contrário de Meneses (2011), utilizaram materiais isolantes introduzidos na estrutura da parede em solução de duplo pano, com o isolamento em seu interior e não misturado com a terra. O objetivo principal era a determinação das propriedades térmicas de soluções sustentáveis comparando-as às soluções tradicionais, para ainda demonstrar como poderia ser adaptada a construção em terra às exigências impostas pela regulamentação na Grã-Bretanha. Com isso, conseguiram desenvolver diferentes soluções construtivas, com diferentes espessuras, atingindo valores de transmissão térmica bastante menores. Dessa forma, puderam alcançar o valor máximo regulamentado pela Grã-Bretanha de $0,35\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ [36].

Hall, em 2005, usou, posteriormente, duas câmaras climáticas para estudar o comportamento higrotérmico da construção em taipa estabilizada (de paredes de 30cm de espessura). A parede foi submetida a condições de humidade e precipitação e, com isso, foi possível analisar que a humidade

penetrada para o interior da parede é significativamente reduzida e, também, que o aumento da percentagem de humidade relativa é muito pouco significativo [37].

Outra solução que tem apresentado contínuo desenvolvimento em terra são os BTC's. Esta, como já referido anteriormente, é uma solução pré-fabricada por meio da prensagem manual ou mecânica do material.

Entretanto, os solos, em grande parte das vezes, não têm o cumprimento dos requisitos mínimos impostos, não tendo assim as características necessárias para serem usados na construção. E, por isso, os blocos de terra comprimida estabilizados (BTCE) foram inventados. Nestes é adicionada uma percentagem pequena de materiais cimentícios, obtendo uma maior coesão entre as partículas.

A durabilidade e resistência à compressão do BTCE são as propriedades mais estudadas, por exemplo, por Morel et. al (2007) [38], Aubert et al. (2013) [39] e Morel e Pkla (2002) [40]. Existem também outros estudos em que são utilizados outros constituintes na mistura além do cimento. Alguns exemplos são a utilização das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar por Lima et al. (2012) [41]; cinzas de carvão e casca de mandioca por Villamizar et al. (20212) [42]; cal e metacaulino por Eires et al. (2009) [43].

Dentro de todas esses estudos são salientadas as vantagens de se utilizar o BTCE como solução construtiva. Ao ser comparado com outros materiais, este apresenta, para além das vantagens ambientais e ecológicas, um menor custo de transporte, visto que promove a utilização de materiais locais; um menor impacto e custos de expansão; menores emissões de carbono; pode criar uma economia local; e uma energia incorporada reduzida. Além disso, a higroscopia deste material traz benefícios para uma maior qualidade do ambiente, pois permite que a humidade no ambiente seja regularizada [44].

Mesmo com estes estudos realizados e aumento da investigação e desenvolvimento desta área, os trabalhos que envolvem a caracterização do comportamento dos BTCE's ainda são escassos, principalmente quando se trata do desempenho térmico e de durabilidade destas soluções. Por isso, é justificado o desenvolvimento de estudos na área, permitindo um aprimoramento do conhecimento na utilização da terra como material de construção.

2.7. *DesignBuilder*

A ferramenta de modelação *DesignBuilder* é um *software* utilizado para a verificação do desempenho energético, da produção de dióxido de carbono, da iluminação e do conforto de edifícios. Os seus pacotes são um conjunto de ferramentas integradas para auxiliar no projeto de construção sustentável e no ganho de créditos com esquemas ambientais, como o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) e o BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*).

É uma ferramenta desenvolvida para simplificar o processo de simulação da construção, que permite a rápida comparação da função e do desempenho de projetos de construção e fornece resultados precisos e que otimizam a eficiência energética, o conforto e o custo. A partir dela é possível ter uma análise de desempenho totalmente integrada, incluindo consumo de energia, conforto dos ocupantes, emissões de CO₂, dimensionamento dos sistemas AVAC (Sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado), temperaturas limite atingidas, iluminação natural, custo, otimização de design, CFD (*contract for difference*), créditos BREEAM/LEED e relatórios em conformidade com vários regulamentos nacionais de construção e padrões de certificação.

A hierarquia utilizada pelo programa é apresentada na Figura 16.



Figura 16 - Estrutura hierárquica do modelo de simulação no programa *DesignBuilder*.

É possível também realizar uma réplica automática de uma alteração feita em determinado nível para os níveis seguintes a partir deste tipo de estrutura. E, para facilitar a perceção destas alterações, é utilizado um código por meio de cores.

Para que a simulação do desempenho térmico seja possível, é preciso que haja a inserção dos dados de entrada da edificação, são estes: a geometria, os arquivos climáticos da região, as características termofísicas dos materiais utilizados na construção, a ocupação e o tipo de utilização do

edifício, entre outros. Desta forma, é possível realizar a análise do comportamento térmico do edifício com base no clima em que este será construído, sendo possível também a verificação de parâmetros como: temperatura radiante e do ar no seu interior e o contributo percentual dos elementos construtivos (vedações, envoltantes, cobertura, entre outros) para a carga térmica do edifício [45].

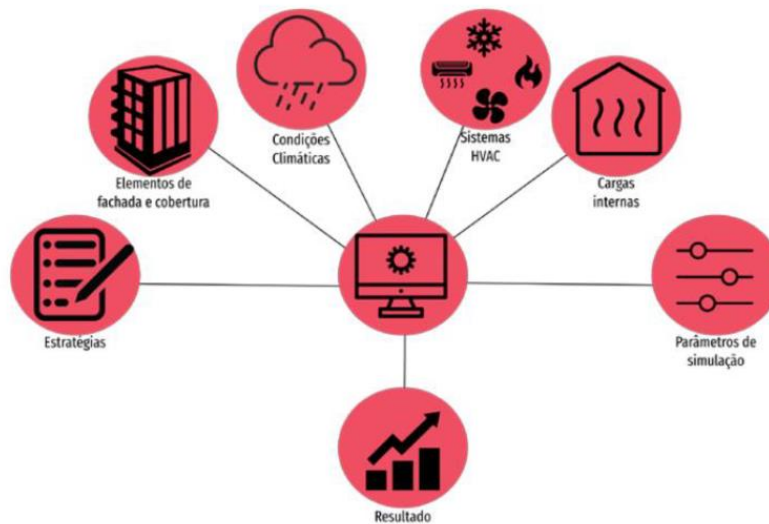


Figura 17 - Dados de entrada da simulação computacional [46].

Dessa forma, os programas de simulação de desempenho térmico, como o *DesignBuilder*, requerem uma série de parâmetros mínimos para permitir a análise, como a Figura 18 demonstra.

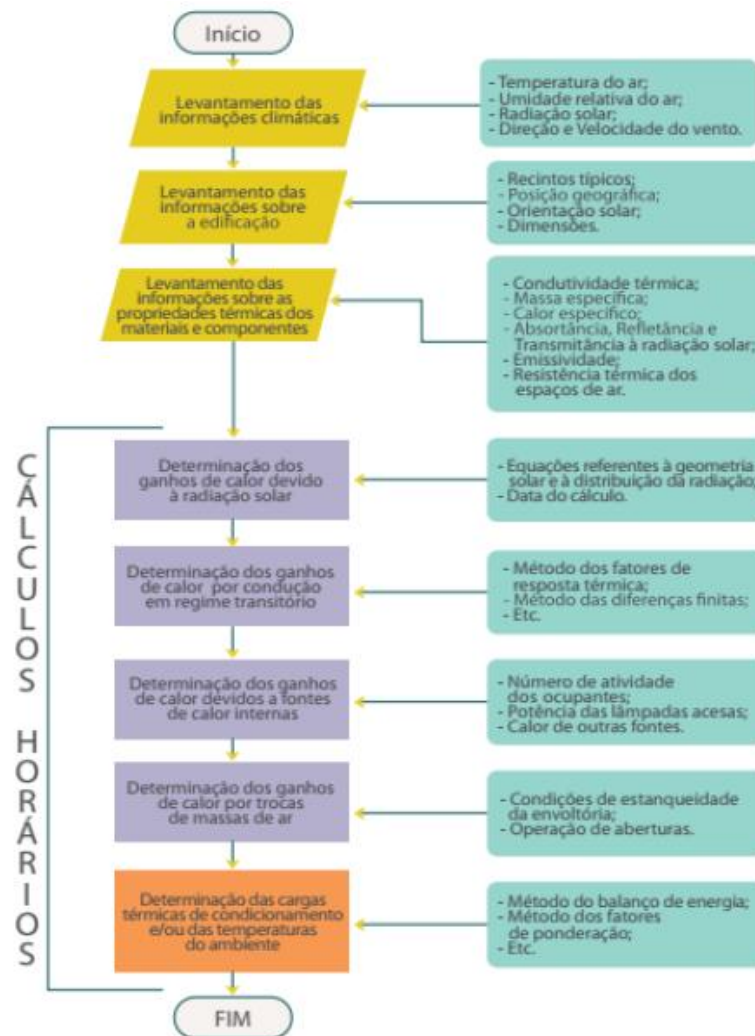


Figura 18 - Parâmetros mínimos necessários para avaliação de desempenho térmico por programas de simulação [47].

3. ESTUDO DE CASO

3.1. Modelo e Localização

O caso de estudo em questão foi modelado no próprio *software* em que se realizará a simulação do comportamento termo-energético, nomeadamente no *DesignBuilder*. Para os três casos de soluções construtivas foi utilizado do mesmo modelo, mostrado nas Figura 19 e Figura 20, alterando-se apenas as características do material utilizado nas paredes exteriores do edifício, para que a comparação fosse possível.

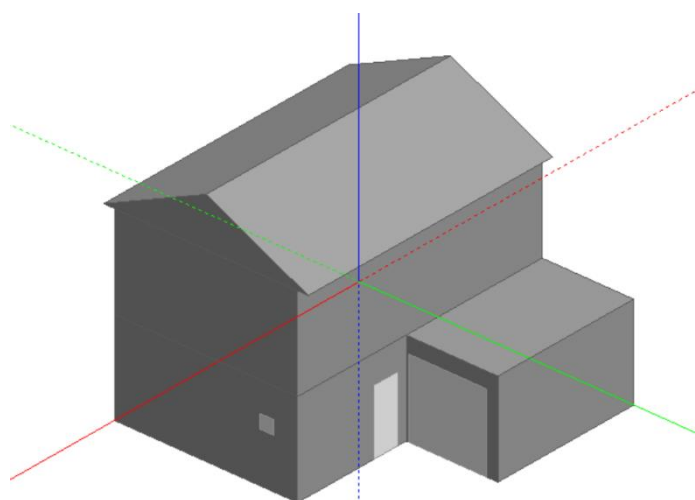


Figura 19 – Vista 1

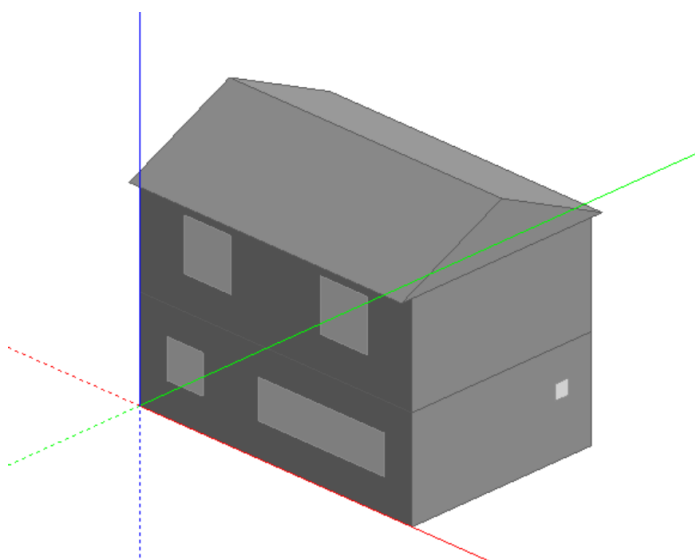


Figura 20 – Vista 2

O edifício em estudo é um T2, constituído por dois quartos, duas casas de banho; cozinha e sala de jantar e de estar, como pode ser observado nas plantas das Figura 21 e Figura 22.

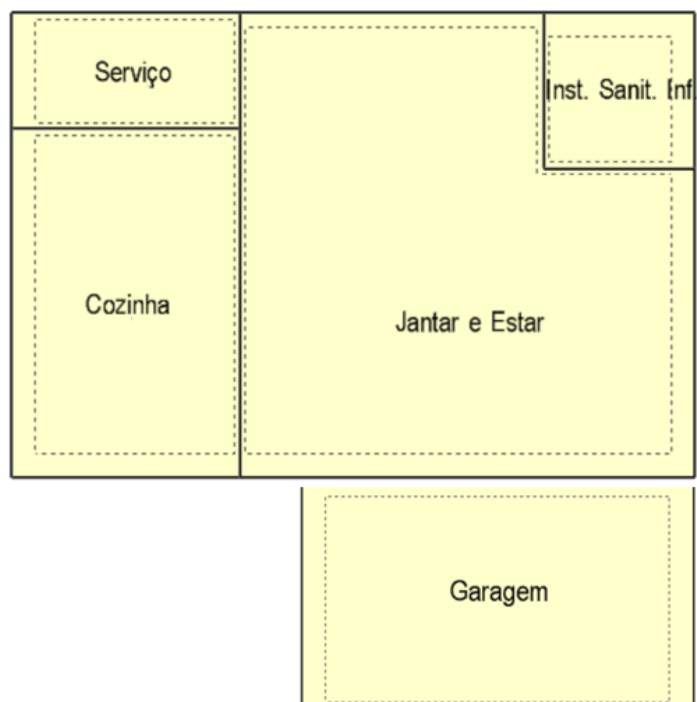


Figura 21 - Piso térreo do edifício.

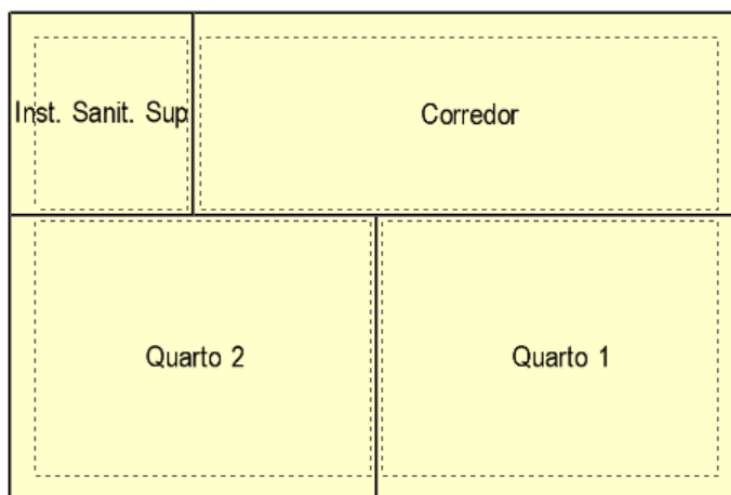


Figura 22 - 1º andar do edifício.

O edifício situa-se na região centro-sul de Portugal, no Alentejo, precisamente em Évora, considerada a capital desta região. Como mencionado anteriormente, a região do Alentejo é bastante conhecida pela utilização do material terra na construção, por conta da grande disponibilidade e também por ser um material com bastante eficiência em relação às altas temperaturas, frequentes nesta região

durante a estação de arrefecimento. Essa foi a razão principal para que esta região fosse escolhida para o caso em estudo.

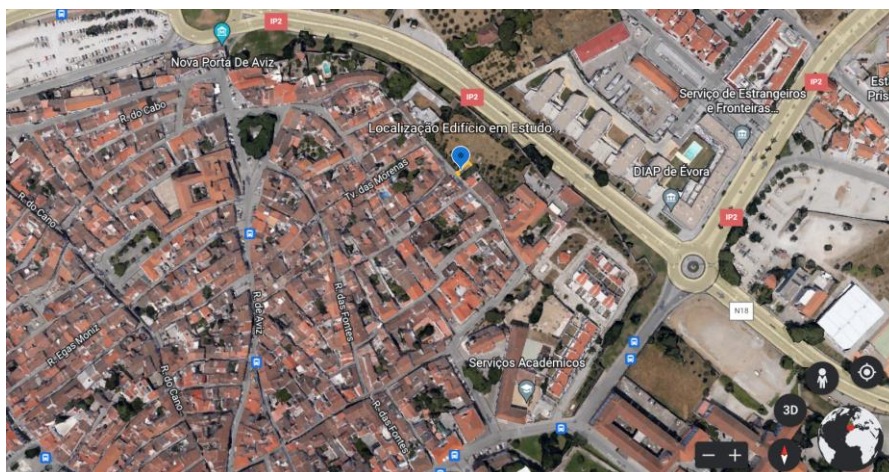


Figura 23 - Localização do Edifício em Estudo [*GoogleEarth*]

Assim sendo, o edifício encontra-se na Rua das Alcaçarias, número 37, na cidade de Évora. Tendo as coordenadas e altitude apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Coordenadas e altitude do edifício em estudo

Latitude	38,5751°
Longitude	-7,9087°
Altitude	291,1155 m

O terreno demarcado para a construção do edifício tem 130m² de área e 46m de perímetro, como apresentado na demarcação em amarelo da Figura 24.



Figura 24 - Terreno para construção do edifício.

3.2. Zonas Climáticas

Para determinação das zonas climáticas de inverno e verão, utiliza-se a Equação 3, apresentada no Manual SCE.

$$X = X_{REF} + \alpha \cdot (z - z_{ref}) \quad (\text{Eq. 3})$$

Na qual:

X – Parâmetro climático a corrigir;

X_{REF} – Parâmetro climático à cota de referência;

α – Declive que relaciona a diferença de altitudes [mês/km] ou [°C/km];

z – Altitude do edifício [km];

z_{ref} – Altitude de referência [km].

Como referenciado anteriormente, neste trabalho o edifício encontra-se na região do Alentejo Central e situa-se a uma cota de 291m de altitude.

Inverno

Para a determinação da zona climática de inverno, utilizara-se as Tabela 5 e Tabela 6 de referência, retiradas do Manual SCE.

Tabela 5 - Valores de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de aquecimento

NUTS III	z_{REF}	M		GD		$\theta_{ext,i}$		G_{sul} kWh/ (m ² .mês)
	m	M_{REF} meses	α mês/km	GD_{REF} °C	α °C/km	$\theta_{ext,i,REF}$ °C	α °C/km	
Alentejo Central	221	5,3	2	1 150	1 100	10,0	-4	150
Alentejo Litoral	88	5,3	2	1 089	1 100	10,8	-2	150
Algarve	145	4,8	0	987	1 800	11,3	-6	155
Alto Alentejo	246	5,3	2	1 221	1 200	9,6	-3	145
Alto Trás-os-Montes	680	7,3	0	2 015	1 400	5,5	-4	125
Ave	426	7,2	0	1 653	1 500	7,8	-6	125
Baixo Alentejo	178	5,0	0	1 068	1 000	10,7	-2	155

Tabela 6- Zonas climáticas de inverno

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

Realizou-se, então, o seguinte cálculo (Equação 4):

$$X = 1150 + 1100 \cdot (0,291 - 0,221) = 1227^{\circ}\text{C} \quad (\text{Eq. 4})$$

A partir deste resultado encontrado e das Tabela 5 e

Tabela 6, em que se apresentam as zonas climáticas de aquecimento, conclui-se que a zona climática de inverno em que o edifício se encontra é a i1.

Verão

Para a determinação da zona climática de verão foram utilizadas as Tabela 7 e Tabela 8 de referência, retiradas do Manual SCE.

Tabela 7 - Valores de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de arrefecimento.

NUTS III	z_{REF} m	$\theta_{ext,v}$		G_{sol} [kWh/m ²]								
		$\theta_{ext,v,REF}$ °C	α °C/km	0° H	90° N	90° NE	90° E	90° SE	90° S	90° SO	90° O	90° NO
Alentejo Central	221	24,3	0	850	225	370	510	500	415	500	510	370
Alentejo Litoral	88	22,2	0	850	225	365	510	495	405	495	510	365
Algarve	145	23,1	0	865	225	375	515	500	405	500	515	375
Alto Alentejo	246	24,5	0	845	225	365	505	500	415	500	505	365
Alto Trás-os-Montes	680	21,5	-7	790	220	345	480	485	425	485	480	345
Ave	426	20,8	-3	795	220	350	490	490	425	490	490	350
Baixo Alentejo	178	24,7	0	855	225	370	510	495	405	495	510	370

Tabela 8 – Zonas climáticas de verão.

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

Realizou-se, então, o seguinte cálculo (equação 5):

$$X = 24,3 + 0 \cdot (0,291 - 0,221) = 24,3^{\circ}\text{C} \quad (\text{Eq. 5})$$

A partir deste resultado encontrado e da tabela em que se apresentam as zonas climáticas de arrefecimento, conclui-se que a zona climática de verão em que o edifício se encontra é a v3.

Determinadas as zonas climáticas referentes ao edifício, recorre-se à Portaria 1381_2021, na qual pode-se consultar os valores referentes aos coeficientes de transmissão térmica superficial máximos

dos elementos da envolvente opaca dos edifícios de habitação – Portugal Continental, $U_{\max}$ e Fatores Solares admissíveis dos vãos envidraçados com condições de fronteira exterior ou interior com ganhos solares, $g_{\text{tot},\max}$.

Como no edifício há a presença de uma envolvente interior – entre a garagem e a sala da casa – há a necessidade de calcular o coeficiente de redução (b_{ztu}) para identificar se esta é uma envolvente interior com condições de exterior ou interior. Para isto deve-se realizar o cálculo a partir da Equação 6.

$$b_{ztu} = \frac{\theta_{int} - \theta_{enu}}{\theta_{int} - \theta_{ext}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que:

θ_{int} – Temperatura interior [°C];

θ_{ext} – Temperatura exterior [°C];

θ_{enu} – Temperatura do espaço interior não útil [°C].

Como não há a possibilidade de conhecer com precisão a temperatura do espaço interior não útil, para a determinação do b_{ztu} , pode-se utilizar dos valores indicados na Tabela 9, para a qual deve-se ter o conhecimento de A_i , área da parede que está localizada entre o espaço da garagem e o interior da casa, e o A_u , somatório da área das paredes e laje de cobertura que estão em contato com o exterior.

Tabela 9 - Determinação do b_{ztu}

b_{ztu}	$V_{enu} \leq 50 \text{ m}^3$		$50 \text{ m}^3 < V_{enu} \leq 200 \text{ m}^3$		$V_{enu} > 200 \text{ m}^3$	
	f	F	f	F	f	F
$A_i/A_u < 0,5$	1,0					
$0,5 \leq A_i/A_u < 1,0$	0,7	0,9	0,8	1,0	0,9	1,0
$1,0 \leq A_i/A_u < 2,0$	0,6	0,8	0,7	0,9	0,8	1,0
$2,0 \leq A_i/A_u < 4,0$	0,4	0,7	0,5	0,9	0,6	0,9
$A_i/A_u \geq 4,0$	0,3	0,5	0,4	0,8	0,4	0,8

No caso do edifício em questão, A_i corresponde a 15m^2 e A_u , a 48m^2 , obtendo um A_i/A_u igual a 0,3125. Por ser um valor inferior a 0,5, obtém-se um b_{ztu} igual a 1, ou seja, a parede que separa os dois espaços é uma envolvente interior com condições de exterior.

Com isso e com as Tabela 10 e Tabela 11 é possível ter o conhecimento do coeficiente de transmissão térmica superficial máximo dos elementos da envolvente opaca do edifício e do fator solar máximo admissível dos vãos envidraçados.

Tabela 10 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos dos elementos da envolvente opaca dos edifícios de habitação - Portugal Continental $U_{\max}$ [W/(m². °C)].

Portugal Continental			Zona Climática		
Tipo de elemento	Condição fronteira		i1	i2	i3
Zona corrente da envolvente.	Verticais	Exterior ou interior com $b_{ext} > 0,7$	0,50	0,40	0,35
		Interior com $b_{ext} \leq 0,7$	2,00	2,00	1,90
	Horizontais	Exterior ou interior com $b_{ext} > 0,7$	0,40	0,35	0,30
		Interior com $b_{ext} \leq 0,7$	1,65	1,30	1,20
Zona de PTP	Verticais	Exterior		0,90	
		Interior com $b_{ext} > 0,7$	1,75	1,60	1,45
		Interior com $b_{ext} \leq 0,7$	2,00	2,00	1,90
	Horizontais	Exterior		0,90	
		Interior com $b_{ext} > 0,7$	1,25	1,00	0,90
		Interior com $b_{ext} \leq 0,7$	1,65	1,30	1,20

Tabela 11 - Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados com condição fronteira exterior ou interior com ganhos solares, $g_{ot,m\acute{a}x}$.

Tipo de edifício	Inércia do espaço	Zona Climática		
		V1	V2	V3
Edifícios de habitação	Fraca	0,15	0,10	0,10
	Média ou forte	0,56	0,56	0,50
Edifícios de comércio e serviços	Fraca, média ou forte	0,56	0,56	0,50

Como estes são valores máximos, é preciso que os elementos que estão na envolvente exterior possuam valores de U inferiores a estes tabelados para i1 e v3. Sendo os elementos encontrados na envolvente as paredes exteriores, laje de cobertura e parede interior com a garagem.

3.3. Soluções Construtivas

Após a modelação e atribuição da localização do modelo pelo programa *DesignBuilder*, foram definidas as soluções construtivas para os 3 sistemas construtivos em estudo. Para as lajes de térreo, entre pisos e cobertura foram utilizadas as mesmas soluções. A diferença entre os três sistemas construtivos está na solução utilizada para as paredes.

Aquando da definição dos elementos que constituem a envolvente, deve-se realizar o cálculo da resistência dos materiais das soluções e realizar o cálculo do coeficiente de transmissão térmica destas. Para a determinação da resistência térmica dos materiais, a qual é necessária para o cálculo da transmissão térmica, é possível recorrer ao ITE50-LNEC, no qual pode-se obter o valor da condutibilidade térmica de cada material e, conseqüentemente, a partir da espessura destes, calcular a resistência térmica. Como alguns materiais não estão listados no ITE50-LNEC, pode-se também recorrer a catálogos, nos quais são listados os dados desses. Em alguns casos, a resistência já é diretamente fornecida nos catálogos, não sendo necessário calculá-las.

Para meios de exemplificação, a seguir (Equação 7) apresenta-se o cálculo da resistência térmica do material gesso cartonado que possui uma condutibilidade térmica na ordem de 0,25W/m°C e uma espessura de 12,5mm.

$$Rt = \frac{e \text{ (m)}}{\lambda \text{ (W/m}^{\circ}\text{C)}} = \frac{0.0125}{0.25} = 0.05 \text{ m}^2\text{C/W} \quad (\text{Eq. 7})$$

PISO TÉRREO

O piso térreo é constituído por 25 cm de betão armado, 10 cm de isolamento em poliestireno expandido, 5 cm de argamassa de reboco, 8 cm de lajeta flutuante em betão normal leve e um revestimento de 1 cm em piso cerâmico.

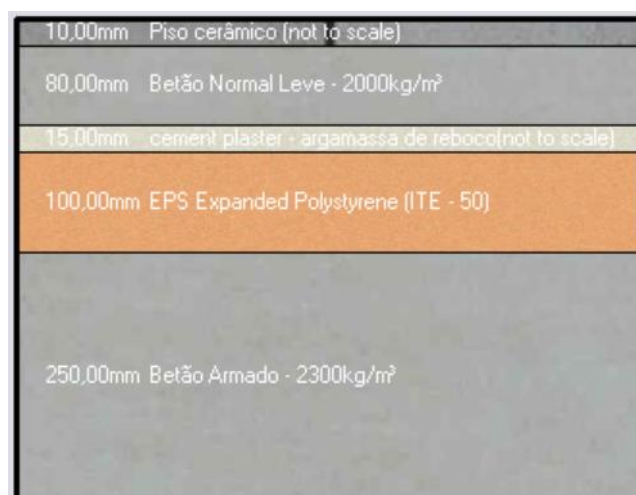


Figura 25 – Constituição da laje térrea do edifício

Para que a constituição do elemento esteja dentro do necessário para a região em estudo, verificou-se o cálculo do U , que deve ser inferior ao mínimo necessário segundo a sua zona térmica, como apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Verificação do coeficiente de transmissão térmica (U) para a laje térrea

LAJE TÉRREA			
Camadas	e(m)	condutibilidade ($\lambda \rightarrow W/m.^{\circ}C$)	$R_t (m^2^{\circ}C/W)$
Laje de Betão	0,250	0,396	0,632
EPS - Poliestireno Expandido	0,100	0,040	2,500
Argamassa de Reboco	0,015	0,042	0,357
Lajeta Flutuante - Betão Normal Leve	0,080	1,300	0,062
Piso Cerâmico	0,010	0,800	0,013
Rsi			0,100
Rse			0,040
Rtotal			3,703
U			0,270
Verificação U			Ok! $U \leq 0,4$

LAJE ENTRE PISOS

A laje entre pisos, por sua vez, é constituída por 1,25 cm de gesso cartonado, que forma o teto do primeiro piso, 20 cm de betão armado, 1,5 cm de argamassa de reboco e um revestimento, de 1 cm, de piso do segundo andar em cerâmica, como apresentado na Figura 26.



Figura 26 – Constituição da laje entre pisos do edifício.

LAJE DE COBERTURA E TELHADO

A laje de cobertura é formada do interior para o exterior por 0,5 cm de argamassa de reboco, 20 cm de betão armado para estruturação da laje e 7 cm de isolamento em lã mineral, como apresentado na Figura 27.



Figura 27– Constituição da laje de cobertura do edifício

O telhado é formado por 0,5 cm de feltro de telhado e 0,6 cm de telhas cerâmicas, além do caibro e sarrafo que formam a estrutura deste, como exemplificado nas Figura 28 e Figura 29.

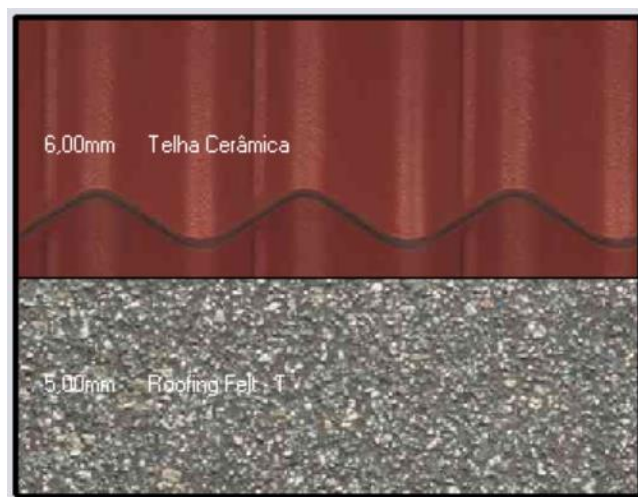


Figura 28 – Constituição do telhado do edifício

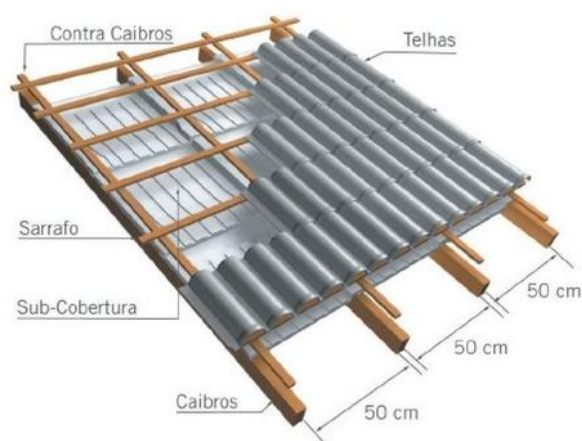


Figura 29 - Ilustração da estrutura do telhado

Para que a constituição do elemento esteja dentro do necessário para a região em estudo, verificou-se o cálculo do U , que deve ser inferior ao mínimo necessário segundo a sua zona térmica, como apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Verificação do coeficiente de transmissão térmica (U) para a laje de cobertura

LAJE COBERTURA E TELHADO			
Camadas	e(m)	condutibilidade ($\lambda \rightarrow W/m.^{\circ}C$)	$R_t (m^2^{\circ}C/W)$
argamassa de reboco	0.005	0.250	0.020
Laje de Betão	0.200	0.396	0.506
Isolamento em Lã Mineral	0.070	0.040	1.750
Roofing Felt (Feltro de telhado)	0.005	0.190	0.026
Sarrafo	0.050	-	-
Telha Cerâmica	0.006	0.690	0.009
Rsi			0.130
Rse			0.130
Rtotal			2.571
U			0.389
Verificação U			Ok! $U \leq 0,4$

3.3.1. Edifício em Alvenaria Comum

A parede em alvenaria comum é constituída do exterior para o interior por 3,0 cm de argamassa de reboco, 5,0 cm de isolamento em poliestireno expandido, 22,0 cm de tijolo cerâmico furado e 3,0 cm de argamassa de reboco.

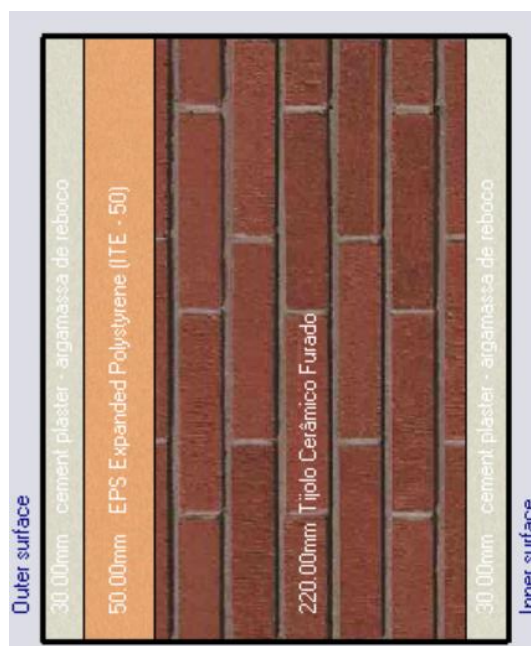


Figura 30 – Constituição do exterior para o interior da parede em alvenaria comum.

Para que a constituição da parede esteja dentro do necessário para a região em estudo, verificou-se o cálculo do U, que deve ser inferior ao mínimo necessário segundo a sua zona térmica, como demonstrado na Tabela 14.

Tabela 14 - Verificação do coeficiente de transmissão térmica (U) para a parede em alvenaria convencional

PAREDE DE ALVENARIA			
Camadas	e(m)	condutibilidade ($\lambda \rightarrow W/m.^{\circ}C$)	$R_t (m^2^{\circ}C/W)$
Argamassa de Reboco	0.030	1.300	0.023
EPS - poliestireno Expandido	0.050	0.040	1.250
Tijolo Cerâmico Furado	0.220	-	0.580
Argamassa de Reboco	0.030	1.300	0.023
Rsi			0.130
Rse			0.130
Rtotal			2.136
U			0.468
Verificação U			Ok! $U \leq 0,5$

3.3.2. Edifício em Blocos de Terra Comprimida

A parede em BTC é constituída do exterior para o interior por 3,0 cm de argamassa de reboco, 6,0 cm de isolamento em poliestireno expandido, 2 blocos de terra de 15,0 cm e 3,0 cm de argamassa de reboco.



Figura 31 - Constituição do exterior para o interior da parede em BTC.

Para que a constituição desta parede esteja dentro do necessário para a região em estudo, verificou-se o cálculo do U, que deve ser inferior ao mínimo necessário segundo a sua zona térmica, como demonstrado na Tabela 15.

Tabela 15 - Verificação do coeficiente de transmissão térmica (U) para a parede em BTC

PAREDE EM BTC			
Camadas	e(m)	condutibilidade ($\lambda \rightarrow W/m.^{\circ}C$)	$R_t (m^2^{\circ}C/W)$
Argamassa de Reboco	0.030	1.300	0.023
EPS - poliestireno Expandido	0.060	0.040	1.500
Bloco de Terra Comprimida	0.300	1.100	0.273
Argamassa de Reboco	0.030	1.300	0.023
Rsi			0.130
Rse			0.130
Rtotal			2.079
U			0.481
Verificação U			Ok! $U \leq 0,5$

3.3.3. Edifício em Taipa

A parede em taipa é constituída por 70 cm de solo terra, como apresentado na Figura 32.

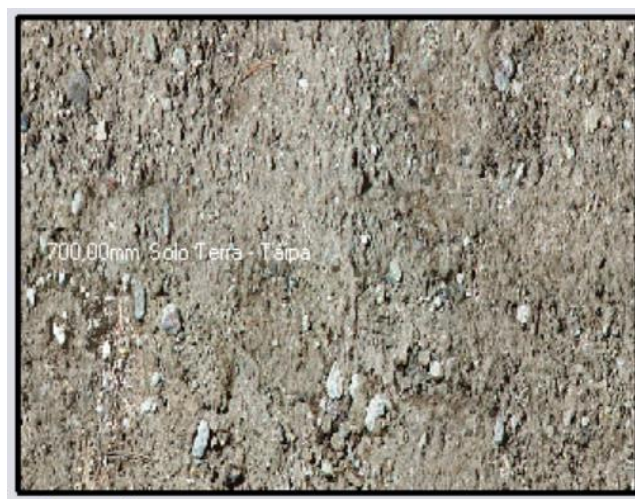


Figura 32 – Constituição da parede em taipa.

Para este sistema construtivo em taipa, segunda a Portaria nº 138-I/2021, de 1 de julho, “no caso de soluções construtivas em taipa ou similares, [deve apresentar um coeficiente de transmissão térmica superficial] igual ou inferior a $1,30 W/(m^2.^{\circ}C)$ ”. Dessa forma, o coeficiente da parede em taipa deste projeto verificou-se, como apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Verificação do coeficiente de transmissão térmica (U) para a parede em taipa

PAREDE EM TAIPA			
Camadas	e(m)	condutibilidade (λ)	R_t ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
Taipa	0.700	1.100	0.636
		Rsi	0.130
		Rse	0.130
		Rtotal	0.896
		U	1.116

3.4. Simulação Energética

Após a modelação, definição das soluções construtivas e definição da localização do caso de estudo, este foi submetido às simulações energéticas em estudo. Para isso, foi necessário criar os cenários climáticos a partir de dados climatológicos da região e dados do relatório do IPCC a respeito das alterações climáticas.

3.4.1. Definição dos Cenários Climáticos

a) *Análise Climática da Região*

O clima em Évora é considerado mediterrâneo, com verões quentes e secos e invernos chuvosos e amenos. A temperatura média anual da região é de 15,8°C. A Figura 33 apresenta um resumo anual do clima de Évora.

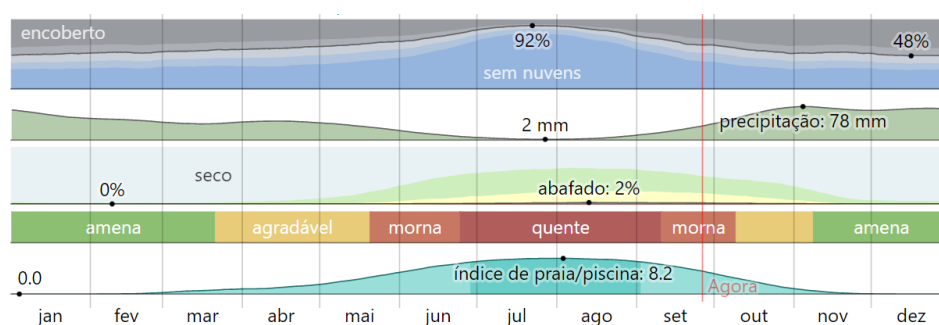


Figura 33 – Clima na Região de Évora [48]

Na Figura 34 é possível observar os dados das horas em que o sol era visível. Na linha preta são apresentados o número de horas em que o sol era visível. Abaixo desta, parte amarelada, são os horários de sol e, acima da linha, parte acinzentada, são apresentados os horários de crepúsculo (civil, náutico e astronómico) e noite total.

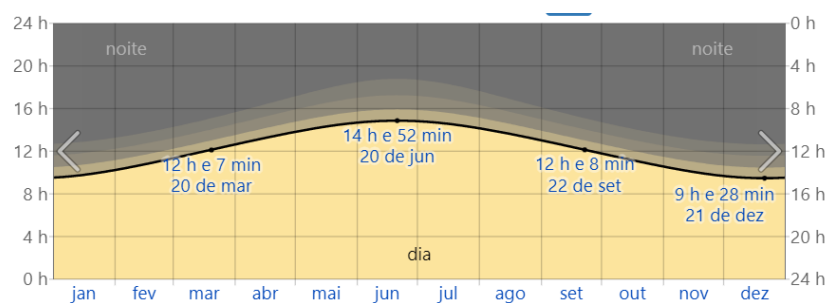


Figura 34 - Horas de luz solar e crepúsculo em Évora [48]

A Figura 35 apresenta o intervalo diário de temperaturas registrado em Évora (nas barras acinzentadas), bem como as máximas temperaturas registradas (traçadas em vermelho) e mínimas (traçadas em azul). Posicionadas acima da faixa vermelha, a linha vermelha esmaecida, apresenta a máxima diária média, assim como acima da faixa azul, a azul esmaecida, a mínima diária média, com faixas de percentil 25 ao 75 e do 10 ao 90.

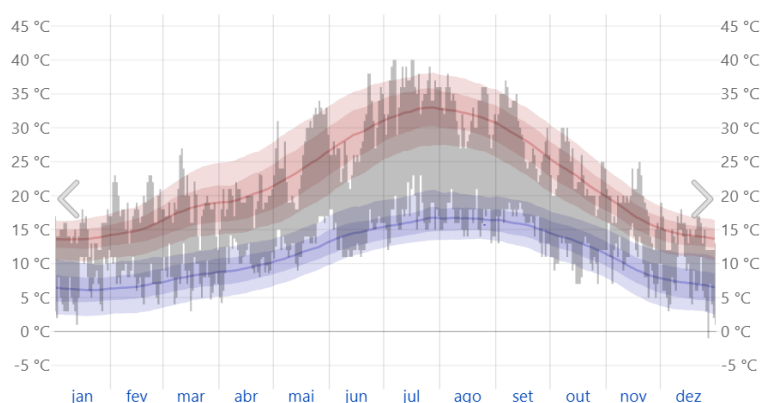


Figura 35 - Histórico de temperatura em Évora [48]

Quanto à variação de temperatura em Évora, a estação de aquecimento permanece por 3,7 meses, de 15 de novembro a 6 de março, com temperatura máxima diária em média abaixo de 17 °C. O mês mais frio do ano em Évora é janeiro, com a máxima de 5 °C e mínima de 13 °C, em média.

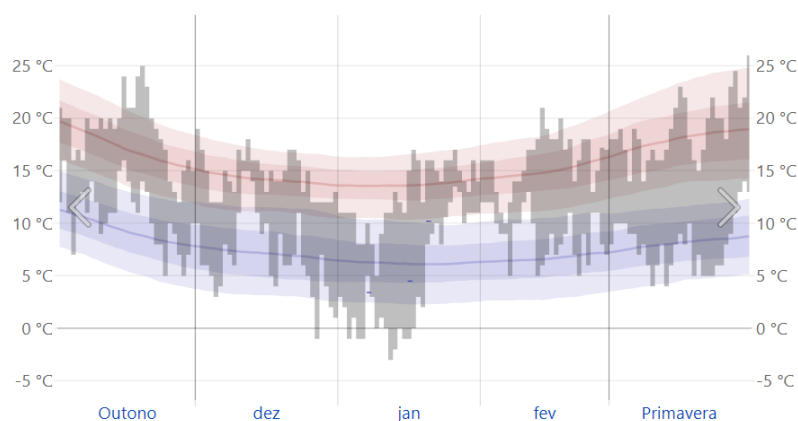


Figura 36 - Histórico de temperatura de Évora no inverno [48]

E a estação de arrefecimento permanece por 2,9 meses, de 18 de junho a 13 de setembro, com temperatura máxima média diária acima de 29 °C. O mês mais quente do ano em Évora é agosto, com a máxima de 32 °C e mínima de 16 °C, em média.

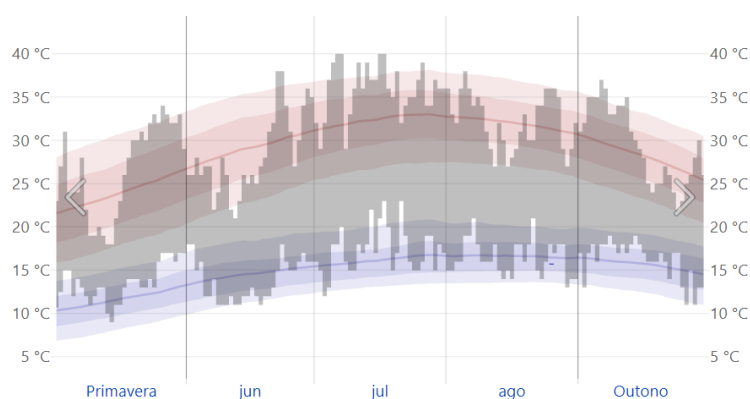


Figura 37 - Histórico da temperatura de Évora no verão [48]

Na Figura 38 são apresentadas as temperaturas médias da região por mês do ano, considerando-se as mínimas e máximas.

Média	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Alta	13 °C	15 °C	18 °C	20 °C	24 °C	29 °C	32 °C	32 °C	28 °C	22 °C	17 °C	14 °C
Temp.	8 °C	10 °C	12 °C	14 °C	17 °C	21 °C	24 °C	24 °C	21 °C	17 °C	12 °C	9 °C
Baixa	5 °C	5 °C	7 °C	9 °C	11 °C	14 °C	16 °C	16 °C	15 °C	12 °C	8 °C	6 °C

Figura 38 - Temperaturas médias por mês na região de Évora [48]

b) Cenários Climáticos dos Anos em Estudo

De acordo com o 5º relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (AR5), os aumentos de temperatura previstos para os anos em estudo serão os apresentados na Tabela 17. Nesta tabela constam o cenário de mitigação das emissões dos GEE (RCP 2.6), o que não inclui esforços adicionais para a contenção das emissões (RCP 8.5) e 2 cenários intermédios, nos quais haverá algum esforço para estas contenções (RCP 4.5 e RCP 6.0).

Tabela 17 - Aumentos de temperatura previstos para os anos em estudo, segundo IPCC

Ano	RCP	Cenário	Aumento de Temperatura Previsto (°C)
2020	2.6	mitigação das emissões dos GEE	0,3
	4.5	intermédio	0,4
	6.0	intermédio	0,5
	8.5	não incluem esforços adicionais de contenção das emissões	0,7
2080	2.6	mitigação das emissões dos GEE	0,3
	4.5	intermédio	1,1
	6.0	intermédio	1,4
	8.5	não incluem esforços adicionais de contenção das emissões	2,6
2100	2.6	mitigação das emissões dos GEE	1,7
	4.5	intermédio	2,6
	6.0	intermédio	3,1
	8.5	não incluem esforços adicionais de contenção das emissões	4,8

Neste trabalho serão analisados comparativamente os cenários do tempo presente, ano de 2020, e o cenário RCP 8.5. Isto porque, segundo o Gabinete do Governador de Planeamento e Investigação (OPR) do Estado da Califórnia, Estados Unidos da América, é recomendado que se utilize o RCP 8.5 para análises mais conservadoras de um dado elemento da comunidade [49]. É importante relembrar que o RCP 8.5 é descrito pelo Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC) como o cenário com probabilidade mais elevada, em que as emissões de gases de efeito de estufa continuam a aumentar ao longo do século XXI.

3.4.2. Definição dos cenários no *software DesignBuilder*

Para a definição dos cenários no *software DesignBuilder*, foi necessário criar os ficheiros climáticos correspondentes a cada dos cenários considerados, em formato EPW (*EnergyPlus Weather Data File*). Para isso, utilizou-se uma ferramenta destinada a geração de documentos de alterações climáticas mundiais, conhecida como *Meteonorm*.

3.4.2.1. *Meteonorm Software*

O *Meteonorm* é uma combinação de fontes de dados e ferramentas de cálculo, que forma um banco de dados meteorológicos que permite acesso a séries históricas de temperatura, humidade, vento, precipitação e radiação. O seu banco de dados consiste em mais de 8 mil estações meteorológicas e uma climatologia aerossol calibrada globalmente [14].

Dessa forma, permite que sejam feitos cálculos de interpolações sofisticadas, com uma ótima precisão de dados. Para além disso, o *Meteonorm* trata-se de um sistema aberto, sendo possível a realização da interpolação de dados advindos de terceiros, tanto de estações meteorológicas quanto de satélites, sendo assim uma das bases de dados de maior confiança e mais utilizadas, tendo por base a precisão [50].

Neste *software* inicia-se por definir a localização onde se pretendem estudar os dados climatológicos, neste caso, a cidade de Évora.

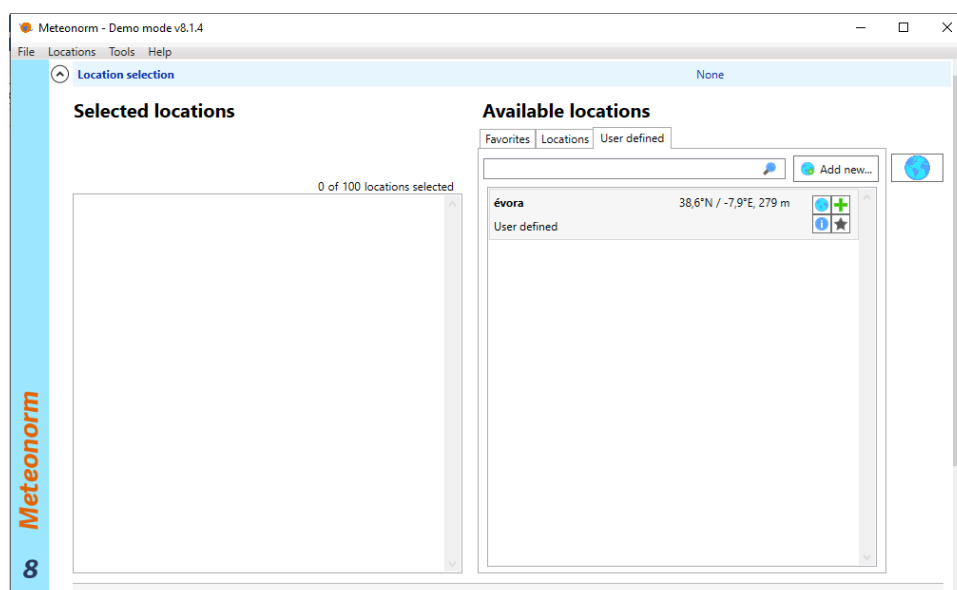


Figura 39 - Página de inserção do local que se pretende analisar no *Meteonorm*

De seguida, definem-se se os dados climáticos atuais do local serão introduzidos ou se serão utilizados os dados contidos no próprio *software*.

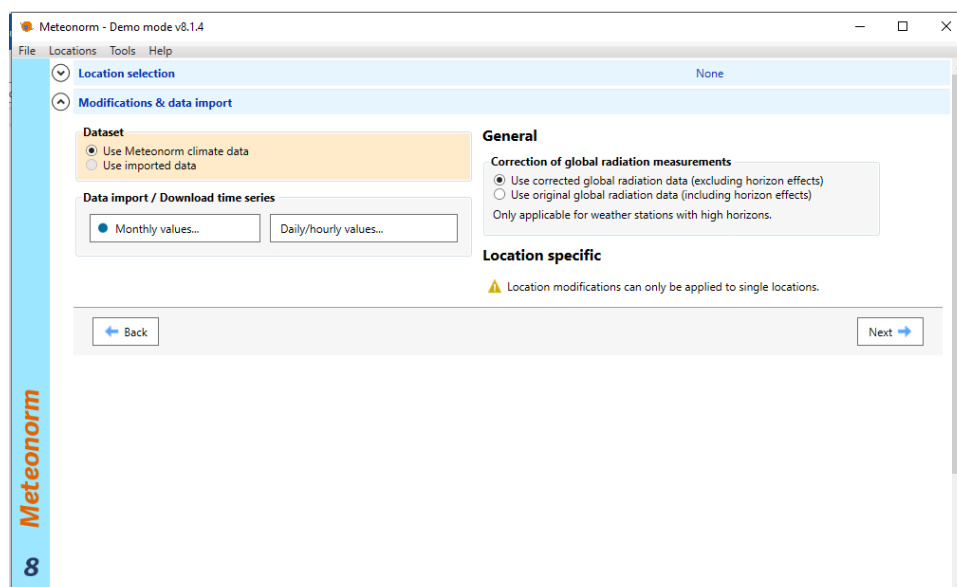
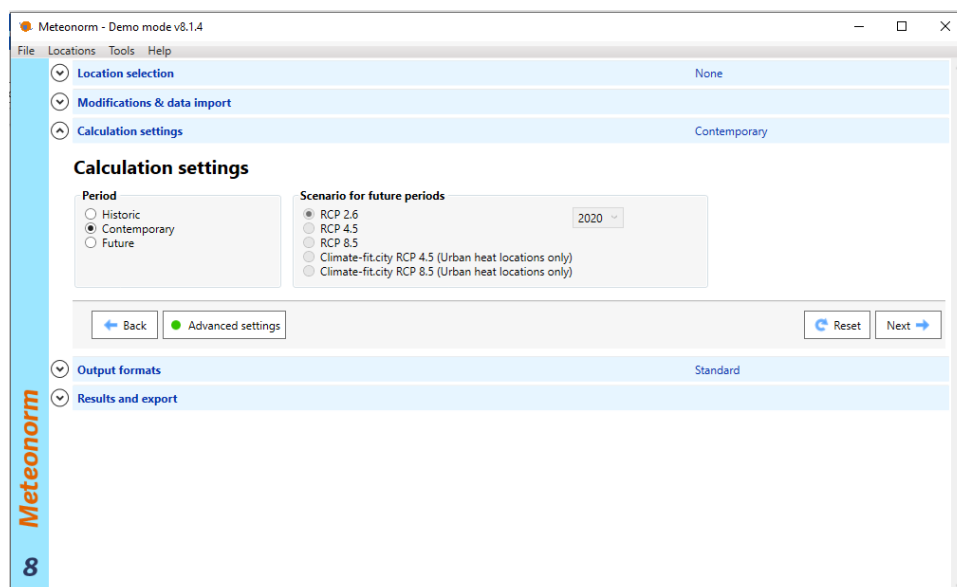
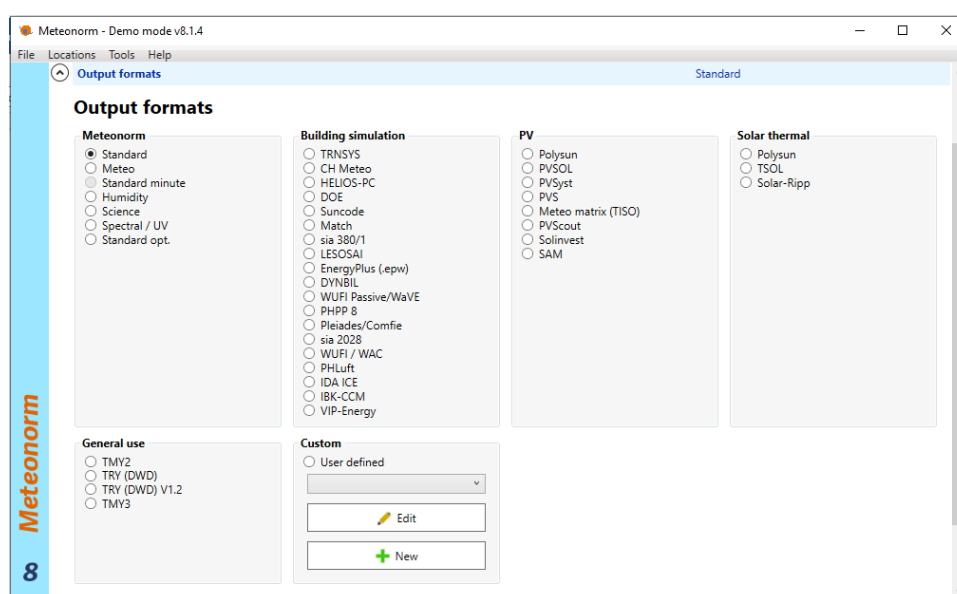


Figura 40 - Página em que se define os dados climatológicos no *Meteonorm*

Então, define-se o cenário climático para o qual se pretende obter os dados, RCP 4.5, para uma análise mais amena, ou RCP 8.5, para uma análise mais conservadora. No caso deste estudo foi considerado apenas o cenário mais conservador.

Figura 41 - Página em que se define o cenário climático no *Meteonom*

Em seguida, são estabelecidos alguns parâmetros, conforme o que se deseja.

Figura 42 - Página de definição de parâmetros no *Meteonom*

E, por fim, são obtidos os resultados na página, conforme a Figura 43, os quais podem ser exportados em formato *epw*, que pode ser utilizado no *software DesignBuilder* para posterior análise do modelo conforme estes dados climatológicos obtidos.

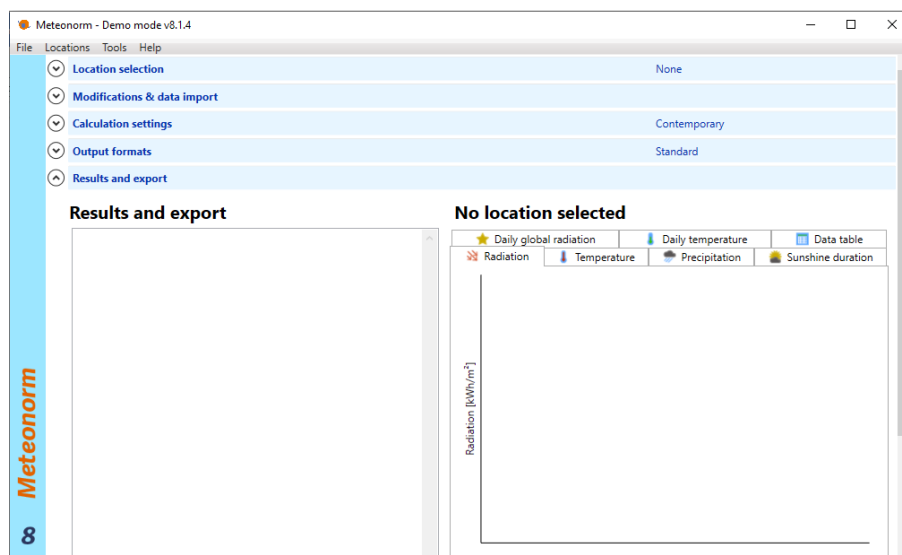


Figura 43 - Página de apresentação de resultados do *Meteonorm*.

3.5. Definição dos Detalhes de Dados no *Software DesignBuilder*

Ainda para a obtenção dos resultados energéticos dos edifícios em estudo é preciso realizar a configuração de alguns detalhes de dados de entrada. Estes são necessários para configurar a análise de acordo com as necessidades do usuário.

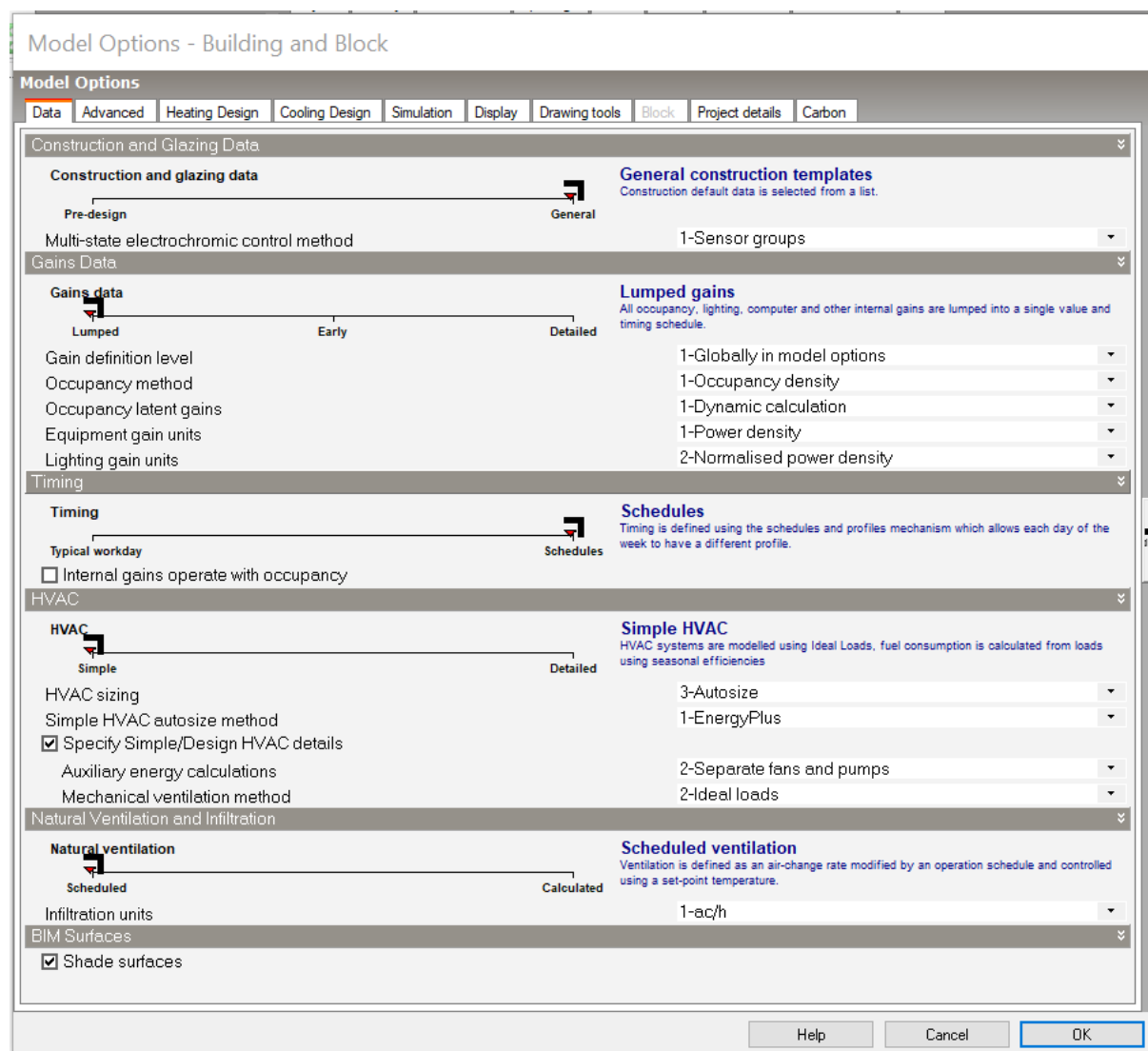


Figura 44 – Inserção Detalhes de Dados no *DesignBuilder*

No caso da análise dos ganhos, definiu-se estes como “*Lumped Gains*”, ou seja, os ganhos a partir da ocupação, luz, computador e outros, são agrupados em um único valor, definido por horário.

Em “*Gain Definition Level*”, ou nível de definição de ganhos, é a opção que define se os ganhos definidos serão tratados para o modelo como um todo ou separadamente, zona por zona. Neste caso, selecionou-se a opção “*globally in model option*” que considera o edifício como um todo.

Para “*Occupancy method*”, ou método de definição da ocupação, selecionou-se a opção “*occupancy density*” (densidade de ocupação) que considera a quantidade de pessoas pela área do edifício.

Na opção “*Occupancy latent gains*” selecionou-se “*dynamic calculation*”, na qual a fração latente de ocupação é calculada dentro do *EnergyPlus* em tempo de execução com base na temperatura interna e na taxa metabólica. Neste caso, a razão entre o ganho pela ocupação sensível e ganhos totais se reduzirá conforme a temperatura interna da zona aumentar e, para temperaturas muito acima dos 30°C, todo o ganho de ocupação será latente.

Para “*Equipment Gain Units*”, ou ganhos por meio dos equipamentos, a opção “*power density*” foi definida, em que os ganhos por meio de equipamentos são introduzidos como uma densidade de potência, ou seja, como uma potência por área de piso da zona em W/m². Esta opção, segundo o próprio programa, é normalmente o método mais conveniente para a maioria dos modelos de uso geral, uma vez que os dados são normalizados por área e, portanto, podem ser herdados de níveis acima na hierarquia do modelo e podem ser efetivamente carregados a partir do modelo de Atividade do programa.

Em “*Lighting gain units*”, ou ganhos por meio da iluminação, selecionou-se “*normalised power density*”, embora as unidades para densidade de potência normalizada (W/m²-100 lux) possam parecer bastante obscuras, este método de definição dos ganhos por meio da iluminação tem vantagens sobre a utilização de densidade de potência simples. Nomeadamente, o nível real de iluminação está associado ao tipo de sistema de iluminação sem a necessidade de se referir à atividade da zona e, portanto, à necessidade de iluminação. Assim, se um determinado tipo de sistema de iluminação for instalado em todo o edifício, mas o edifício tiver uma gama diversificada de atividades, cada uma com requisitos de iluminação diferentes, será normalmente possível introduzir o valor da densidade de potência normalizada de iluminação apenas uma vez ao nível do edifício, definir a atividade para cada zona e obter ganhos de iluminação realistas.

Os dados dos ganhos gerais agrupados podem ser observados na Figura 45, na qual é possível verificar a densidade de potência e a definição horária em que estão presentes estes ganhos, sendo esta ligada 24 horas por dia, nos 7 dias da semana.

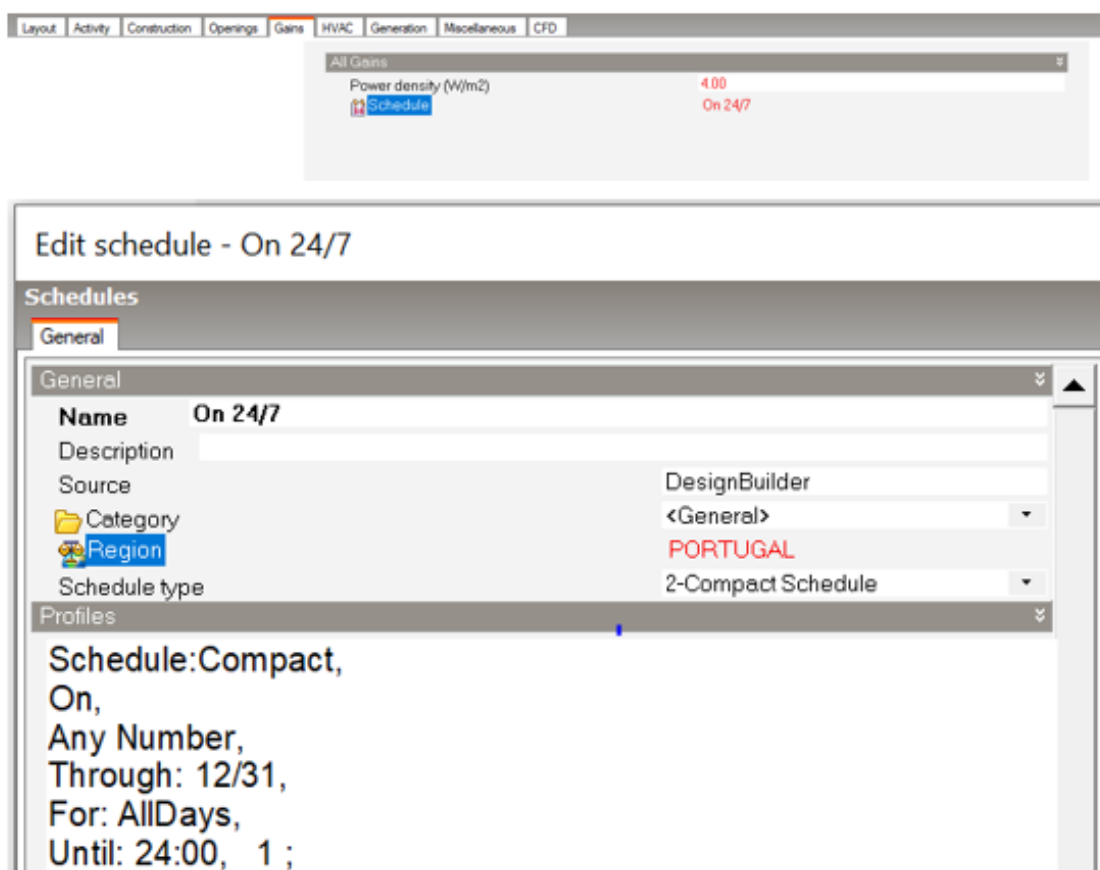


Figura 45 - Dados Gerais de Ganhos no *software DesignBuilder*.

Os requerimentos dos setpoints de aquecimento e arrefecimento, ventilação e iluminação estão diretamente relacionados às atividades ou uso do ambiente. Neste caso, estes foram definidos conforme apresentado na Figura 46.

Activity Template

Sector General

Zone multiplier 1

☒ Include zone in thermal calculations

☒ Include zone in Radiance daylighting calculations

Floor Areas and Volumes

Contaminant Generation and Removal

Holidays

Environmental Control

Heating Setpoint Temperatures

Heating (°C) 19.0

Heating set back (°C) 18.0

Cooling Setpoint Temperatures

Cooling (°C) 27.0

Cooling set back (°C) 29.0

Humidity Control

RH Humidification setpoint (%) 10.0

RH Dehumidification setpoint (%) 90.0

Ventilation Setpoint Temperatures

Natural Ventilation

☒ Indoor min temperature control

Min temperature definition 1-By value

Min temperature (°C) 22.0

☐ Indoor max temperature control

Minimum Fresh Air

Fresh air (l/s-person) 2.360

Mech vent per area (l/s-m²) 0.305

Lighting

Figura 46 – Controles do Ambiente no *DesignBuilder*

“*Heating/Cooling Setpoint Temperature*”, ou ponto de regulação da temperatura de aquecimento/arrefecimento, define a temperatura ideal (isto é, a regulação do termostato) no espaço quando o aquecimento/arrefecimento é necessário. O seu resultado depende da opção de cálculo do controlo de temperatura, quando se vai realizar a simulação no *software*. No caso deste projeto foi seleccionada a opção “*Air Temperature*”, ou seja, a temperatura de *setpoint* corresponde a temperatura do ar no espaço. Também seria possível utilizar da opção “*Operative Temperature*” $((MAT+MRT)/2)$, que seria a partir do controle da temperatura ambiente utilizando a fracção radiante de 0,5.

“*Heating/Cooling Setback Setpoint Temperature*” por sua vez diz respeito ao facto de que alguns edifícios requerem um baixo nível de aquecimento/arrefecimento durante os períodos em que estão desocupados, evitando danos de condensação/gelo, para reduzir os picos de aquecimento/arrefecimento necessários no arranque e, também, para evitar gastos desnecessários durante esses períodos. Além disto, neste projeto, utilizou-se desta opção para verificar em qual dos sistemas construtivos atingiu-se com maior frequência temperaturas acima/abaixo das definidas nos *setpoints* nesses períodos.

A respeito do sistema de HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning* ou Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado), este foi definido apenas para o cálculo das necessidades energéticas do

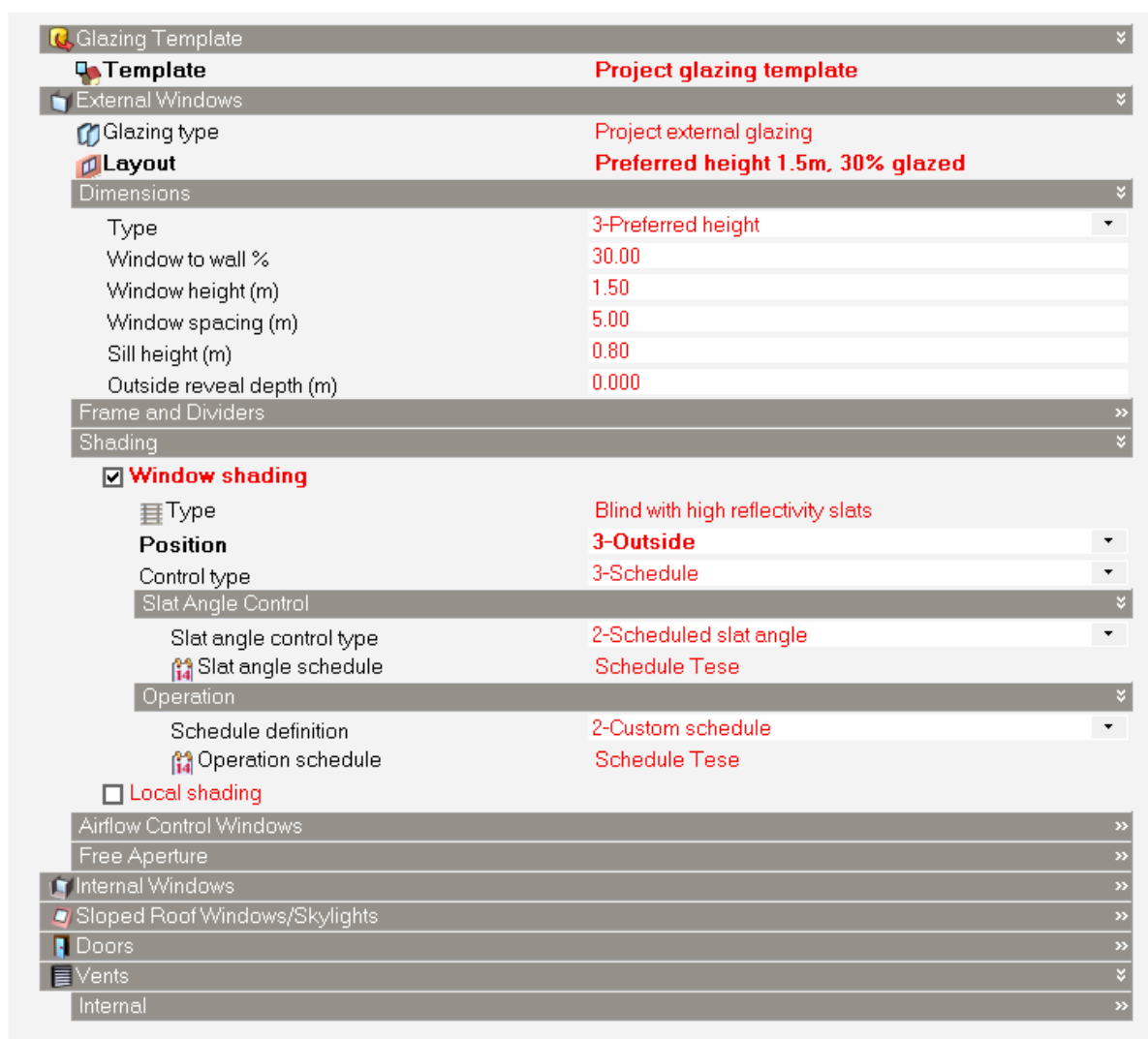
edifício, porém, para a definição dos resultados de temperatura foi considerado que não havia este sistema em funcionamento, assim podendo-se verificar o desempenho do próprio edifício e dos materiais utilizados em cada um dos sistemas.

Para a verificação das necessidades energéticas definiram-se as seguintes características, apresentadas na Figura 47.

The screenshot displays the 'HVAC Template' settings in DesignBuilder. The interface is organized into a hierarchical tree on the left and a detailed configuration panel on the right. The 'Mechanical Ventilation' section is currently selected and expanded. Within this section, the 'On' checkbox is checked, and the 'Schedule' is set to 'On 24/7'. The 'Heating' section is also expanded, showing the 'Heated' checkbox checked and the 'Fuel' set to '1-Electricity from grid'. The 'Cooling' section is expanded, showing the 'Cooled' checkbox checked and the 'Cooling system' set to 'Default'. The 'Humidity Control' section is partially visible at the bottom, with 'Humidification' and 'Dehumidification' checkboxes unchecked. The configuration panel on the right provides specific values for various parameters, such as 'Outside air (ac/h)' set to 0.600, 'Heating system seasonal CoP' set to 1.000, and 'Cooling system seasonal CoP' set to 1.000. The 'Mechanical ventilation load' and 'Cooling system' rows are highlighted in green, indicating they are the primary focus of the configuration.

Figura 47 – Sistema HVAC para definição de necessidades energéticas dos edifícios no *DesignBuilder*

Por último, a respeito as janelas e o sombreamento destas, estes foram definidos conforme a Figura 48.

Figura 48 – Definição das aberturas no *DesignBuilder*

Em que a *schedule* de sombreamento é de acordo com a apresentada na Figura 49. Nesta, para os horários assinalados como 1, tem-se as persianas ativadas, ou seja, fechadas e, para os horários assinalados como 0, as persianas encontram-se abertas, permitindo a entrada da luz solar.

Edit schedule - Schedule Tese

Schedules

General

General

Name	Schedule Tese
Description	perfil de utilização
Source	Tese do Dr. Jorge Fernandes
Category	<General>
Region	PORTUGAL
Schedule type	2-Compact Schedule

Profiles

Schedule:Compact,
On,
Fraction,
Through: 1 Jun,
For: AllDays,
Until: 07:00, 1,
Until: 19:00, 0,
Until: 24:00, 1,
Through: 21 Sep,
For: AllDays,
Until: 07:00, 1,
Until: 09:00, 0,
Until: 19:00, 1,
Until: 22:00, 0,
Until: 24:00, 1,
Through: 31 Dec,
For: AllDays,
Until: 07:00, 1,
Until: 19:00, 0,
Until: 24:00, 1;

Figura 49 – Schedule de sombreamento definida no *DesignBuilder* [3]

Assim sendo, entre o mês de janeiro até o final de maio as persianas estão sendo consideradas abertas das 7h às 19h. Depois, de junho ao final do mês de setembro, meses mais quentes, estas estão sendo consideradas abertas das 7h às 9h e depois das 19h às 22h. E, por fim, do final de setembro até o mês de dezembro seguem o mesmo cronograma inicial, em que ficam abertas das 7h às 19h.

3.6. Parâmetros Analisados

Após a introdução dos ficheiros com os dados meteorológicos para a análise, obtiveram-se os resultados de cada um dos cenários para cada um dos sistemas construtivos admitidos para o caso de estudo. Como referido anteriormente, foram obtidos os resultados quanto a temperatura no interior dos edifícios e também quanto às necessidades térmicas de cada um, dentro de ambos os cenários climáticos. Estes parâmetros são definidos no *software* dentro de duas classificações, sendo estas conforto, quanto às temperaturas no interior, e ganhos internos, para definição das necessidades térmicas.

a) Comfort (conforto)

No que respeita ao conforto térmico do ocupante de determinado edifício, como referido, ressalta-se a importância do conforto quanto à temperatura e à humidade no interior do ambiente.

Neste contexto, o *software DesignBuilder* faz um apanhado gráfico automático dos resultados dos seguintes parâmetros:

- temperatura interior (*air temperature*): relativa à temperatura interna do edifício, com base na temperatura de ponto de ajuste definida, tanto para aquecimento quanto para arrefecimento;
- temperatura exterior (*outside dry-bulb temperature*): temperatura do ar exterior, medida por meio de um termómetro de bulbo seco;
- humidade relativa (*relative humidity*): a média calculada da humidade relativa do ar das zonas. Humidade relativa diz respeito à relação entre a quantidade de água existente no ar (humidade absoluta) e a quantidade máxima possível de água numa mesma temperatura (ponto de saturação).

b) Internal Gains (ganhos internos)

Os ganhos internos correspondem à carga térmica gerada nos edifícios em resultado da sua utilização. Normalmente é dividido em três grupos: calor gerado pela ocupação, pelos equipamentos e aparelhos eletrónicos e pela iluminação elétrica. Neste caso, o *software* também inclui os ganhos solares e o fornecimento de aquecimento e arrefecimento. Estes parâmetros utilizados para definir os ganhos internos são definidos como:

- Iluminação Geral (*general lighting*): ganho de calor devido à iluminação geral;
- Diversos (*miscellaneous*): ganho devido aos equipamentos diversos;
- Ocupação (*occupancy*): ganho sensível devido aos ocupantes. Nota-se que este parâmetro pode variar em função das condições internas. Com temperaturas muito elevadas, o ganho pode cair para zero, com todos os efeitos de arrefecimento ocorrendo através da transferência de calor latente;
- Ganhos por meio de janelas exteriores (*solar gains exterior windows*): transmissão de radiação solar de onda curta por meio das janelas. Para uma situação em que se tem apenas a janela, essa radiação consiste na radiação solar que passa através do vidro e a radiação difusa do reflexo solar da janela. Para janelas sombreadas, a radiação é completamente difusa (assume-se que as sombras são difusoras completas). Para janelas com persiana, a radiação consiste em feixe somada a radiação difusa de onda curta;
- Arrefecimento Sensível de Zona (*zone sensible cooling*): é o efeito global do ar introduzido na zona por meio do sistema HVAC para o seu arrefecimento. Ou seja, é a contribuição do arrefecimento HVAC para o balanço de calor na zona. Arrefecimento é sempre mostrado como um ganho de calor negativo nos resultados, porque é equivalente à remoção, mistura e devolução da energia sensível à corrente de ar, de modo a baixar a sua temperatura até a temperatura especificada no equipamento utilizado;
- Aquecimento Sensível de Zona (*zone sensible heating*): da mesma forma, é a contribuição global do aquecimento HVAC para o equilíbrio térmico da zona;
- Carga latente (*latent load*): é a medida da quantidade de energia necessária para desumidificar o ar no ambiente.

Como referido, estes dados serão utilizados para a determinação das necessidades térmicas do edifício para que este se mantenha dentro dos *setpoints* de temperatura pré-estabelecidos.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS TEMPERATURAS NO INTERIOR DOS EDIFÍCIOS

A partir dos dados inseridos e considerando a não utilização dos sistemas HVAC, foi possível obter os resultados das temperaturas no interior dos edifícios horários considerando apenas o desempenho térmico dos materiais utilizados. Esta seção apresentará estes resultados para ambos os cenários climáticos em estudo, utilizando um período representativo de cada uma das estações para uma melhor análise dos resultados.

4.1. Cenário Climático Atual

Iniciou-se pelos resultados obtidos para o cenário climático atual, apresentados no gráfico da Figura 50. Neste também é possível observar e comparar o comportamento dos edifícios com relação às temperaturas máximas e mínimas de conforto, de 27°C e 19°C, respetivamente.

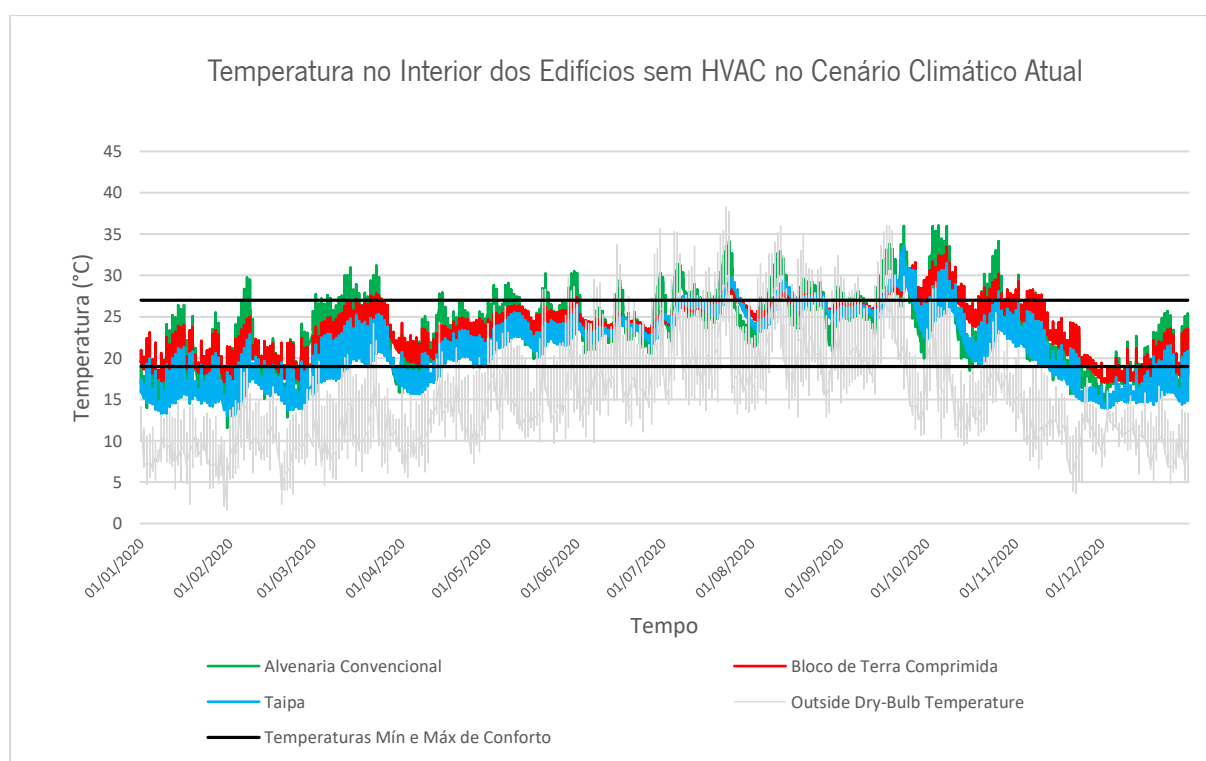


Figura 50 – Temperatura no Interior dos Edifícios para o cenário climático atual, sem sistema HVAC em funcionamento em comparação com a temperatura exterior

Para uma análise mais facilitada, a avaliação da performance térmica foi feita para cada uma das estações e o monitoramento dos dados foi feito para 30 dias representativos de cada uma das estações.

4.1.1. Inverno

A análise para a estação do inverno é feita do dia 21 de dezembro ao dia 19 de março. Para o período representativo (21 de janeiro ao dia 21 de fevereiro), a temperatura exterior média foi um pouco abaixo dos 10°C, variando entre 1,65°C e 19,12°C neste período. Esta máxima aconteceu no início do mês de fevereiro, estando um pouco fora do padrão encontrado no período em estudo, que apresenta em média máximas diárias de 12°C, como é possível observar na linha cinza do gráfico da Figura 51.

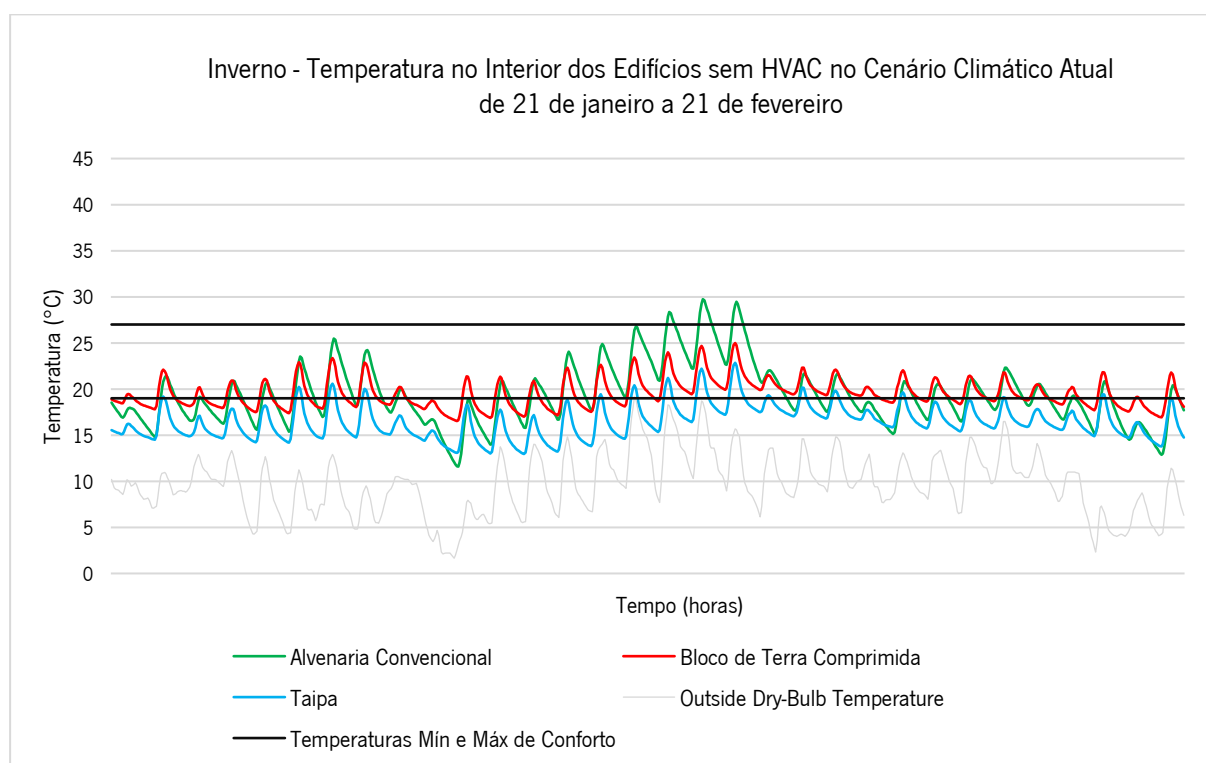


Figura 51 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático Atual de 21 de janeiro a 21 de fevereiro.

Neste gráfico também são apresentados os desempenhos térmicos dos edifícios. O construído em alvenaria convencional apresenta temperaturas mais elevadas do que os edifícios construídos com materiais em terra quando a temperatura exterior está mais elevada. Este também apresenta uma amplitude térmica maior, com a temperatura mínima no período em estudo de 11,6°C e máxima de

29,7°C (amplitude de 18,1°C). É possível também analisar que, em dias muito frios, a temperatura no interior deste edifício desce significativamente, ficando abaixo da temperatura mínima de conforto (19°C) e, em alguns dias mais quentes, sua temperatura ultrapassou inclusive a temperatura máxima de conforto, de 27°C.

Além disso, é possível observar que o edifício em taipa é o que apresenta as menores temperaturas interiores em todo o período em estudo, com a maior temperatura máxima de 22,8°C e menor temperatura mínima, de 12,9°C (amplitude térmica de 9,9°C). Este edifício permaneceu, em grande parte do período em estudo, com temperaturas abaixo da temperatura de conforto mínima, tendo uma média de temperatura em todo o período de 16,5°C.

Entretanto, o edifício que apresentou a menor amplitude térmica neste período foi o construído em BTC, com mínima de 16,5°C e máxima de 25,0°C (amplitude térmica de 8,5°C). Este também é o que menos apresentou períodos de temperaturas abaixo da temperatura mínima de conforto, tendo uma média de 19,5°C durante todo o mês em estudo.

4.1.2. Primavera

Para a estação da primavera, ocorrida do dia 21 de março a 20 de junho, foi feita uma análise representativa do período de 15 de abril a 16 de maio. Neste mês em estudo a temperatura média foi em torno dos 15°C, tendo como temperatura mínima 7,25°C e temperatura máxima 26,4°C, como pode ser observado no gráfico da Figura 52.

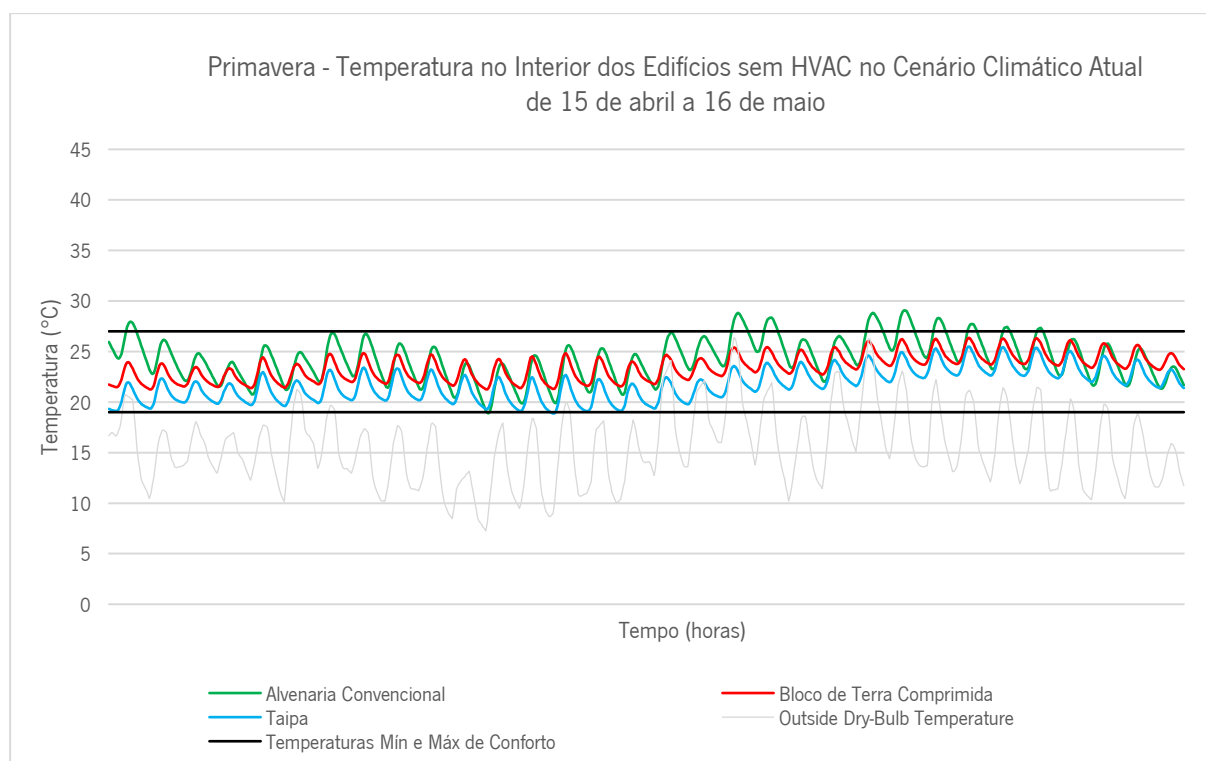


Figura 52 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático Atual de 15 de abril a 16 de maio

No gráfico é possível analisar que o edifício construído em alvenaria convencional é, novamente, o que apresenta temperaturas mais elevadas. Com uma amplitude térmica de 10,2°C durante o mês em estudo, este apresenta uma temperatura mínima de 18,9°C, próxima a temperatura mínima de conforto, e uma temperatura máxima de 29,1°C, ultrapassando em alguns períodos a temperatura máxima de conforto. A temperatura média deste edifício é a mais alta, comparativamente aos outros edifícios em estudo, de 24,2°C.

O edifício em taipa é novamente o que apresenta as menores temperaturas, com a menor temperatura média no período entre os edifícios em estudo, de 21,8°C. A temperatura mínima constatada foi ligeiramente menor que a temperatura de conforto mínimo, chegando aos 18,8°C no dia que se atingiu a menor temperatura exterior do período. A temperatura máxima atingida foi de 25,5°C.

Por fim, o edifício em BTC apresentou novamente temperaturas mais amenas, mantendo-se em todo o mês em estudo dentro dos limites de conforto, com uma temperatura mínima interior de 21,2°C e uma temperatura máxima interior de 26,3°C. A temperatura média durante o período neste edifício foi de 23,4°C.

4.1.3. Verão

Para a estação do verão, ocorrida do dia 21 de julho a 20 de setembro, foi feita uma análise representativa do período de 15 de julho a 16 de agosto. Neste mês em estudo, a temperatura média foi em torno dos 23°C, tendo como temperatura mínima 13,3°C e temperatura máxima 38,3°C, como pode ser observado no gráfico da Figura 53.

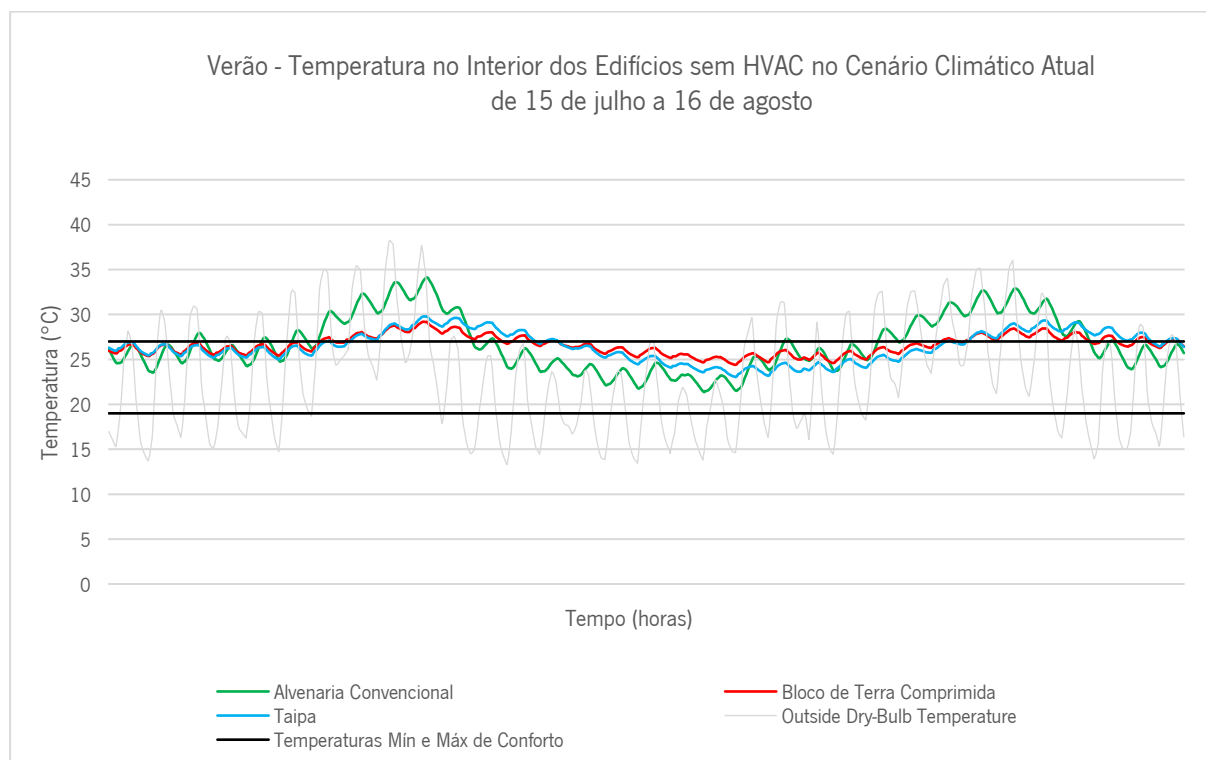


Figura 53 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático Atual de 15 de julho a 16 de agosto.

O edifício em alvenaria convencional na estação quente apresenta as temperaturas internas mais elevadas quando a temperatura externa está mais alta, como pode ser observado no gráfico, porém, quando ocorre a diminuição da temperatura exterior, no interior deste edifício tem-se as menores temperaturas, quando comparado aos outros edifícios em estudo, o que provoca uma alta amplitude térmica de 12,8°C. Dessa forma, a temperatura mínima atingida no edifício em alvenaria convencional é a mais baixa entre os 3 edifícios, de 21,4°C, e a temperatura mais alta é de 34,1°C, muito superior a máxima temperatura de conforto, o que ocorre com frequência para este edifício durante o período em estudo.

O edifício em taipa, por sua vez, nesta estação apresenta uma amplitude térmica bastante inferior à apresentada pelo edifício em alvenaria convencional, de 6,8°C, tendo como temperatura mínima atingida 23,0°C e máxima 29,8°C. Nos períodos em que se atingiram as temperaturas exteriores mais

baixas, este teve temperaturas mais altas que o em alvenaria convencional, porém ainda menores do que o edifício em BTC. Entretanto, nos períodos em que ocorreram as temperaturas exteriores mais altas, este teve um desempenho um pouco pior do que edifício em BTC, com temperaturas relativamente superiores.

Por fim, o edifício em BTC é o que apresenta a menor amplitude térmica novamente, de $4,8^{\circ}\text{C}$, tendo como temperatura máxima no período em estudo $29,2^{\circ}\text{C}$ (a mais baixa comparativamente aos outros edifícios) e, como temperatura mínima $24,4^{\circ}\text{C}$. É possível observar que, nos momentos em que se atingiram as maiores temperaturas externas, este foi o que melhor se comportou, mesmo que com resultados muito próximos aos obtidos pelo edifício em taipa, se mantendo sempre muito próximo ao limite máximo de temperatura de conforto.

4.1.4. Outono

Na estação de outono, que ocorre entre os dias 21 de setembro e 20 de dezembro, fez-se a análise para o período entre os dias 15 de outubro e 16 de novembro. Neste período é possível observar que a temperatura média exterior rodeou os 15°C , tendo como temperatura mínima $6,6^{\circ}\text{C}$ e temperatura máxima $25,5^{\circ}\text{C}$, como pode ser observado no gráfico da Figura 54.

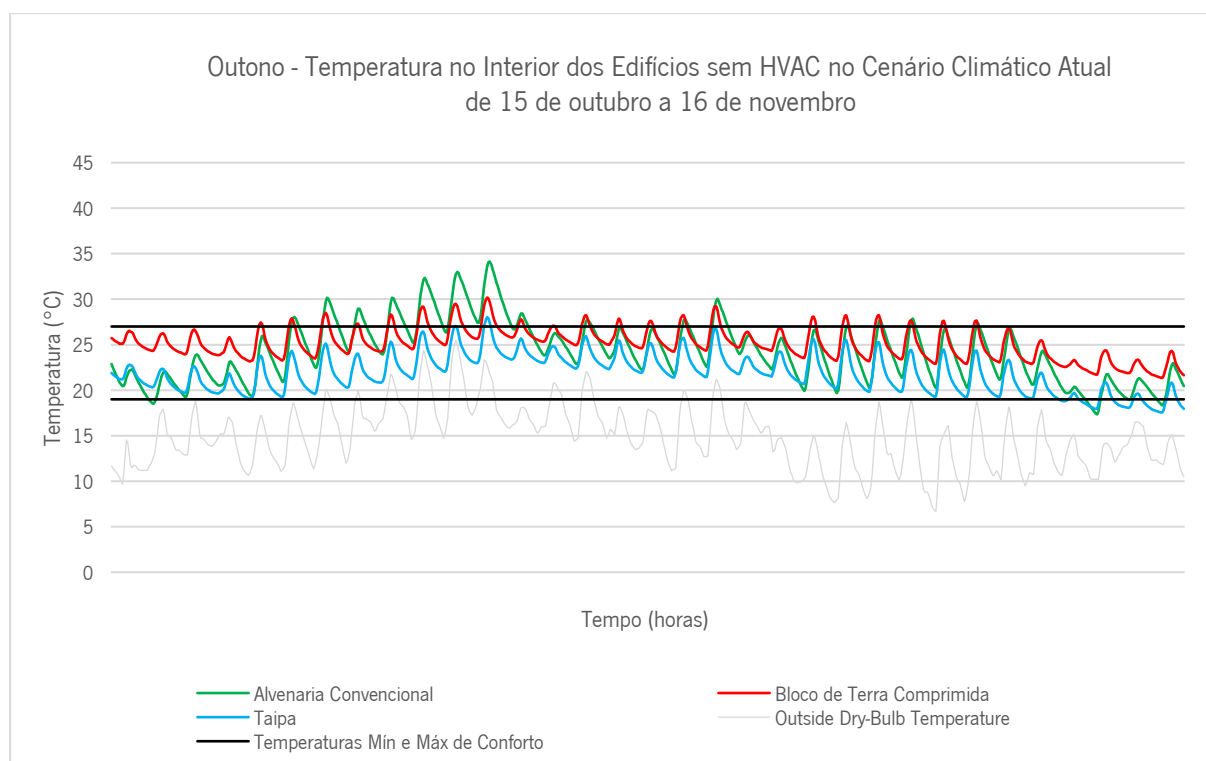


Figura 54 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático Atual de 15 de outubro a 16 de novembro

Neste gráfico é possível analisar que o edifício em alvenaria convencional apresenta as temperaturas internas mais elevadas nos momentos em que ocorreram as temperaturas externas mais altas, atingindo uma temperatura máxima de 34,1°C, 26% superior a temperatura máxima de conforto. Este edifício também é o que atingiu a temperatura mais baixa entre os 3, chegando a 17,3°C. Neste período da estação de outono é possível observar que, novamente, este é o edifício que apresenta a maior amplitude térmica, de 16,8°C.

O edifício em taipa é novamente o edifício que apresenta as temperaturas mais baixas, como é possível verificar no gráfico, tendo uma média de temperatura de 21,8°C, com máxima de 28,0°C e mínima de 17,5°C. Assim sendo, tem uma amplitude térmica de 10,5°C, ainda superior a amplitude térmica apresentada pelo edifício em BTC.

O edifício em BTC, por sua vez, apresenta uma amplitude térmica de 8,8°C, mantendo-se entre os 21,3°C e os 30,2°C, amplitude essa tão alta quanto a que o edifício apresentou na estação de inverno. Neste caso, o edifício apresentou vários momentos em que esteve acima da temperatura de conforto prevista. Entretanto, mesmo em momentos em que a temperatura externa esteve bastante baixa, este conseguiu manter uma temperatura confortável no seu interior para os ocupantes. A média de temperatura apresentada por este edifício durante este período foi de 25,1°C, a mais elevada em comparação aos outros edifícios em estudo.

4.2. Cenário Climático RCP8.5

A seguir, na Figura 55, são apresentados os resultados das temperaturas no interior dos edifícios para o cenário climático RCP8.5. Neste também é possível observar e comparar o comportamento dos edifícios com relação às temperaturas máximas e mínimas de conforto atuais, de 27°C e 19°C, respetivamente, como no gráfico do cenário climático atual.

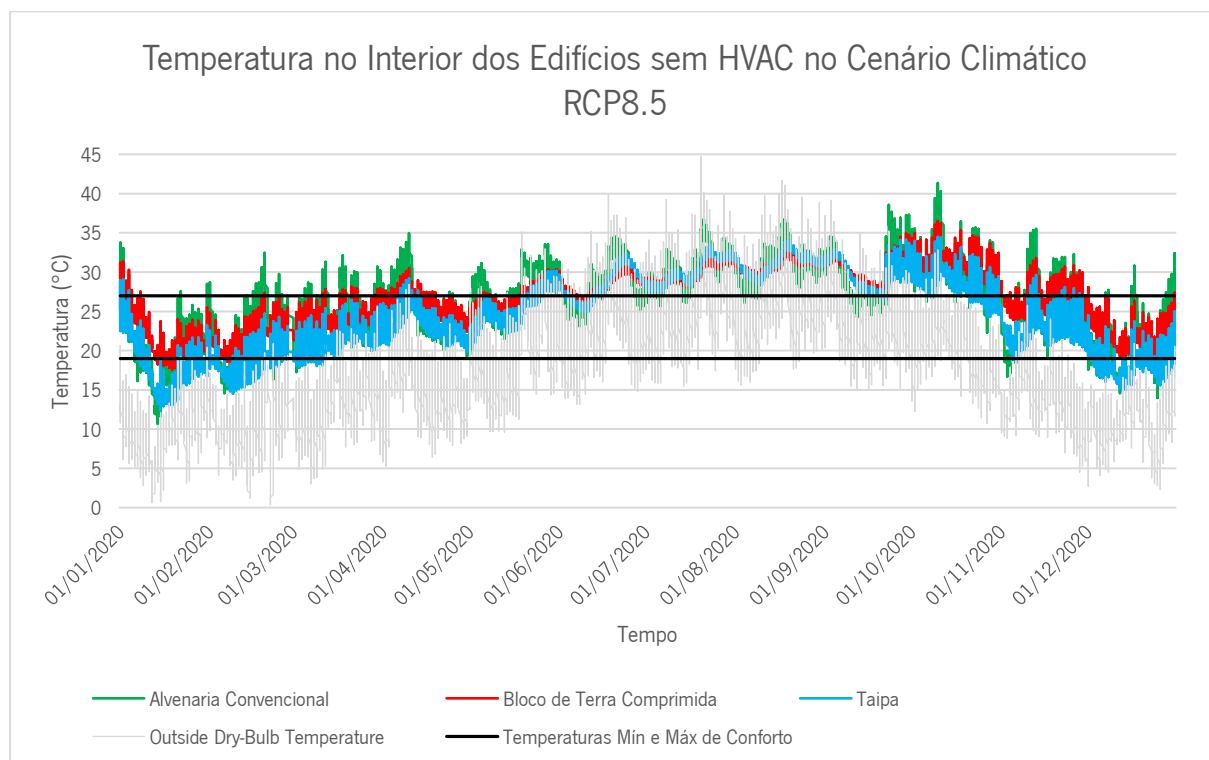


Figura 55 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático RCP8.5

Para uma análise mais facilitada, a avaliação da performance térmica, como para a análise do cenário climático atual, foi feita para cada uma das estações e o monitoramento dos dados foi feito para 30 dias representativos de cada uma das estações.

4.2.1. Inverno

Para a análise da estação de inverno, que ocorre do dia 21 de dezembro ao dia 19 de março, no cenário climático RCP8.5 foi utilizado o mesmo período representativo que o para a análise do cenário climático atual, do dia 21 de janeiro ao dia 21 de fevereiro. A temperatura exterior média durante este

período foi um pouco superior à do cenário climático atual, de aproximadamente 11°C, variando de 1,2°C a 20,4°C, como é possível observar no gráfico da Figura 56.

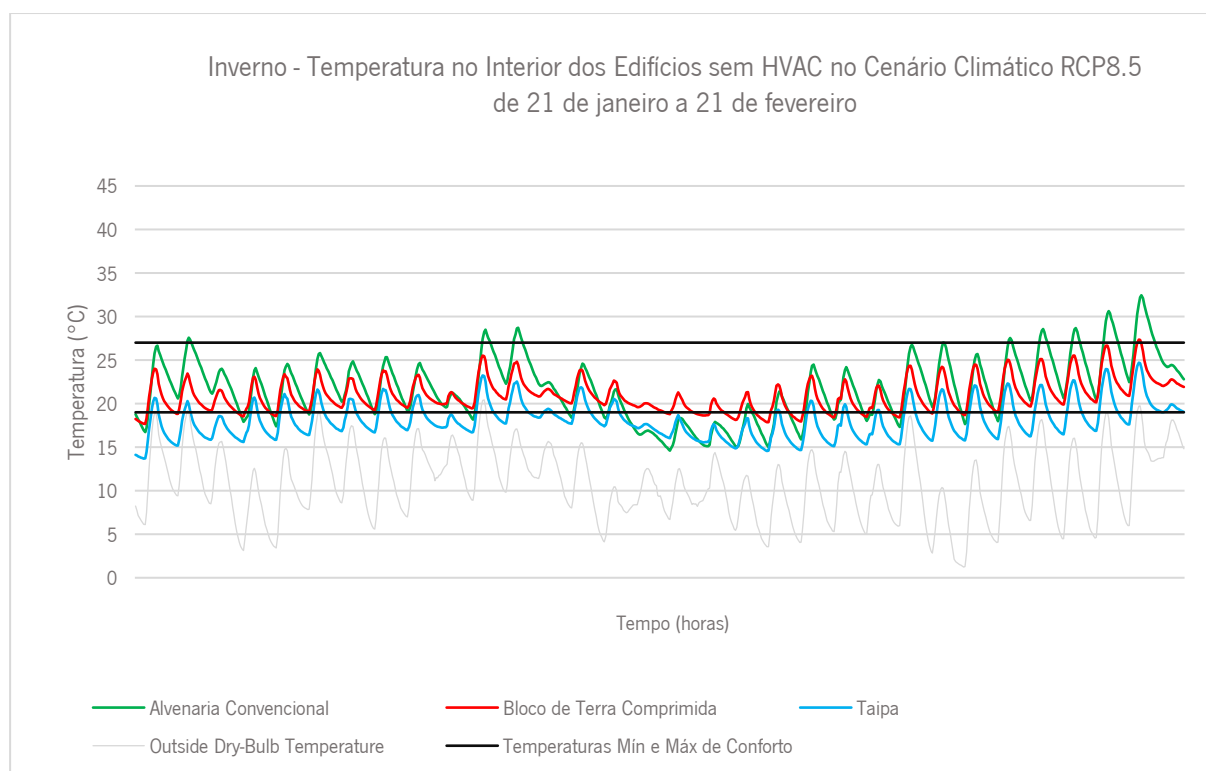


Figura 56 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático RCP8.5 de 21 de janeiro a 21 de fevereiro.

Neste apresentam-se também os desempenhos dos edifícios quanto a temperatura em seus interiores para o cenário. O edifício construído em alvenaria convencional apresenta temperaturas mais elevadas que os outros dois edifícios em estudo, porém, quando as temperaturas exteriores baixam, este apresenta uma abrupta queda em sua temperatura interior, tornando-se a mais baixa entre os edifícios em estudo em alguns momentos. É possível observar que este é o edifício que apresenta a maior amplitude térmica para este cenário também, de 17,8°C, com a temperatura variando entre 14,6°C e 32,4°C, e a maior média de temperatura, de 21,7°C.

O edifício em taipa é o que apresenta as temperaturas interiores mais baixas, variando entre 13,7°C e 24,7°C, e com média de 18,1°C, inferior à temperatura de conforto mínima desejável de 19°C. Dessa forma, durante todo o período, este edifício apresenta temperaturas abaixo do ideal, tornando-o desconfortável para os seus usuários.

Por fim, o edifício construído em BTC é o que apresenta uma menor amplitude térmica (8,5°C), variando entre 17,8°C e 27,3°C, mantendo-se durante quase todo o período em estudo com temperaturas superiores à considerada mínima de conforto.

4.2.2. Primavera

Para a estação da primavera deste cenário, ocorrida do dia 21 de março a 20 de junho, foi feita também uma análise representativa do período de 15 de abril a 16 de maio. Neste mês em estudo a temperatura média foi acima dos 16°C, tendo como temperatura mínima 6,4°C e temperatura máxima, 28,2°C, como pode ser observado no gráfico da Figura 57.

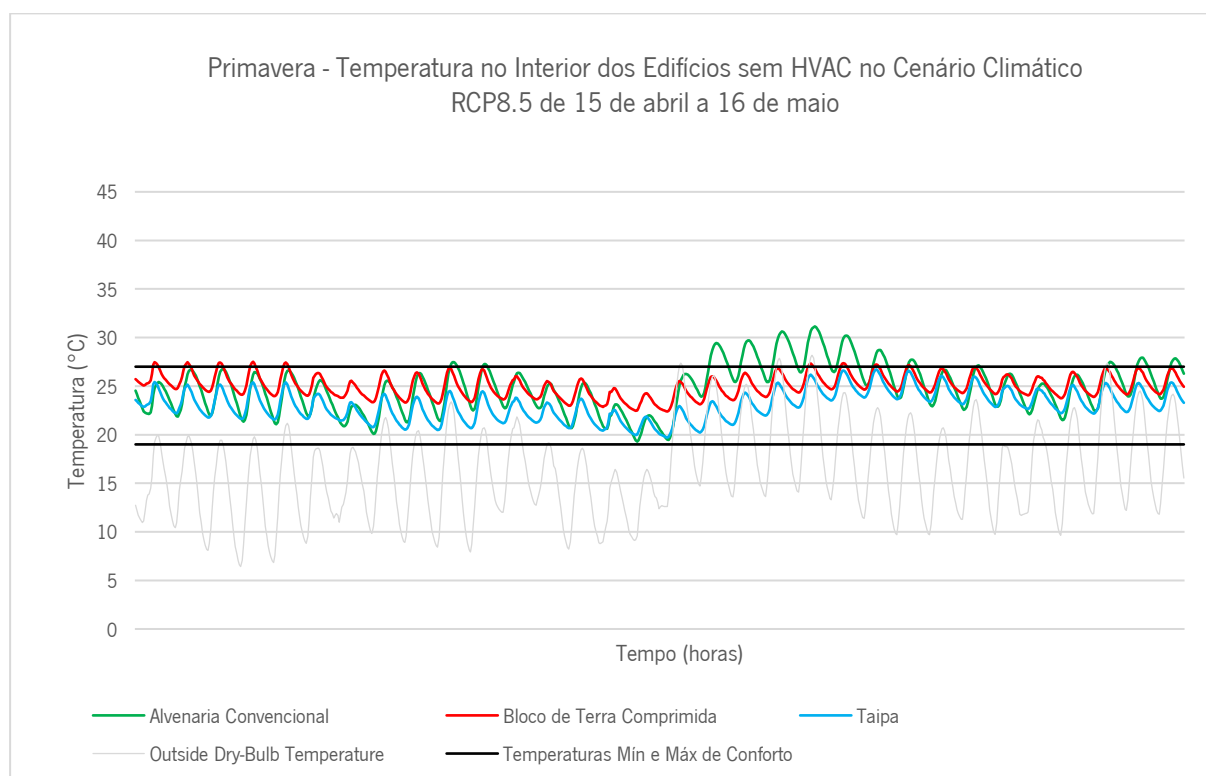


Figura 57 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático RCP8.5 de 15 de abril a 16 de maio.

Neste gráfico é possível analisar que o edifício construído em alvenaria convencional é, novamente, o que se mantém maioritariamente com as temperaturas mais altas, ultrapassando em diversos momentos a temperatura máxima de conforto e alcançando a maior temperatura máxima entre os edifícios, de 31,1°C. Porém, quando ocorrem as temperaturas externas mais baixas, este apresenta uma queda de temperatura interna maior do os outros edifícios em estudo, chegando a uma temperatura mínima de 19,3°C, o que provoca uma amplitude térmica maior, de 11,9°C, do que os edifícios construídos em terra. A temperatura interna média do edifício em alvenaria convencional para este período é de 24,8°C.

O edifício em taipa é o que apresenta as menores temperaturas internas novamente, variando de 19,7°C a 26,7°C durante o período, mantendo-se dentro dos limites da temperatura de conforto no interior do edifício. A média de temperatura constatada para todo o período foi de 23,1°C.

Para o edifício em BTC é possível constatar que novamente obteve-se a menor amplitude térmica entre os modelos em estudo, de 5,1°C, variando entre 22,4°C e 27,5°C. Este edifício apresentou a maior média de temperatura interior entre os modelos, de 25,0°C.

4.2.3. Verão

Para a estação do verão, ocorrida do dia 21 de julho a 20 de setembro, foi feita uma análise representativa do período de 15 de julho a 16 de agosto. Neste mês em estudo a temperatura média foi em torno dos 28°C, tendo como temperatura mínima 15,6°C e temperatura máxima, 44,7°C, como pode ser observado no gráfico da Figura 58.

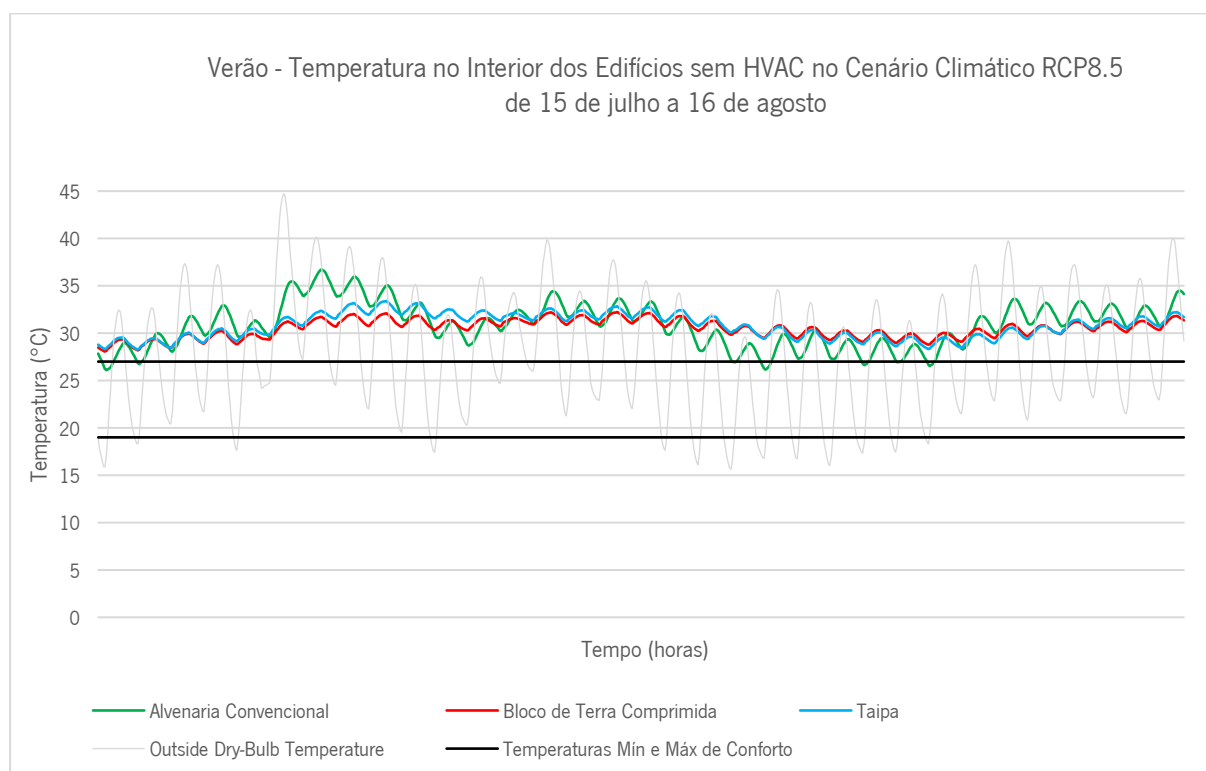


Figura 58 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático RCP8.5 de 15 de julho a 16 de agosto.

Durante todo o período da estação mais quente os três edifícios ultrapassam o limite máximo de temperatura de conforto interno. O edifício em alvenaria convencional é o que apresenta uma maior amplitude térmica neste período de 10,6°C, variando entre 26,1°C a 36,7°C. Dessa forma, a média da temperatura no interior deste edifício é de 30,9°C.

Os edifícios em taipa em BTC, apesar de terem uma amplitude térmica menor, 5,1°C e 4,2°C respetivamente, e se aproximarem em questões da variação de temperatura durante o período, ainda

constam bastante acima do valor de conforto estimado. Nos períodos de maior calor, o edifício em taipa apresenta por muitas vezes temperaturas internas superiores ao edifício em BTC, como por exemplo no período em que ocorre a temperatura máxima no exterior. As temperaturas internas de ambos variam entre os 28,0°C e 33,0°C.

4.2.4. Outono

Na estação de outono, que ocorre entre os dias 21 de setembro e 20 de dezembro, fez-se a análise para o período entre os dias 15 de outubro e 16 de novembro. Neste período é possível observar que a temperatura média exterior rodeou os 17°C, tendo como temperatura mínima 8,9°C e temperatura máxima 27,2°C, como pode ser observado no gráfico da Figura 59.

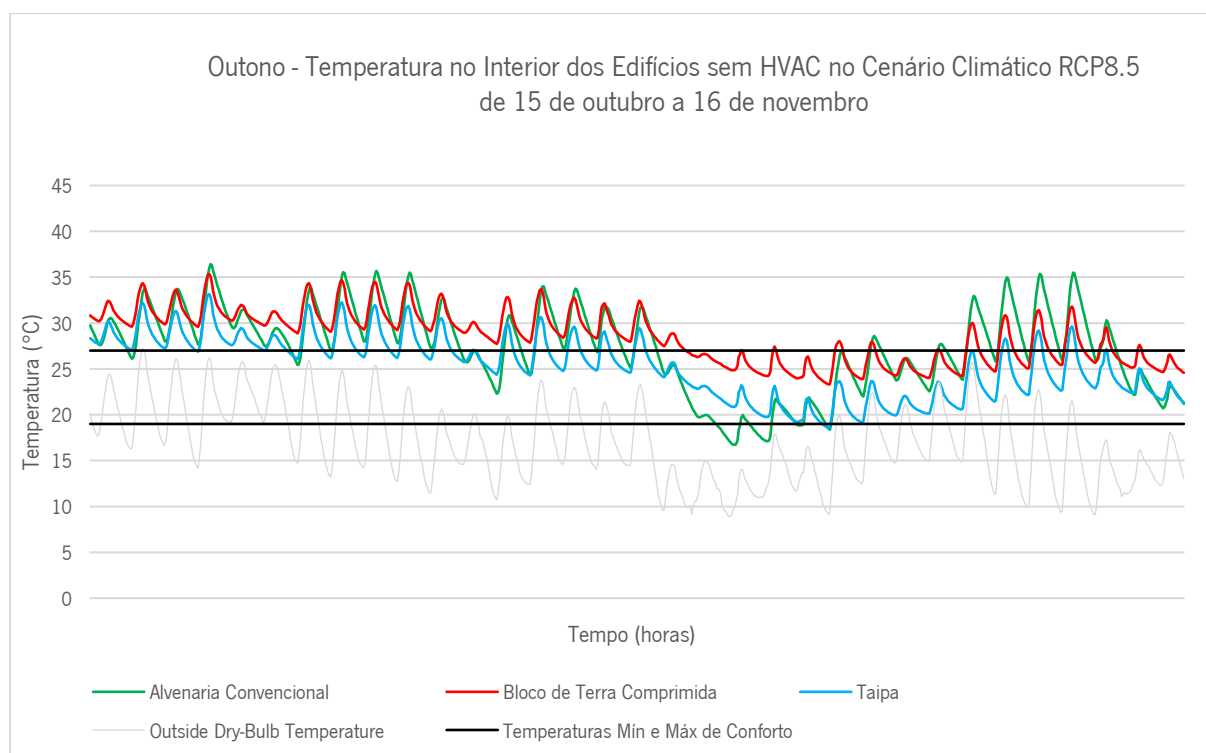


Figura 59 - Temperatura no Interior dos Edifícios sem HVAC no Cenário Climático RCP8.5 de 15 de outubro a 16 de novembro

Neste gráfico é possível analisar que o edifício em alvenaria convencional é o que apresenta as mais altas temperaturas nos períodos em que a temperatura exterior está mais alta, apesar de apresentar temperaturas muito próximas às do edifício em BTC. Porém, quando a temperatura exterior baixa, este apresenta as menores temperaturas entre os 3 modelos em estudo. A amplitude térmica deste edifício

neste período é novamente bastante superior à apresentada pelos outros dois edifícios, de 19,7°C, variando entre 16,7°C e 36,4°C, com uma média de 27,3°C.

O edifício em taipa apresenta temperaturas mais baixas entre os 3 modelos em estudo quando as temperaturas exteriores são mais altas e, quando ocorrem as temperaturas externas mais baixas, este consegue se manter dentro dos limites de conforto, com melhor desempenho do que o edifício em alvenaria convencional nestas ocasiões. A temperatura no interior deste edifício varia entre os 18,5°C e os 33,2°C, com uma média de 25,3°C durante o período todo em estudo.

Por fim, o edifício em BTC apresenta um comportamento intermédio entre os edifícios nos períodos em que as temperaturas exteriores estão elevadas, porém apresenta temperaturas interiores mais altas quando as temperaturas externas decrescem no final do mês de outubro, variando assim entre os 23,3°C e os 35,3°C, com a menor amplitude térmica entre os modelos, porém a maior média de temperatura, em torno dos 28,0°C.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS NECESSIDADES TÉRMICAS DOS EDIFÍCIOS

Nesta seção são apresentados os resultados da simulação das necessidades energéticas, tendo como propósito comparar o desempenho térmico dos três tipos de construção em estudo e suas necessidades energéticas para manter o seu interior dentro das condições mínimas de conforto para seus usuários. Esta simulação foi realizada para ambos os cenários climáticos em estudo, atual e RCP8.5, com e sem a atuação da ventilação natural.

5.1. Sem Ventilação Natural

Neste primeiro caso foi analisado uma possibilidade em que não há a ventilação natural dos edifícios, considerando apenas o desempenho dos próprios materiais utilizados.

5.1.1. Cenário Climático Atual

Os resultados das necessidades energéticas dos três edifícios considerando o cenário climático atual podem ser visualizados no gráfico da Figura 60.

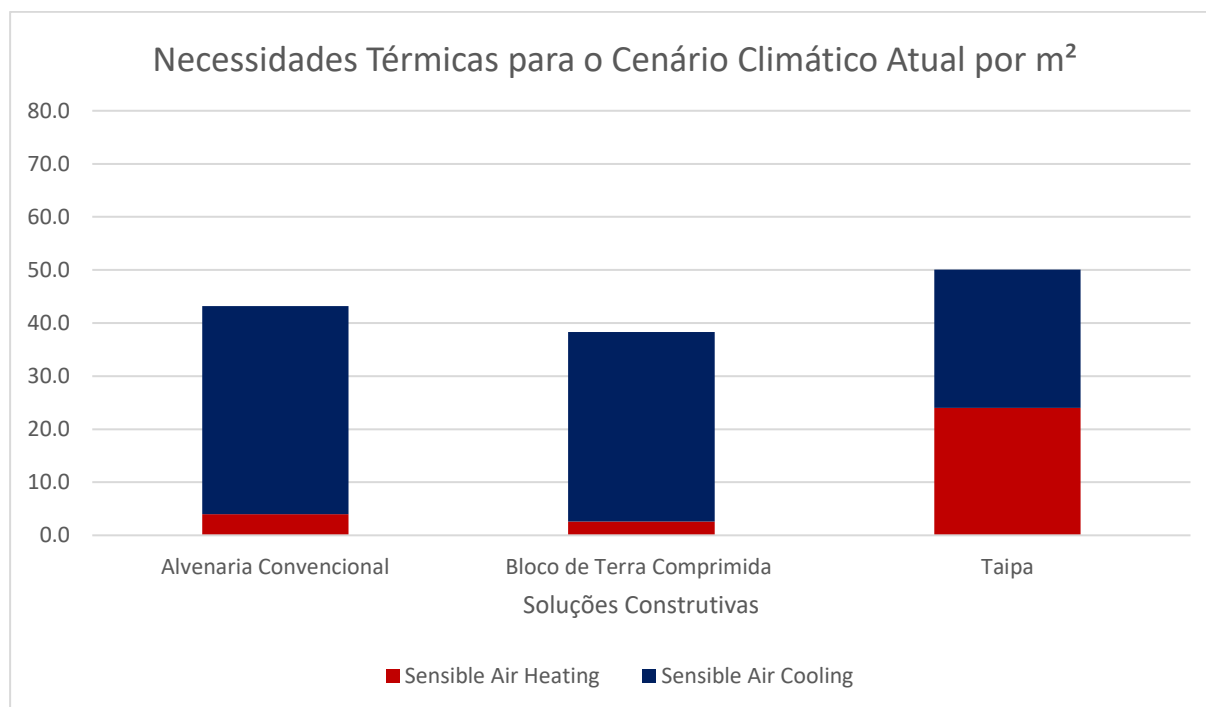


Figura 60 - Necessidades Térmicas para o Cenário Climático Atual em kWh/(m².ano).

Os resultados apresentados no gráfico mostram que o edifício em taipa é o que apresenta maiores necessidades energéticas, totalizando 50,053 kWh/(m².ano). Destes 24,033 kWh/(m².ano) são as necessidades de aquecimento e 26,020 kWh/(m².ano) de arrefecimento.

A solução em BTC, por sua vez, é a que apresenta menores necessidades energéticas totais anuais entre eles, com uma necessidade anual de 38,297 kWh/(m².ano), dos quais apenas 2,570 kWh/(m².ano) são para aquecimento e 35,727 kWh/(m².ano) para arrefecimento. Dessa forma este mostra um ótimo desempenho nos períodos menos quentes. Isto pode ser observado no gráfico da Figura 51, que mostram as temperaturas no interior do edifício, em que este apontou poucos períodos em que ultrapassava a temperatura de conforto mínima preestabelecida, requistando pouco dos sistemas HVAC para manter-se dentro dos limites impostos.

O edifício em alvenaria convencional apresenta um desempenho térmico mediano entres os em estudo, com uma necessidade energética, neste caso, de 43,168 kWh/(m².ano). Destes 39,210 kWh/(m².ano) para arrefecimento e 3,958 kWh/(m².ano) para aquecimento. Da mesma forma que para o edifício em BTC, nos gráficos das temperaturas internas é possível observar que, nos períodos em que a temperatura exterior estava muito elevada, este ultrapassava o limite máximo de temperatura de conforto com mais facilidade do que os limites mínimos nos períodos menos quentes, o que justifica as maiores necessidades energéticas dos sistemas HVAC para as estações de arrefecimento do que para as de aquecimento.

Dessa forma, de maneira geral, o edifício que mostrou melhor desempenho foi o em BTC, que requer 30,7% menos energia do que a solução menos apropriada, o edifício em taipa, para aquecer e arrefecer o seu interior durante o ano e 12,7% menos que o edifício em alvenaria convencional. Porém, é importante realizar uma análise separadamente do aquecimento e do arrefecimento, considerando as características das 3 soluções.

Primeiramente, a respeito do desempenho dos dois edifícios que apresentam isolamento térmico em sua composição e têm valores de U muito próximos, BTC (com o valor de U igual a 0,481 W/(m².°C)) e alvenaria convencional (com U igual a 0,468 W/(m².°C)). É possível observar que os resultados das necessidades energéticas de ambos para aquecimento e arrefecimento são muito próximos, porém, ainda a solução em BTC ainda é ligeiramente melhor em ambos os casos, mesmo com o seu valor de U sendo ainda um pouco maior que o da alvenaria convencional. Com valores de U tão próximos, o que pode ser um motivo plausível para o comportamento diferente das soluções é a diferença de peso/m² e, por conseguinte, a inércia térmica mais alta dos blocos de terra do que a alvenaria convencional.

Considerando-se agora as soluções que utilizam do mesmo material, porém metodologias diferentes, BTC e taipa, porém com valores de U diferentes, 0,481 W/(m².°C) e 1,116 W/(m².°C),

respetivamente. O que resultou maiores diferenças entre essas soluções foi a necessidade de aquecimento, para a qual a solução em BTC utiliza apenas de 10,7% do que a taipa precisaria para manter as mesmas condições em seu interior. Entretanto, embora a solução em BTC tenha uma necessidade anual de energia inferior, principalmente pelas necessidades significativamente mais baixas para o aquecimento, esta solução ainda apresenta um pior desempenho quanto ao arrefecimento. Para o edifício em BTC as necessidades de energia para arrefecer o seu interior são aproximadamente 37% mais altas do que para o edifício em taipa. Ainda que em valores absolutos seja uma diferença de $9,71\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{ano})$, é algo que deve ser considerado, principalmente quando os verões quentes são o principal problema de conforto da região em estudo.

Em questões gerais, neste cenário climático e considerando as condições impostas nesta situação, o edifício que apresentou melhores resultados foi o edifício em BTC, indicando que o uso da terra como material para fazer blocos construtivos pode ser adequado para esta região em estudo, para além das vantagens já anteriormente mencionadas. No entanto, seria útil realizar um estudo ainda mais aprofundado, considerando outras soluções para a utilização da taipa, possibilitando uma melhora em seu desempenho quanto às necessidades de aquecimento, pois suas necessidades quanto ao arrefecimento ainda assim são melhores do que as apresentadas pelo edifício em BTC. E, considerando o cenário de alterações climáticas e aumento de temperaturas, provavelmente as necessidades quanto ao arrefecimento se tornarão muito mais preocupantes do que quanto ao aquecimento, o que será visto na seção a seguir.

5.1.2. Cenário Climático RCP8.5

Os resultados das necessidades energéticas dos três edifícios considerando o cenário climático RCP8.5 podem ser visualizados no gráfico da Figura 61.

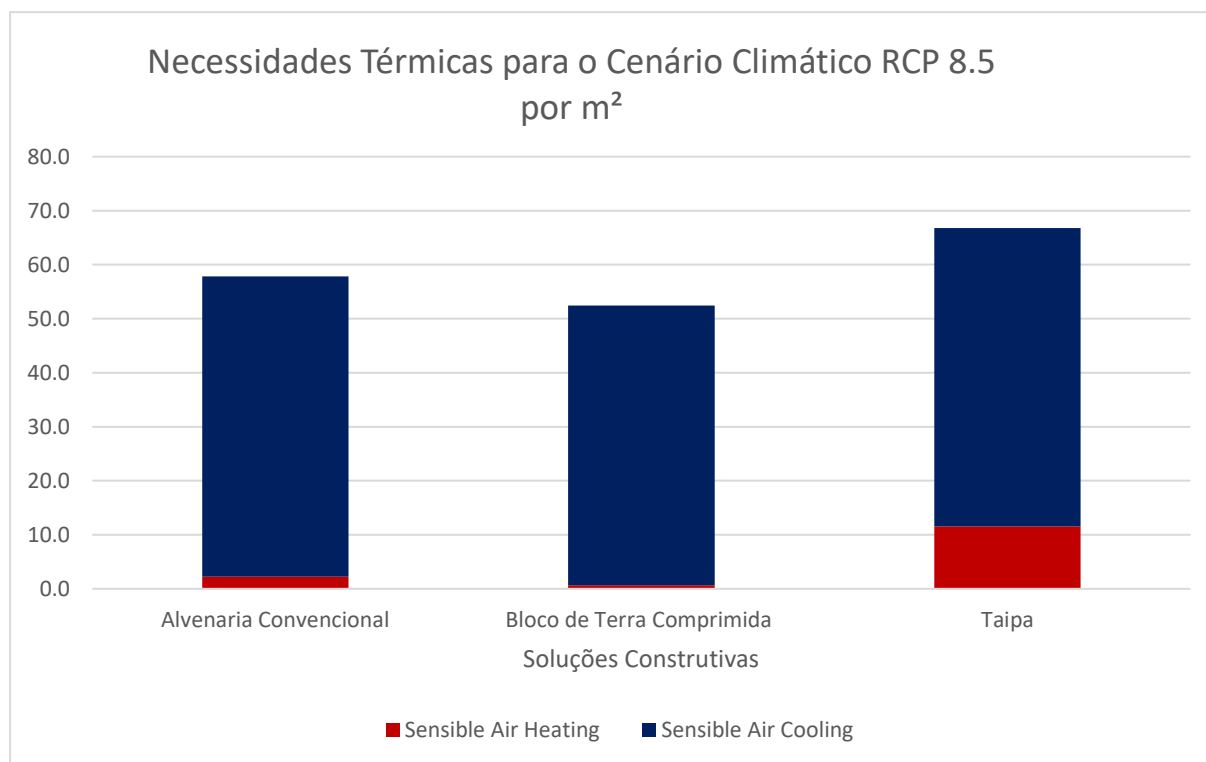


Figura 61 - Necessidades Térmicas para o Cenário Climático RCP 8.5 em kWh/(m².ano).

Considerando agora as alterações climáticas previstas para o final deste século, os resultados apresentados no gráfico mostram que novamente o edifício em taipa é o que apresenta maiores necessidades energéticas totais entre as 3 soluções, totalizando 66,768 kWh/(m².ano). Destes 11,521kWh/(m².ano) são as necessidades de aquecimento e 55,247 kWh/(m².ano) de arrefecimento.

A solução em BTC, por sua vez, é a que apresenta menores necessidades energéticas entre eles, com uma necessidade anual de 52,424 kWh/(m².ano), dos quais apenas 0,656 kWh/(m².ano) são para aquecimento e 51,767 kWh/(m².ano) para arrefecimento.

O edifício em alvenaria convencional apresenta um desempenho térmico mediano entre os em estudo, com uma necessidade energética neste caso de 57,808 kWh/m².ano. Destes 2,270kWh/(m².ano) para aquecimento e 55,538 kWh/(m².ano) para arrefecimento.

Desta forma, tanto em questão do cenário geral quanto na perspectiva do arrefecimento e do aquecimento, o que demonstrou melhor desempenho foi a solução em BTC. A solução em alvenaria

convencional apresenta uma necessidade energética anual 10,3% e a taipa 27,4% maior do que o BTC para manter o seu interior em uma temperatura confortável para os seus habitantes.

Neste sentido, quanto ao aquecimento, o edifício em alvenaria convencional, que apresenta o mesmo isolamento térmico e um valor muito aproximado de U relativamente ao edifício em BTC, apresentou mais do que o dobro das necessidades de energia em comparação a este (diferença de $1,6\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{ano})$), enquanto o edifício em taipa apresenta dez vezes (diferença de $10,9\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{ano})$) mais necessidades energéticas.

Quanto ao arrefecimento, o edifício em BTC superou inclusive os resultados apresentados pelo edifício em taipa, que no cenário anterior teve a melhor performance e, consequentemente, teve menor necessidade de arrefecimento. Dessa forma, o edifício em taipa necessita de 6,72% e o em alvenaria convencional 7,28% mais energia para arrefecer o seu interior do que o em BTC.

5.1.3. Diferença entre Cenários Climáticos

Importante citar as diferenças de necessidades de energia entre os cenários climáticos. Apesar da solução em BTC ter apresentado o maior aumento das necessidades energéticas, de 36,9%, enquanto os outros dois apresentaram um aumento de 33%, esta ainda foi a que obteve melhores resultados gerais e específicos entre as soluções. Ainda, mesmo que a taipa tenha apresentado os melhores resultados quanto ao arrefecimento no primeiro cenário climático, no RCP8.5 ela quase dobrou suas necessidades de energia para o arrefecimento, resultando num desempenho pior do que o BTC como método construtiva num cenário de alterações climáticas.

Outro ponto importante a ressaltar é a diferença das necessidades energéticas para o aquecimento dos edifícios entre os cenários. Esta diminui bruscamente devido ao aumento de temperaturas previsto, principalmente para os dois edifícios construídos em terra. Isto pode ser visto como um ponto positivo, se não olhar no cenário geral, em que se considera o aumento das necessidades energéticas para arrefecimento, que foi bastante significativo.

5.2. Ventilação Natural

Para uma melhora na eficiência, fez-se uma análise da possibilidade de inserção da ventilação natural nos horários em que as temperaturas estivessem mais baixas, da 1h às 9h da manhã, nos meses

mais quentes. Para isso ativou-se a ventilação natural na aba HVAC do *software*, conforme Figura 62 e utilizou-se do cronograma programado conforme mostra a Figura 63.

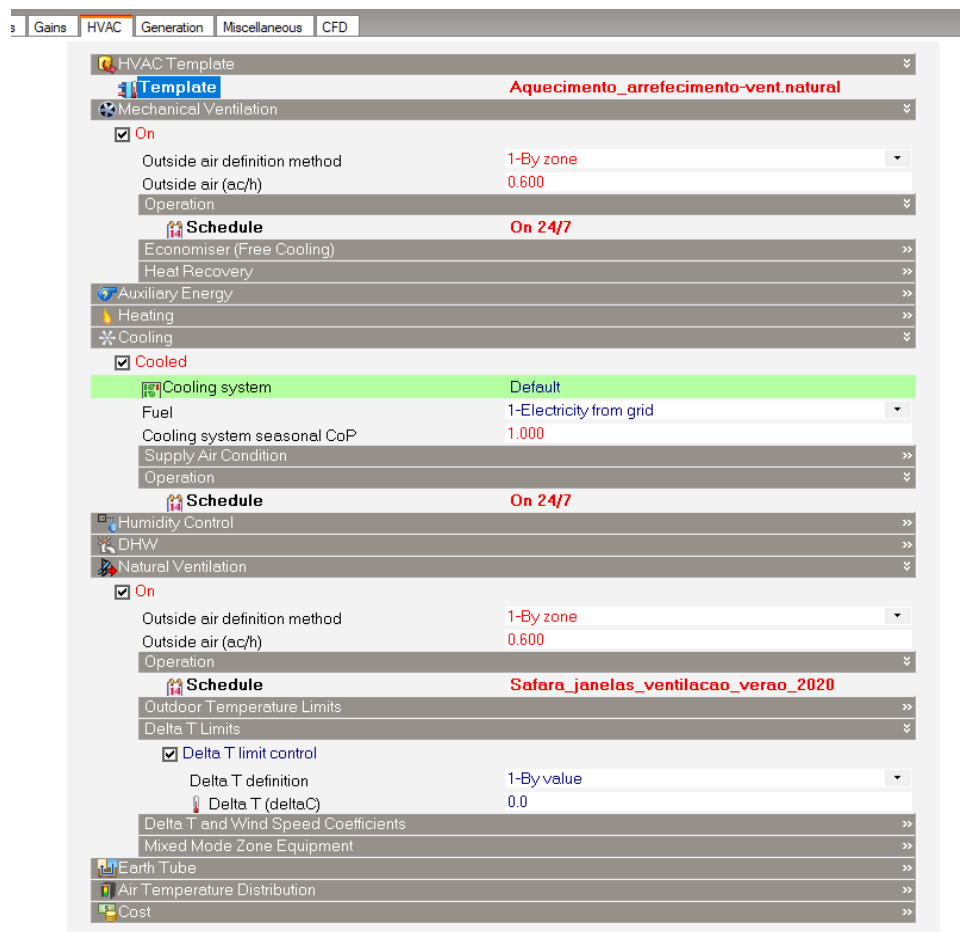


Figura 62 – Inserção da Ventilação Natural

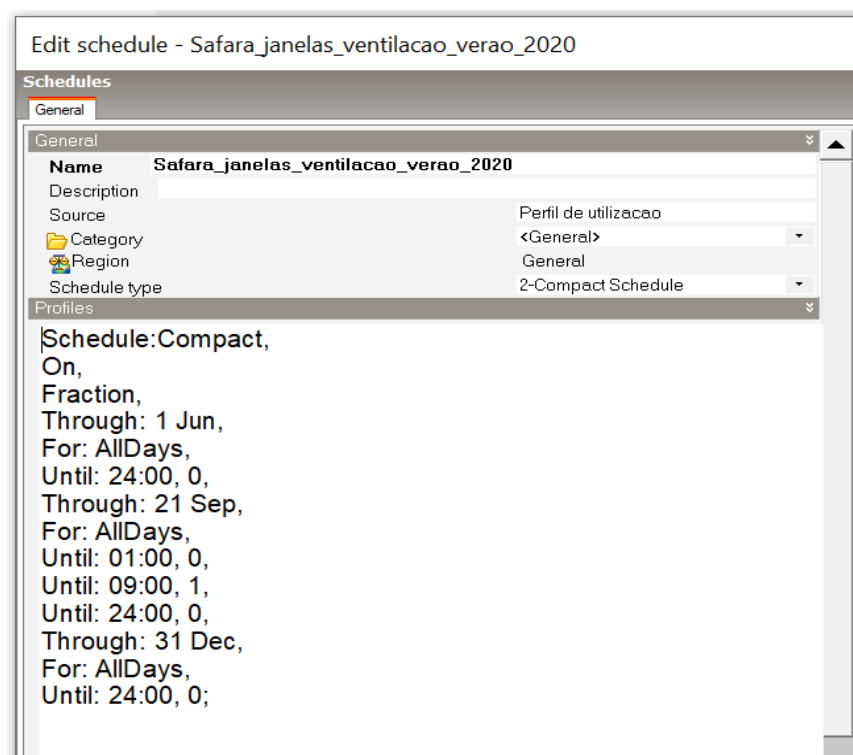


Figura 63 – Cronograma Ventilação Natural.

Com isso, obtiveram-se os resultados para os cenários climáticos atual e RCP8.5, considerando as alterações climáticas para o final deste século, apresentados nas seções a seguir.

5.2.1. Cenário Climático Atual

Os resultados das necessidades energéticas dos três edifícios considerando o cenário climático atual e a atuação da ventilação natural podem ser visualizados no gráfico da Figura 64.

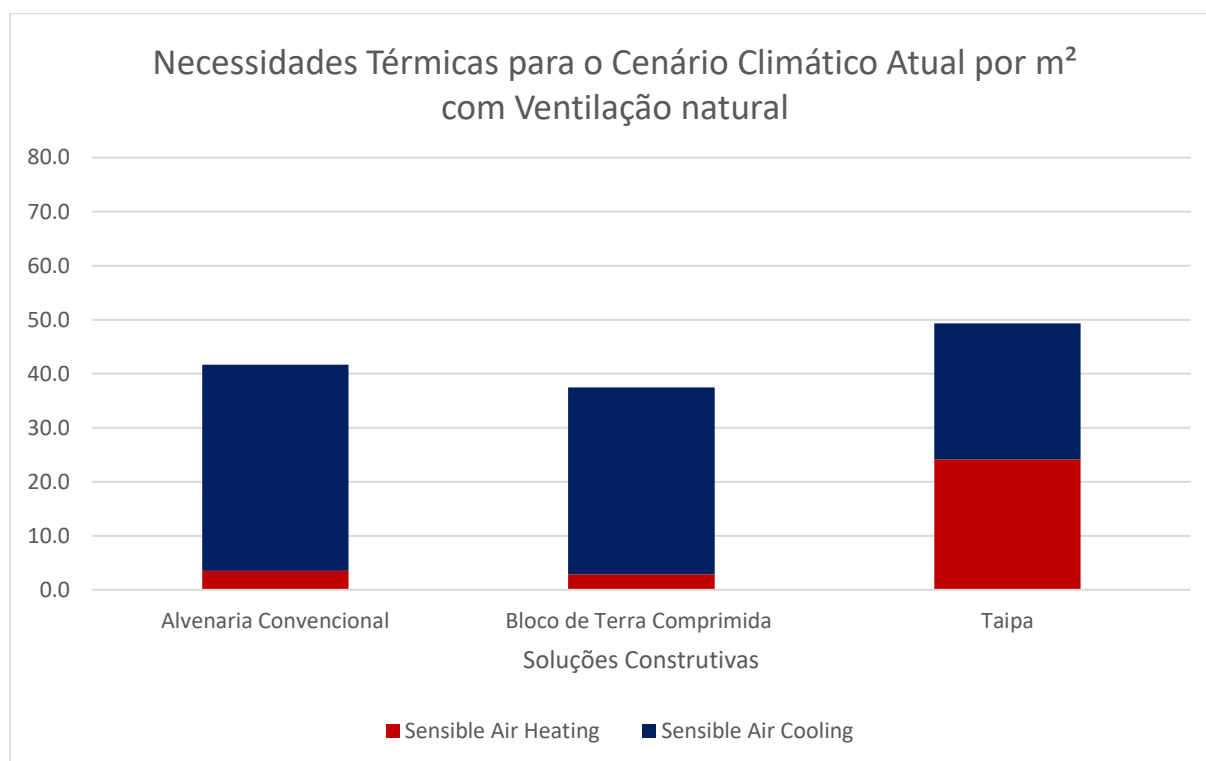


Figura 64 - Necessidades Térmicas para o Cenário Climático Atual por m² com Ventilação natural.

Os resultados apresentados no gráfico mostram que novamente o edifício em taipa é o que ainda seria o que apresentaria maiores necessidades energéticas totais entre as 3 soluções mesmo com a atuação da ventilação natural, totalizando 49,308 kWh/(m².ano). Destes 24,139 kWh/(m².ano) são as necessidades de aquecimento e 25,169 kWh/(m².ano) de arrefecimento.

A solução em BTC, por sua vez, é a que apresenta menores necessidades energéticas entre eles, com uma necessidade anual de 37,472 kWh/(m².ano), dos quais apenas 2,851 kWh/(m².ano) são para aquecimento e 34,621 kWh/(m².ano) para arrefecimento.

O edifício em alvenaria convencional apresenta um desempenho térmico mediano entres os em estudo, com uma necessidade energética neste caso de 41,690 kWh/m².ano. Destes 3,469kWh/(m².ano) para aquecimento e 38,194 kWh/(m².ano) para arrefecimento.

Mesmo com a ventilação natural nos horários mais frios durante a estação de verão, a necessidade energética para as 3 soluções não apresentou grandes alterações. O edifício que teve a maior diminuição das necessidades energéticas foi o em alvenaria convencional, mas, ainda assim, foi uma melhora de 3,5% no seu desempenho.

Dessa forma, o edifício que apresentou melhor desempenho quando às necessidades para aquecimento ainda foi o edifício em BTC e, para arrefecimento, foi o edifício em taipa. Porém, em questões gerais o edifício em taipa se mostrou com os piores resultados, necessitando de cerca de 32%

mais energia do que o com os melhores resultados, BTC, durante o ano para manter seu interior dentro das mesmas condições de conforto.

5.2.2. Cenário Climático RCP8.5

Os resultados das necessidades energéticas dos três edifícios considerando o cenário climático RCP8.5 e atuação da ventilação natural durante os horários de menos calor no verão podem ser visualizados no gráfico da Figura 65.

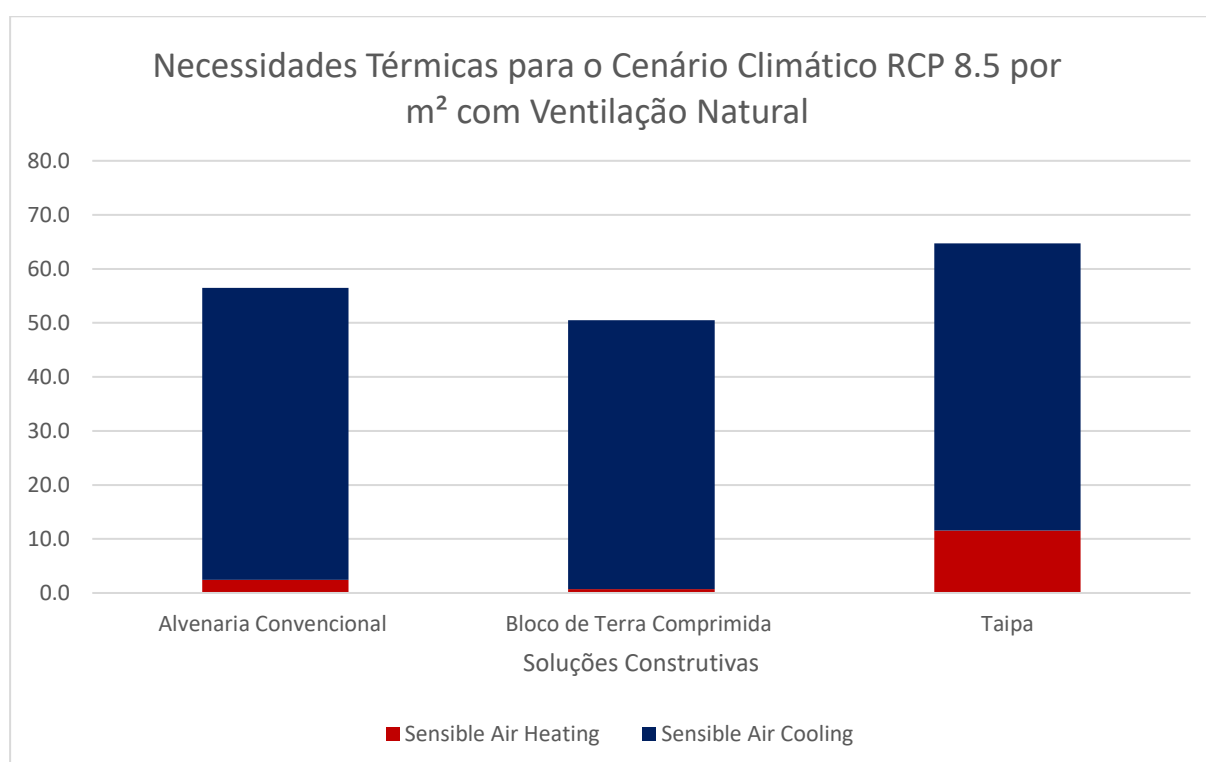


Figura 65 - Necessidades Térmicas para o Cenário Climático RCP 8.5 por m² com Ventilação Natural.

Para este cenário de alterações climáticas, os resultados apresentados no gráfico mostram que, com a ventilação, novamente o edifício em taipa é o que teria maiores necessidades energéticas totais entre as 3 soluções mesmo com a atuação da ventilação natural, totalizando 64,724 kWh/(m².ano). Destes 11,552 kWh/(m².ano) são as necessidades de aquecimento e 53,172 kWh/(m².ano) de arrefecimento.

A solução em BTC, por sua vez, é a que apresenta menores necessidades energéticas entre eles, com uma necessidade anual de 50,472 kWh/(m².ano), dos quais apenas 0,741 kWh/(m².ano) são para aquecimento e 49,731 kWh/(m².ano) para arrefecimento.

O edifício em alvenaria convencional apresenta um desempenho térmico mediano entre os em estudo, com uma necessidade energética neste caso de 56,480 kWh/m².ano. Destes 2,451 kWh/(m².ano) para aquecimento e 54,030 kWh/(m².ano) para arrefecimento.

Os resultados deste cenário se mostram muito similares aos resultados do cenário climático atual. Houve um pequeno aumento das necessidades energéticas durante os períodos de aquecimento, enquanto para os períodos de arrefecimento houve uma diminuição. Ainda assim, em termos gerais, o desempenho anual não tem uma melhora significativa. O edifício que apresenta melhores resultados em comparação com a simulação sem a ventilação natural é o em BTC, com 3,9% menos necessidades energéticas para manter o ambiente nas mesmas condições de conforto, seguido do edifício em taipa, com 3,2%, e do em alvenaria convencional, com 2,3%.

Neste caso, o edifício em BTC é o que melhor apresenta resultados tanto quanto às necessidades de aquecimento quanto de arrefecimento. E, da mesma forma que para a simulação sem a ventilação natural, entre o edifício em taipa e o em alvenaria convencional, o primeiro apresenta o melhor desempenho para arrefecimento, apesar de a diferença ser muito pequena, enquanto o segundo apresenta em torno de 4 vezes menos necessidades energéticas para o aquecimento do que o primeiro. O que torna a taipa a pior solução construtiva no caso deste cenário climático.

5.2.3. Comparativo Necessidades Térmicas com Ventilação Entre Cenários

Quando comparando as necessidades de energia entre os cenários climáticos, percebe-se que, neste caso, ao contrário do que ocorreu na simulação sem a ventilação natural, o edifício em BTC não foi o que apresentou o maior aumento das necessidades entre as soluções construtivas, tendo um aumento de 34,7%, enquanto o edifício em alvenaria convencional obteve um aumento de 35,5% e o em taipa de 31,3%.

Outro ponto importante a ressaltar é a diferença das necessidades energéticas para o aquecimento dos edifícios entre os cenários. Esta diminuiu bruscamente devido ao aumento de temperaturas previsto, principalmente para os dois edifícios construídos em terra. Porém, pode-se perceber que as necessidades de aquecimento aumentaram devido à ventilação natural, em comparação com a primeira simulação.

Ainda, da mesma forma que para a simulação sem a ventilação natural, mesmo que a taipa tenha apresentado os melhores resultados quanto ao arrefecimento no primeiro cenário climático, no

RCP8.5 ela mais do que dobrou suas necessidades de energia para o arrefecimento, resultando num desempenho pior do que o BTC como metodologia construtiva num cenário de alterações climáticas.

Por fim, neste caso, quando olhando para este cenário de alterações climáticas previsto, o edifício que apresentou melhor desempenho dentre as soluções propostas neste trabalho foi o edifício construído a partir de blocos de terra comprimida, com o uso do isolamento térmico, o que promove melhores resultados tanto para estações de arrefecimento, quanto para de aquecimento.

6. CONCLUSÃO

Como visto no decorrer deste trabalho, há muito com o que se preocupar em relação ao que pode vir a ocorrer devido às alterações climáticas. As temperaturas médias globais aumentaram significativamente no decorrer dos últimos anos e, tem-se como maior indicador deste, o aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE). Dentro deste contexto, foi assinado o Acordo de Paris, tendo como principal objetivo diminuir substancialmente as emissões a ponto de estagnar o aumento da temperatura mundial a partir da descarbonização. A União Europeia focou-se, desta forma, nos 3 principais setores que utilizam de grandes quantidades de energia: a indústria, o transporte e a construção.

O setor da construção tem grande influência a longo prazo quando se trata de consumo de energia, utilização eficiente de recursos e alterações climáticas. Deve-se assim ter em atenção a questão das emissões dos GEE causadas tanto no processo da construção quanto na utilização dos edifícios, influenciadas principalmente pelas soluções construtivas utilizadas nestes, quando se trata de energia consumida. Desta forma, tem-se buscado cada vez mais métodos construtivos que sejam considerados mais sustentáveis, tanto no processo de construção quanto utilização dos edifícios. Com isso, investigadores se voltaram à arquitetura vernácula, construída, em determinadas regiões de Portugal, principalmente, a partir do material terra. Sendo um material de menor impacto ambiental e com alta inércia térmica, a utilização da terra na construção pode trazer grandes contributos no cenário de aumento da temperatura.

O principal objetivo deste trabalho foi trazer uma contribuição para os estudos dentro da área de construção sustentável e performance térmica de edifícios construídos com sistemas em terra, dentro do contexto português. Dessa forma, buscou-se por analisar e comparar o desempenho de um mesmo edifício construído com a utilização da alvenaria convencional, maioritariamente utilizada nos dias atuais, e dois métodos construtivos em terra, os blocos de terra comprimida (BTC) e a taipa, dentro dos cenários climáticos atual e previsto para o final do século, caso não haja mitigação de emissões dos GEE (cenário climático RCP8.5).

Os resultados atingidos por meio do estudo deste trabalho, demonstram que a arquitetura vernácula pode ter um alto contributo para que haja um aumento na sustentabilidade no setor da construção, podendo contribuir nestes desafios que já estão sendo vividos pela população.

O edifício construído em alvenaria convencional apresentou alta necessidade do uso de equipamentos para manter o ambiente devidamente climatizado, o que reflete diretamente na sustentabilidade deste e se justifica pelas maiores variações térmicas observadas no seu interior, quando

em comparação com os outros dois sistemas em estudo. Mesmo com a presença do isolamento térmico e com um valor de U relativamente menor, este apresentou piores resultados no seu desempenho térmico nas estações de aquecimento em relação ao edifício em BTC e, nas estações de arrefecimento, foi o que apresentou os piores resultados em ambos os cenários climáticos.

Para o edifício construído em taipa, foi observado um bom desempenho quanto ao conforto no seu interior quando em estações de arrefecimento, com baixas necessidades térmicas nestes períodos, principalmente em relação ao edifício em alvenaria convencional. Porém, observou-se que a construção em taipa exige consideravelmente mais energia dos sistemas de aquecimento, durante o período mais frio, do que os sistemas em BTC e alvenaria convencional, necessitando de melhorias neste quesito. Dentro disto, é de notar que para arrefecer um ambiente pode ser mais difícil do que para aquecer. Neste caso, no contexto de construção dos edifícios vernáculos, o aquecimento poderia se resolver com a utilização de uma lareira, ou, poderia ter sido inserido um isolamento térmico nesta solução para verificar se haveria melhorias ao nível das outras soluções em estudo.

Em questões gerais, por ter tido resultados mais amenos e um bom desempenho geral, o edifício que obteve um melhor desempenho global, tanto para o cenário climático do ano de 2020 quanto para o pior cenário previsto para o final do século, RCP8.5, foi o em BTC. Este tipo de arquitetura apresentou, como visto nos resultados obtidos, boas respostas em relação às alterações climáticas previstas, quando comparado aos outros dois sistemas construtivos em estudo, com relação às necessidades energéticas e ao conforto térmico no interior dos ambientes, além de dizer respeito a um método construtivo que se originou da escassez de recursos convencionais em algumas regiões do país, facilitando e possibilitando as construções a partir de materiais locais.

Nestes resultados obtidos por meio de monitorização energética é possível observar que os sistemas vernáculos têm um grande potencial de utilização dentro do contexto das alterações climáticas. Porém, é importante ressaltar que ainda é necessária a melhoria e otimização da construção para que seu desempenho térmico seja ainda melhor, visto que os resultados apresentados ainda não podem ser considerados excelentes.

Mesmo apresentando melhor desempenho quanto às necessidades energéticas e incorporação de energia do que a alvenaria convencional e sabendo-se que as construções em terra têm menos impactos perceptíveis em final de vida (por serem facilmente recicláveis em um novo ciclo de vida ou devolvidos ao ambiente natural a um custo ambiental muito reduzido), ainda é necessária a obtenção de dados quantitativos que demonstrem seu desempenho ambiental, o que poderá ajudar nos processos de aceitação dos métodos construtivos realizados com ele.

Já dentro do contexto da análise de desempenho energético, as ferramentas de simulação utilizadas apresentam uma gama de possibilidades para a pesquisa e obtenção dos resultados comparativos dos diferentes sistemas construtivos existentes. No entanto, encontrou-se dificuldades na obtenção de dados quanto às características dos materiais vernáculos, atingindo-se resultados não tão precisos quanto se gostaria. Assim como foi possível observar a escassez e dificuldade de encontrar ferramentas que possibilitam a simulação dos cenários climáticos previstos e obtenção de ficheiros com estes dados para inserção no *software* utilizado. A partir de dados mais precisos a respeito da arquitetura vernácula e possibilidade de obter diferentes ficheiros de diferentes ferramentas, com os possíveis cenários climáticos, seria possível realizar mais simulações e obter resultados mais precisos dentro da área em estudo.

O trabalho apresenta, dessa forma, uma pequena contribuição para o aprimoramento térmico de edifícios, estudando três formas de construção, explorando a arquitetura vernácula portuguesa, porém há uma vasta disponibilidade de edifícios e materiais passíveis de estudo no âmbito da sustentabilidade dentro do território nacional e mundial. Dessa forma, são necessários mais estudos que possam complementar os resultados obtidos, trazendo mais materiais e cenários para a análise comparativa, podendo-se assim criar uma base de dados a respeito do desempenho térmico e ambiental de diferentes materiais construtivos e, assim, contribuir para as construções futuras do país e até em nível mundial, respeitando o meio ambiente e contribuindo para a diminuição das alterações climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Emanuel and P. Fernandes, “O Contributo da Arquitectura Vernacular Portuguesa para a Sustentabilidade dos Edifícios Universidade do Minho Escola de Engenharia.”
- [2] R. H. Moss *et al.*, “The next generation of scenarios for climate change research and assessment,” *Nature*, vol. 463, no. 7282. pp. 747–756, Feb. 11, 2010. doi: 10.1038/nature08823.
- [3] J. Fernandes, S. M. Silva, R. Mateus, and E. R. Teixeira, “Analysis of the Thermal Performance and Comfort Conditions of Vernacular Rammed Earth Architecture From Southern Portugal,” in *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, Elsevier, 2020, pp. 1–10. doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.11460-2.
- [4] “As respostas da UE às alterações climáticas.,” Aug. 07, 2018.
- [5] Copernicus, “Copernicus - Europe’s Eyes on Earth,” 2021.
- [6] A. Santos Silva and J. P. M. Fernandes, “Acordo de Paris (2015-2020),” 2020.
- [7] Conselho Europeu, “Conselho Europeu - Conselho da União Europeia,,” <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/green-deal/>, 2022.
- [8] T. F. Stocker *et al.*, *Alterações Climáticas 2013 - IPCC*. 2013. [Online]. Available: www.ipma.pt
- [9] M. Bernardino and F. Santo, “Identificação de metodologias para a definição de cenários climáticos no contexto das alterações climáticas no sector do turismo,,” 2015.
- [10] R. Para Decisores *et al.*, *Alterações Climáticas 2013 A Base Científica Perguntas Frequentes Editado por*. [Online]. Available: www.ipma.pt
- [11] F. das N. R. da Silva, “Utilização de um Modelo de Circulação Geral da Atmosfera para Previsões Sazonais: Sensibilidade a Dois Esquemas de Convecção e a Duas Resoluções Espaciais Diferentes,” 2005.
- [12] IPCC, “Intergovernmental Panel on Climate Change - Glossary,” *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2020.
- [13] A. Rudofsky, by Doubleday, and G. City, “Architecture without architects, an introduction to nonpedigreed architecture,” 2017. [Online]. Available: www.moma.org/calendar/exhibitions/3459
- [14] S. SIKORA, “Willey House Stories Part 2 – Influencing Vernacular Architecture,” <https://franklloydwright.org/willey-house-stories-part-2-influencing-vernacular-architecture/>, 2017.
- [15] F. Pacheco, T. Rute, M. G. Eires, and S. Jalali, *Construção em Terra*. 2009.
- [16] P. A. Abreu, “Arquitecturas da Terra,” <https://arquitecturasdeterra.blogspot.com/2010/03/grande-muralha-da-chinataipa.html?m=0>, Mar. 2010.
- [17] “Huacas del Sol y la Luna, Chan Chan, Huanchaco, Huaca Arcoiris. (s.d.),” *Befunperu Tours*: <https://www.befunperu.com/pt/producto/huacas-del-sol-y-la-luna-chan-chan-huanchaco-huaca-arcoiris/>.
- [18] T. (2015). Garcia, “Shibam: Los Rascacielos de Adobe,,” *Fonte: El País*: https://elpais.com/elpais/2015/08/19/seres_urbanos/1439964000_143996.html, 2015.
- [19] C. S. Pereira, “A TÉCNICA DA TAIPA EM PORTUGAL: da transmissão do saber-fazer ao ensino formal.”

- [20] M. I. Gomes, T. Santos, C. Pereira, and P. Faria, "Construção com base em Terra: Contributo para a Ecoeficiência na Construção."
- [21] G. I. K. Taparello, "A Industrialização da Construção com Terra através da Impressão 3D," vol. Edição 4, pp. 3–3, 2016.
- [22] R. Mateus, "Novas Tecnologias Construtivas com Vista à Sustentabilidade da Construção."
- [23] R. A. Silva, "A Construção em Taipa e os Sismos."
- [24] M. English, "David Easton - 45 years of Rammed Earth.," *The Architects' Take*: <https://thearchitectstake.com/interviews/david-easton-45-years-of-rammed-earth-construction/>, 2018.
- [25] Ana, "Tijolo Ecológico: Opte por Sistemas Construtivos Sustentáveis.," *VivaDecora Blog*: <https://www.vivadecora.com.br/revista/tijolo-ecologico/>, 2019.
- [26] F. P. Incropera, "Fundamentos de transferência de calor e de massa".
- [27] L. F. A. Jorge, "Determinação do coeficiente de transmissão térmica em paredes de edifícios."
- [28] C. da C. R. Martins, "Condicionantes e medidas de melhoria na certificação energética de edifícios tradicionais de habitação em centros históricos da Beira Interior."
- [29] ADENE, "Manual SCE - Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios."
- [30] S. Gama Caldas Sampaio, P. Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes Doutor António Álvaro Borges Abel Júri Presidente, D. Manuel de Arriaga Brito Correia Guedes Orientador, P. Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes Vogal, and P. Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues, "Análise experimental do comportamento térmico de construções em terra Architectura Orientadores," 2014.
- [31] P. Taylor and M. B. Luther, "Evaluating rammed earth walls: A case study," *Solar Energy*, vol. 76, no. 1–3, pp. 79–84, 2004, doi: 10.1016/j.solener.2003.08.026.
- [32] D. Allinson and M. Hall, "Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK," *Energy Build*, vol. 42, no. 6, pp. 845–852, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.12.005.
- [33] T. Meneses, R. Vincente, A. Costa, A. Figueiredo, H. Varum, and N. Soares, *Comportamento Térmico de Construções em Alvenaria de ADOBE: Ensaio sobre três células de teste à escala 1:4*. Cátedra Juan de Villanueva, E.T.S. de Arquitectura de Valladolid, 2011.
- [34] S. Goodhew, L. Watson, S. Goodhew, R. Griffiths, and D. Short, "Building Performance- The 'Safety' Gap View project CobBauge View project Some preliminary studies of the thermal properties of Devon cob walls," 2000. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/259519295>
- [35] V. Soebarto, "Analysis of indoor performance of houses using rammed earth walls".
- [36] S. Goodhew and R. Griffiths, "Sustainable earth walls to meet the building regulations," *Energy Build*, vol. 37, no. 5, pp. 451–459, 2005, doi: 10.1016/j.enbuild.2004.08.005.
- [37] M. R. Hall, "Assessing the environmental performance of stabilised rammed earth walls using a climatic simulation chamber," *Build Environ*, vol. 42, no. 1, pp. 139–145, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.08.017.
- [38] J. C. Morel, A. Pkla, and P. Walker, "Compressive strength testing of compressed earth blocks," *Constr Build Mater*, vol. 21, no. 2, pp. 303–309, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021.

- [39] J. E. Aubert, A. Fabbri, J. C. Morel, and P. Maillard, "An earth block with a compressive strength higher than 45 MPa!," *Constr Build Mater*, vol. 47, pp. 366–369, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.068.
- [40] J. C. Morel and A. Pkla, "A model to measure compressive strength of compressed earth blocks with the '3 points bending test,'" 2002.
- [41] S. A. Lima, H. Varum, A. Sales, and V. F. Neto, "Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash," *Constr Build Mater*, vol. 35, pp. 829–837, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.127.
- [42] M. C. N. Villamizar, V. S. Araque, C. A. R. Reyes, and R. S. Silva, "Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks," *Constr Build Mater*, vol. 36, pp. 276–286, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.056.
- [43] R. Eires, S. Jalali, and A. Camões, "Compressed Earth Blocks Using Metakaolin and Lime with Antifungicide Additions."
- [44] F. V. Riza, A. M. A. Zaidi, and I. A. Rahman, *A Brief Review of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB)*. IEEE, 2010.
- [45] V. G. ALMEIDA, "Utilização da tecnologia BIM para análise de desempenho térmico de edifícios," 2019.
- [46] Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, "Processo de projeto BIM: Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC," Brasília,DF, 2017.
- [47] Câmara Brasileira da Indústria da Construção, "ABNT 15575/2013 - Desempenho de Edificações Habitacionais," 2013.
- [48] Weather Spark., "Histórico de Condições Meteorológicas de 2020, em Évora," *Weather Sparks*: <https://pt.weatherspark.com/h/s/32806/2020/3/Hist%C3%B3rico-das-condi%C3%A7%C3%B5es-meteorol%C3%B3gicas-no-inverno-de-2020-em-%C3%89vora-Portugal#Figures-Temperature>, 2022.
- [49] Cal Adapt., "Which RCP (emissions) Scenarios Should I use in my Analysis.," *Cal Adapt*: <https://cal-adapt.org/help/faqs/which-rcp-scenarios-should-i-use-in-my-analysis/>, 2020.
- [50] J. F. Souza De Paula *et al.*, "Análise Comparativa de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico Simulado com as Ferramentas PVSYST e SAM (System Advisor Model)," Florianópolis, SC, 2022.

APÊNDICE

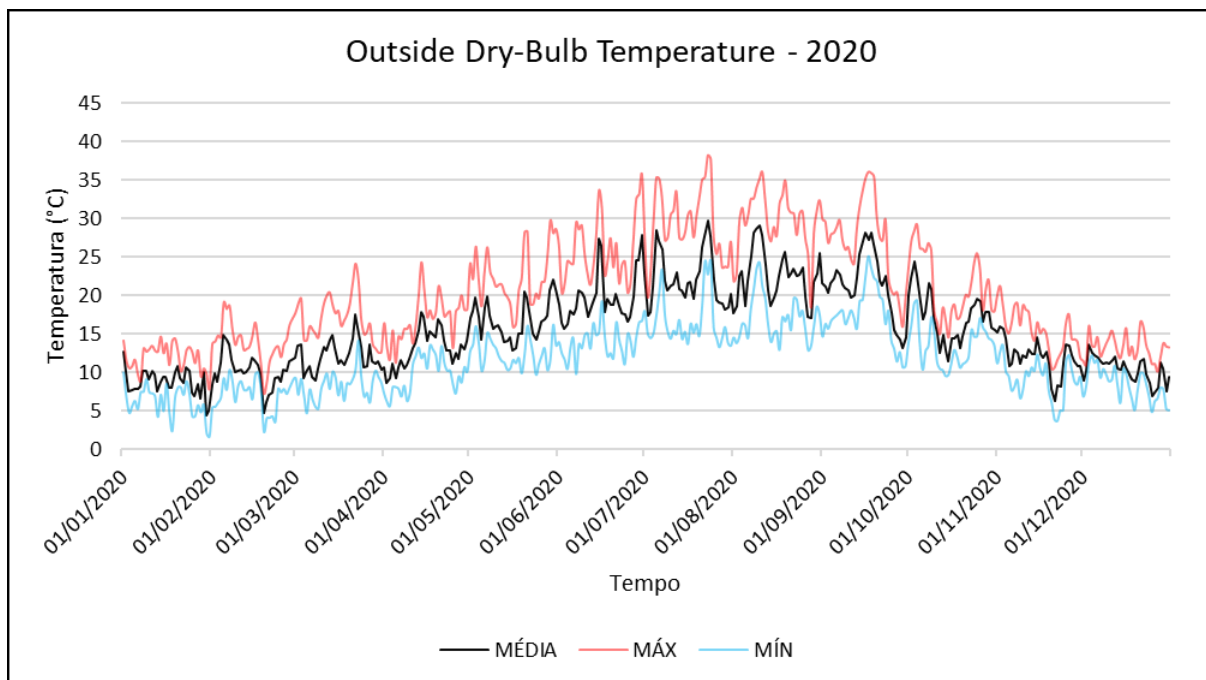


Figura A. 1 - Temperatura Exterior para o cenário climático de 2020.

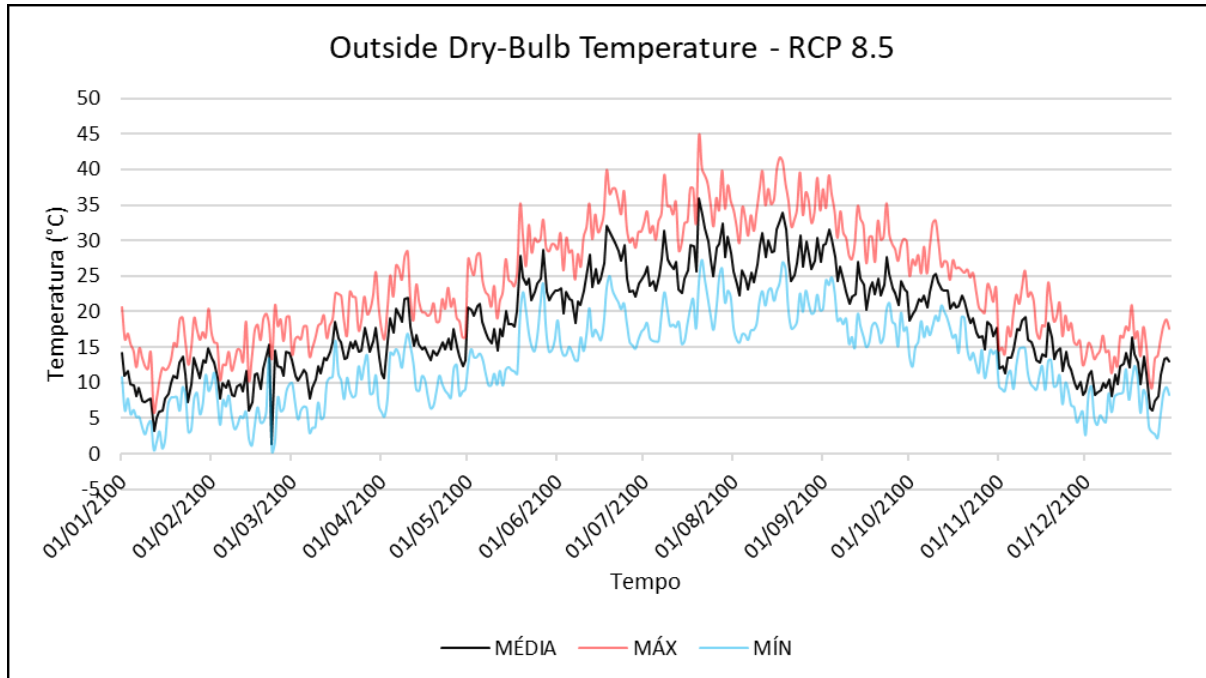


Figura A. 2 - Temperatura Exterior para o Cenário Climático RCP 8.5.

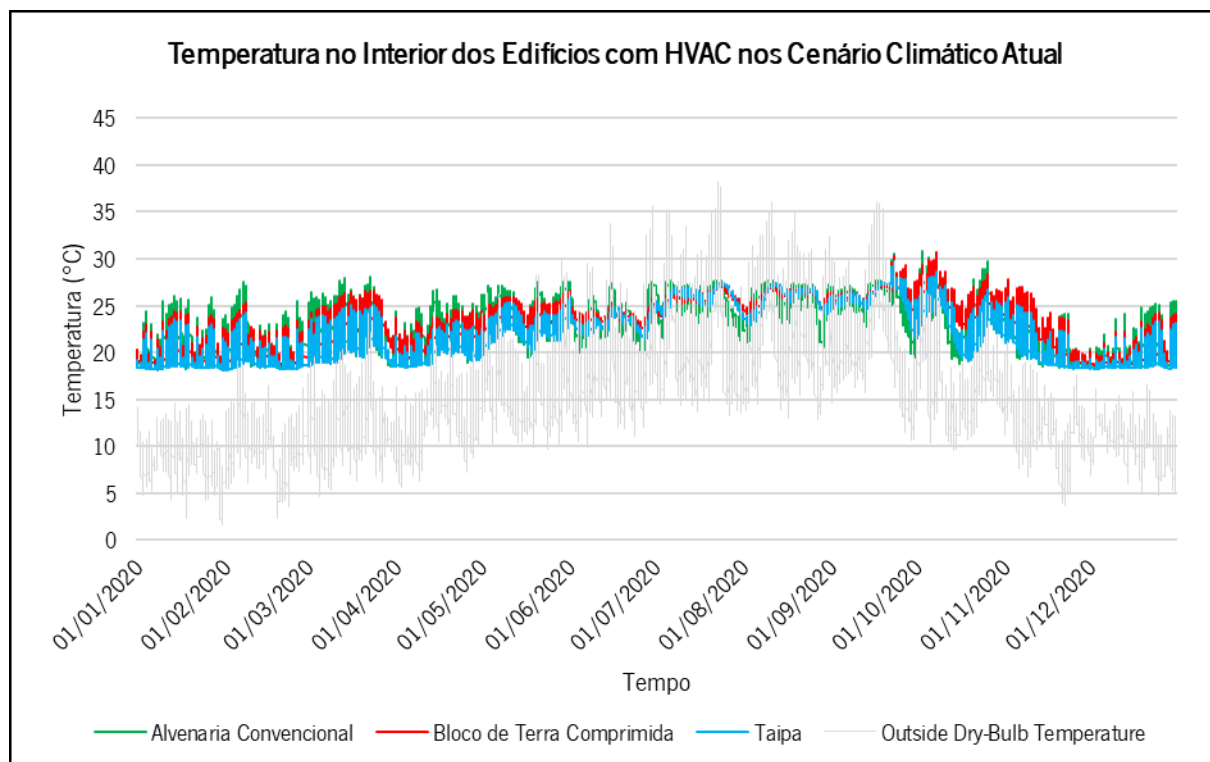


Figura A. 3 - Temperatura no Interior dos edifícios com HVAC no cenário climático atual.

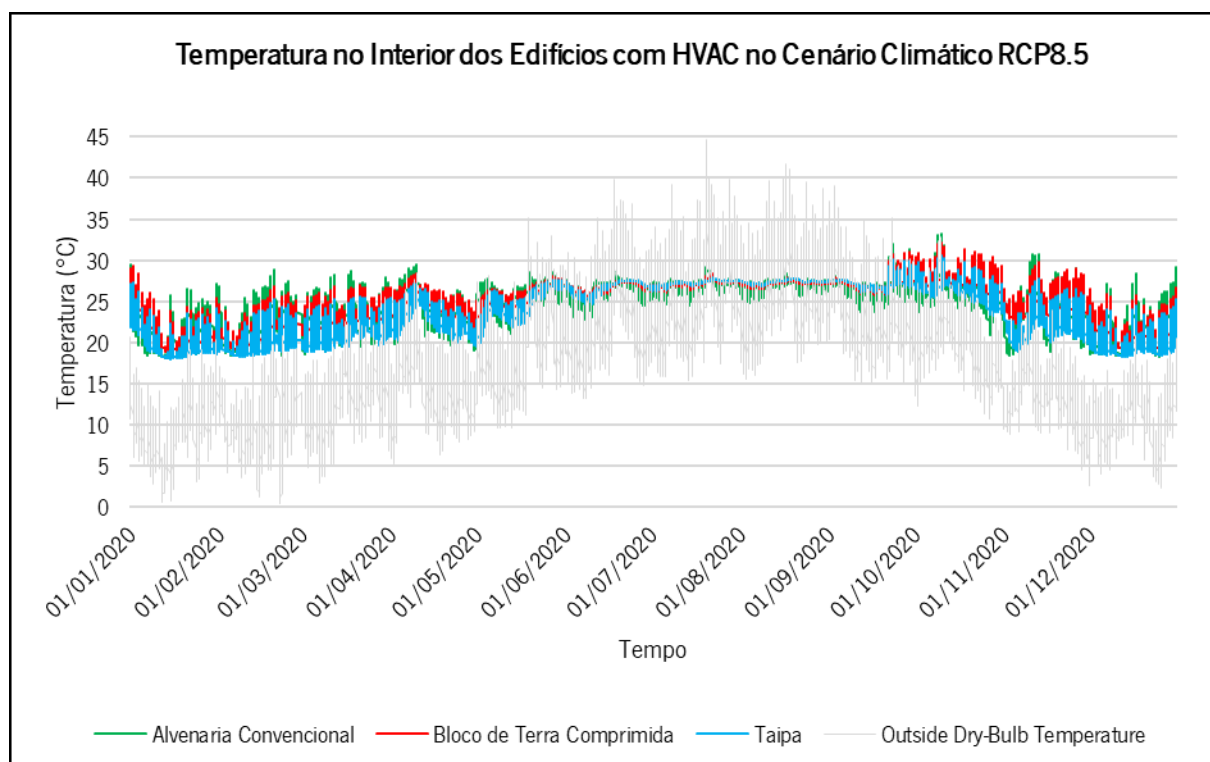


Figura A. 4 - Temperatura no Interior dos edifícios com HVAC no cenário climático RCP8.5.

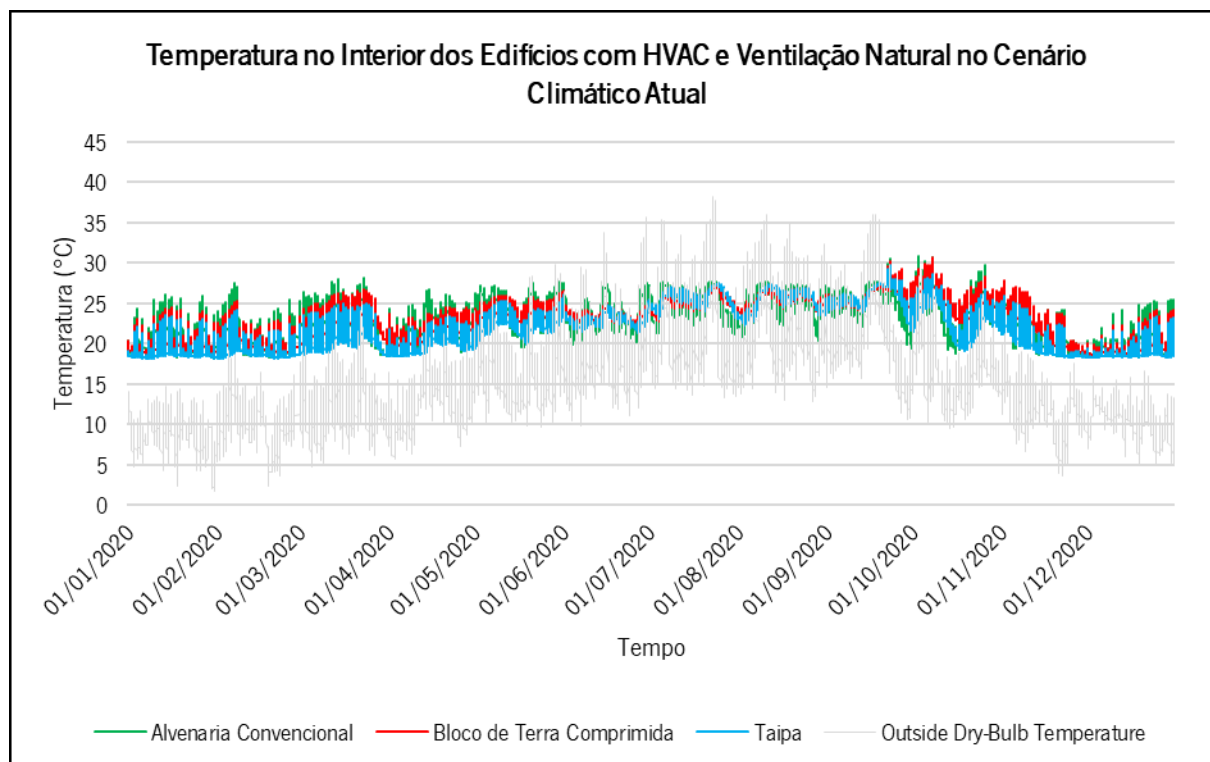


Figura A. 5 - Temperatura no Interior dos edifícios com HVAC e ventilação natural no cenário climático atual.

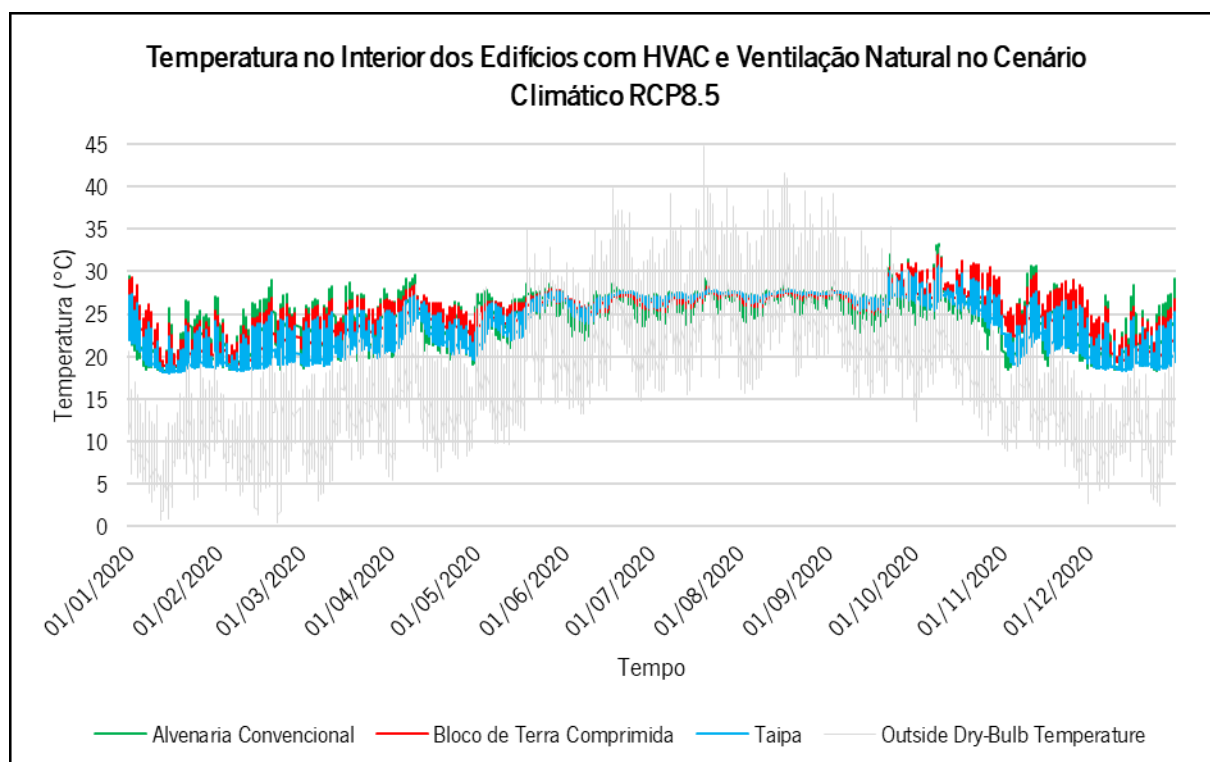


Figura A. 6 - Temperatura no Interior dos edifícios com HVAC e ventilação natural no cenário climático RCP8.5.